

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur**  
**Et de la Recherche scientifique**  
**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**  
**Faculté de Technologie**



**Mémoire de Fin d'Étude**  
**En vue de l'obtention du diplôme de**  
**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences et Technologie**  
**Filière : Génie Electrique**  
**Spécialité Réseau Electrique**

**Thème**

**Commande MPPT optimale à base  
d'intelligence Artificielle d'un système  
photovoltaïque**

Devant le jury composé de :

Gaia Talal                      Président  
Mida Idris                      Examineur  
Khechekhouche Ali        Encadreur

Présenté par :

Hammacha Ouidiane  
Settou Abdelaziz  
Beyat Dounya

**Année Universitaire : 2021/2022**

# *REMERCIEMENT*

*Nous remercier Dieu le tout puissant qui nous a donné la force  
et la patience d'accomplir ce modeste travail :*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous ceux qui  
ont contribué à élaborer ce modeste travail*

*A monsieur **Khechkehouché Ali** notre encadreur pour ses  
conseils et directives.*

*BD Almalik pour son aide.*

*Aux membres du jury qui on respecte leurs critiques et  
orientation.*

*Et en fin nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou  
de loin pour mener à bien notre projet de fin de cycle.*

*Merci*

# **DEDICACE**

*Je remercie Dieu et le loue car il m'a guidé et illuminé mon chemin*

*Ma mère, qui a insufflé dans mon cœur l'amour des sciences.*

*Mon père qui m'a encouragé.*

*Mes frères, et ma famille, petits et grands gros.*

*Pour tous ceux qui m'ont appris les lettres à tous les niveaux d'études, du primaire à l'université*

***Hammacha Ouïdiane***

*Je dédicace travail à :*

*Mon père bien-aimé que Dieu prolonge sa vie.*

*Ma chère mère, que Dieu bénisse son âme.*

*Mes frères*

*A tous mes chers professeurs; Qui n'a pas hésité à m'aider*

***Settou Abdelaziz***

*Je dédicace travail à :*

*Ma mère bien-aimée*

*Mon cher père*

*Mes chers frères, et ma famille*

*Mon fiancé Mohammed*

*Mes amis, surtout Amel et Fatima*

*Tous mes chers professeurs*

*Enfin à mes partenaires dans le travail*

***Beyat Donya***

## Résumé

L'énergie photovoltaïque (PV) gagne de plus en plus sa place dans les sources d'énergie alternatives mais les panneaux solaires, malgré le développement des technologies de fabrication, souffrent d'un rendement de conversion énergétique assez faible, ce rendement peut être encore plus faible si le générateur photovoltaïque (PVG) ne fonctionne pas autour d'un point appelé : point de puissance maximale MPP. La poursuite de ce point, qui change de position avec les conditions climatiques, est une étape très importante dans la conception d'un système PV. Dans cette thèse nous allons simuler, optimiser et réaliser un système photovoltaïque fonctionnant avec un survolteur. Cette étude couvre la mise en œuvre de différents algorithmes du point de puissance maximale tels que l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O), la conductance incrémentale (InC), la logique floue et le PSO-PID et réseau neuronal. Par conséquent, nous commencerons par la simulation et la modélisation du cellule photovoltaïque et le convertisseur boost selon le modèle mathématique. Ensuite, nous avons détaillé plusieurs algorithmes MPPT contrôlant notre convertisseur.

**Mots clés :** Générateur photovoltaïque, MPP, booster, P&O, INC, Logique floue, Réseau neuronal, Simulation, MPPT.

## ملخص

تكتسب الطاقة الكهروضوئية (PV) مكانتها بشكل متزايد بين مصادر الطاقة البديلة ، لكن الألواح الشمسية ، على الرغم من تطور تقنيات التصنيع ، تعاني من كفاءة تحويل طاقة منخفضة إلى حد ما ، يمكن أن تظل هذه الكفاءة أقل إذا لم يكن المولد الكهروضوئي (PVG) لا تعمل حول نقطة تسمى: نقطة الطاقة القصوى MPP. يعد تتبع هذه النقطة ، التي تغير الموقع مع الظروف المناخية ، خطوة مهمة للغاية في تصميم نظام الكهروضوئية. في هذه الأطروحة سنقوم بمحاكاة وتحسين وتحقيق نظام كهروضوئي يعمل بمحول. تغطي هذه الدراسة تنفيذ مختلف خوارزميات نقطة الطاقة القصوى مثل خوارزمية الاضطراب والملاحظة (P&O)، ناقلة متزايدة (InC)، والمنطق الضبابي و PSO-PID والشبكة العصبية. لذلك ، سنبدأ بمحاكاة ونمذجة الخلية الكهروضوئية ومحول رافع للتوتر وفقاً للنموذج الرياضي. بعد ذلك ، قمنا بتفصيل العديد من خوارزميات MPPT التي تتحكم في محولنا.

**الكلمات الرئيسية :** مولد الطاقة الكهروضوئية ، MPP، المحول، P&O، INC ، المنطق الضبابي ، الشبكة العصبية ، المحاكاة ، MPPT.

## Abstract

Photovoltaic (PV) energy is increasingly gaining its place among alternative energy sources, but solar panels, despite the development of manufacturing technologies, suffer from a fairly low energy conversion efficiency, this efficiency can still be

lower if the photovoltaic generator (PVG) does not operate around a point called: maximum power point MPP. Tracking this point, which changes position with climatic conditions, is a very important step in the design of a PV system. In this thesis we will simulate, optimize and realize a photovoltaic system operating with a booster. This study covers the implementation of different maximum power point algorithms such as Perturbation and Observation (P&O) Algorithm, Incremental Conductance (InC), Fuzzy Logic and PSO-PID and Neural Network. Therefore, we will start with the simulation and modeling of the photovoltaic cell and the boost converter according to the mathematical model. Next, we detailed several MPPT algorithms controlling our converter.

**Keywords :** Photovoltaic generator, MPP, booster, P&O, INC, Fuzzy logic, Neural network, Simulation, MPPT.

# SOMMARE

---

Introduction Générale.....	2
I Système Photovoltaïque.....	4
Introduction.....	5
I.1 Evolution du marché mondial de l'énergie photovoltaïque.....	5
I.2 Système Photovoltaïque.....	6
I.2.1 Générateur PV.....	7
I.2.1.1 Effet photovoltaïque.....	7
I.2.1.2 Rayonnement solaire.....	8
I.2.2 Cellule PV.....	9
I.2.2.1 Caractéristiques électriques d'une cellule PV.....	10
I.2.2.2 Circuit électrique équivalent de la cellule PV.....	11
I.2.3 Module PV.....	14
I.2.3.1 Modèle mathématique d'un module PV.....	15
I.2.3.2 Influence de l'éclairement et température sur le comportement du module PV.....	16
I.2.3.3 Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du module PV.....	17
I.2.3.4 Assemblage des modules PV.....	19
I.3 Système PV raccordé au réseau électrique.....	20
I.3.1 Eléments constituant le système PV raccordé au réseau.....	20
Conclusion.....	21
II Modélisation Du Système Photovoltaïque.....	22
Introduction.....	23
II.1 Générateur photovoltaïque « GPV ».....	23
II.2 Modélisation des cellules photovoltaïque.....	26
II.3 Convertisseur DC-DC.....	28
II.3.1 Définition.....	28
II.3.2 Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques.....	29
II.3.3 Les types des convertisseurs de tension DC/DC « HACHEUR ».....	29
II.3.3.1 Convertisseur élévateur « BOOST ».....	30
II.3.3.2 Convertisseur abaisseur « BUCK ».....	32
II.3.3.3 Convertisseur inverseur « BUCK - BOOST ».....	35
II.4 Commandes de poursuite du point de puissance maximale MPPT.....	36
II.4.1 Principe du MPPT.....	36

# SOMMARE

---

II.5 Classification des MPPT.....	38
II.5.1 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche .....	38
Conclusion.....	38
III Méthodes MPPT simulation et résultats.....	40
Introduction.....	41
III.1 Les algorithmes MPPT.....	41
III.1.1 Algorithme Perturbation & Observation (P&O).....	41
III.1.2 Méthode de conductance incrémentale (IncCond).....	43
III.1.3 Autres méthodes MPPT « hill climbing ».....	44
III.2 Commande par logique floue.....	45
III.3 Réseaux de neurones .....	48
III.4 Tension fractionnaire en circuit ouvert.....	49
III.5 Courant de court-circuit fractionnaire .....	50
III.6 Balayage en courant.....	51
III.7 Calcul du courant et de la tension maximaux au point de puissance.....	52
III.8 REGULATEUR PID.....	52
III.9 Recherche de maxima multiples .....	52
III.10 Simulation du système photovoltaïque.....	53
III.10.1. Teste sur un convertisseur DC/DC.....	53
III.10.2. Simulation du panneau photovoltaïque.....	54
III.10.3 Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT.....	55
III.10.3.1 Simulation avec la commande PO.....	56
III.10.3.2 Simulation avec la commande INC.....	65
III.10.3.3 Simulation avec la logique floue.....	70
Conclusion.....	74
Conclusion Générale.....	77

# LISTE DED FIGURES

---

## Chapitre I

<b>Figure .I.1:</b> Puissance des installations ajoutées par différentes sources d'énergie en 2018 .....	5
<b>Figure.I.2:</b> Evolution de la capacité des installations PV cumulatifs installés globaux 2000-2018 (MW) .....	6
<b>Figure.I.3:</b> Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau .....	7
<b>Figure.I.4:</b> Répartition spectrale du rayonnement.....	8
<b>Figure.I.5:</b> Schéma de bandes d'énergies des différents matériaux.....	10
<b>Figure.I.6:</b> Structure d'une cellule PV .....	10
<b>Figure.I.7:</b> Circuit électrique équivalent d'une cellule PV.....	13
<b>Figure.I.8:</b> Caractéristiques I(V) et (b) la représentation classique de courbe I-V d'une cellule PV .....	13
<b>Figure.I.9:</b> Module PV de $N_p$ branches parallèles et $N_s$ cellule en séries.....	15
<b>Figure.I.10:</b> Influence de l'éclairement et de la température sur $I=f(V)$ et $P=f(V)$ .....	17
<b>Figure.I.11:</b> Courbe de I(V) et P(V) d'un générateur PV de 100 kW.....	18
<b>Figure.I.12:</b> Configuration de câblage des modules PV .....	19

## Chapitre II

<b>Figure.II.1:</b> Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	24
<b>Figure.II.2:</b> Module BP Solar340.....	27
<b>Figure.II.3:</b> Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	29
<b>Figure.II.4:</b> Réversibilité (et non réversibilité) des convertisseurs statiques .....	29
<b>Figure.II.5:</b> Symbole et signaux du convertisseur.....	30
<b>Figure.II.6:</b> Schéma de convertisseur élévateur « Boost ».....	30
<b>Figure.II.7:</b> Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost .....	31
<b>Figure.II.8:</b> Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.....	31
<b>Figure.II.9:</b> Schéma électrique boost ouvert.....	32
<b>Figure.II.10:</b> Schéma électrique d'un convertisseur buck.....	33
<b>Figure.II.11:</b> Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck.....	33
<b>Figure.II.12:</b> Schéma électrique d'un hacheur buck fermé.....	34
<b>Figure.II.13:</b> Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert .....	35
<b>Figure.II.14:</b> Schéma électrique d'un convertisseur buck-boost .....	36
<b>Figure.II.15:</b> Courbe caractéristique de puissance d'un GPV.....	37
<b>Figure.II.16:</b> Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	37

## LISTE DED FIGURES

---

### Chapitre III

<b>Figure.III.1:</b> Algorithme Pertub Observe (P&O).....	42
<b>Figure.III.2:</b> Courbes caractéristiques des panneaux PV.....	43
<b>Figure.III.3:</b> Algorithme d'incrémentation de la conductance.....	44
<b>Figure.III.4:</b> Fonctions d'adhésion.....	46
<b>Figure.III.5:</b> Organigramme de la commande par logique floue.....	48
<b>Figure.III.6:</b> Réseau de neurones.....	48
<b>Figure.III.7:</b> Schéma d'un BOOST sous MATLAB/SIMULINK.....	53
<b>Figure.III.8:</b> Courbes de la tension d'entré et de sortie d'un BOOST .....	54
<b>Figure.III.9:</b> Schéma de simulation d'un panneau PV étudié.....	54
<b>Figure.III.10:</b> Paramètre de cellule PV.....	55
<b>Figure.III.11:</b> Courbe des caractéristiques du I-V et P-V du panneau.....	55
<b>Figure.III.12:</b> Modélisation d'un SPV sous MATLAB\SIMULINK.....	56
<b>Figure.III.13:</b> Masque des paramètres de la commande PO.....	56
<b>Figure.III.14:</b> Courbe d'un pas de rapport cyclique égal à 0.01.....	57
<b>Figure.III.15:</b> Puissance aux bornes du GPV pour un pas de 0.01.....	58
<b>Figure.III.16:</b> Tension du générateur photovoltaïque pour un pas de 0.01 .....	58
<b>Figure.III.17:</b> Puissance de sortie du système pour un pas de 0.01.....	58
<b>Figure.III.18:</b> Tension de sortie du système pour un pas de 0.01 .....	59
<b>Figure.III.19:</b> Courbe d'un pas de rapport cyclique égal à 0.002. ....	59
<b>Figure.III.20:</b> Courbe de la tension aux bornes du GPV pour un pas de 0.002.....	60
<b>Figure.III.21:</b> Puissance de sortie du système pour un pas de 0.002.....	60
<b>Figure.III.22:</b> Tension à la borne du générateur photovoltaïque pour un pas de 0.002.....	61
<b>Figure.III.23:</b> Tension de sortie du système pour un pas de 0.002.....	61
<b>Figure.III.24:</b> Profile d'un éclaircissement injecté dans le générateur photovoltaïque..	62
<b>Figure.III.25:</b> Courbe du pas d'un rapport cyclique égal à 0.002.....	62
<b>Figure.III.26:</b> Tension aux bornes du générateur photovoltaïque.....	63
<b>Figure.III.27:</b> Puissance de sortie du système.....	63
<b>Figure.III.28:</b> Tension aux bornes du générateur photovoltaïque.....	64
<b>Figure.III.29:</b> Tension de sorti du système.....	64
<b>Figure.III.30:</b> Masque de paramètre de la commande INC.....	65

## LISTE DED FIGURES

---

<b>Figure.III.31:</b> Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.01.....	66
<b>Figure.III.32:</b> Puissance aux bornes du générateur PV pour un pas de 0.01.....	66
<b>Figure.III.33:</b> Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.002.....	67
<b>Figure.III.34:</b> Puissance aux bornes du générateur PV pour un pas de 0.002.....	67
<b>Figure.III.35:</b> Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.002.....	68
<b>Figure.III.36:</b> Puissance aux bornes du générateur PV.....	68
<b>Figure.III.37:</b> Schéma MATLAB SIMULLINK d'un SPV avec la commande floue.....	70
<b>Figure.III.38:</b> Fonction d'appartenance de la logique floue. B. Règles floues.....	71
<b>Figure.III.39:</b> Courbe du rapport cyclique.....	72
<b>Figure.III.40:</b> Puissance de sortie avec la logique floue.....	72
<b>Figure.III.41:</b> Puissance d'entrée avec la logique floue.....	72
<b>Figure.III.42:</b> Tension de sortie avec la logique floue.....	73
<b>Figure.III.43:</b> Tension d'entrée avec la logique floue.....	73
<b>Figure.III.44:</b> Courbe du rapport cyclique pour un ensoleillement variable.....	73
<b>Figure.III.45:</b> Puissance de sorti avec la logique floue.....	74
<b>Figure.III.46:</b> Puissance d'entrée avec la logique floue.....	74

## LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau II.1:</b> Caractéristiques du module BP Solar 340.....	27
<b>Tableau III.1:</b> Tableau de base des règles.....	47
<b>Tableau III.2:</b> Paramètres du convertisseur DC/DC BOOST.....	53
<b>Tableau III.3:</b> Comparaison entre les commandes pour un pas de 0.01.....	69
<b>Tableau III.4:</b> Comparaison entre les commandes pour un pas de 0.002.....	69
<b>Tableau.III.5:</b> Règle d'inférence de la commande par logique floue.....	71

## Lists des symbols

---

PV : Photovoltaïque.

$P_{GPV}$  : La puissance du générateur PV.

MPP : Maximum power point

MPPT : Maximum power point tracking

$P_{PV}$  : Puissance photovoltaïque (kW)

KVL : loi de tension de Kirchhoff

P&O : Perturbation et méthode observation.

InC :Méthode de la conductance incrémentale.

FLC : contrôleur à logique floue.

RN: Réseau neuronal

PID : Proportionnel-Intégral-Dérivé.

P : Puissance caractéristique (W).

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

G : Eclairement (W/m<sup>2</sup>).

G(STD) : Eclairement standard qui correspond à 1000 (W/m<sup>2</sup>).

T : Température réelle de la cellule PV en (K°).

T(STD) : Température standard qui correspond à 298.15 K.

$K_T$ : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température en (A/K).

S : Surface active de la cellule.

$\eta$ : Rendement de conversion.

FF : facteur de forme.

TCT : Total cross tied.

THD : Total harmonic distortion.

BL: Bridge linked .

HC: Honey comb .

$I_{mp}$  : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV.

$I_{CC}$  : Courant de court-circuit (obtenu pour  $V=0$ ).

$V_{CO}$  : Tension en circuit ouvert (obtenue pour  $I=0$ ).

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

I : Le courant généré par la cellule solaire (A).

$I_s$  : Le courant de saturation (A).

## Lists des symbols

---

$I_L$  : Le courant d'inductance du hacheur (A).

$I_{ph}(STD)$  : Photo-courant aux conditions d'éclairement et de température de 1000(W/m<sup>2</sup>) et 25C°.

$I_{pv}$  : Courant délivré par le générateur PV (A).

$I_{sc}$ : le courant de court-circuit de la cellule (A).

$I_{S1}$  : courant de génération-recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espaces.

$I_{S2}$  : courant de diffusion dans les zones neutres.

$I_{opt}$  : Courant optimal (A)

$I_{GPV}$  : Le courant du générateur PV.

$V_{mp}$  : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV.

$V_{PV}$  : La tension de la cellule PV

$I_{PV}$  : Le courant de la cellule PV.

$R_p$ : résistance parallèle.

$R_s$ : résistance série.

$R_{sh}$  : Les résistances shunt ( $\Omega$ ).

$V$  : la tension aux bornes de la cellule (V).

$V_{oc}$  : La tension en circuit ouvert (V)


$V_{opt}$  : Tension optimale(V)

$V_{GPV}$  : La tension du générateur PV.

$n_1$  et  $n_2$  : facteurs d'idéalité de la diode.

$N_S$  : Nombre de cellules PV connectées en série et qui constituent une branche PV.

$N_P$  : Nombre de branches PV connectées en parallèle.



*INTRODUCTION Générale*



*INTRODUCTION Générale*

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

En raison de la demande croissante d'énergie électrique, des prix élevés des combustibles utilisés dans les centrales électriques conventionnelles, ainsi que des préoccupations croissantes quant à leur impact sur l'environnement, les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, suscitent un grand intérêt. Cette dernière est considérée comme une source inépuisable d'énergie verte, largement disponible et nécessitant très peu d'entretien. De plus, l'électricité solaire est en train de s'imposer depuis que les modules photovoltaïques se sont largement répandus et ont un rendement acceptable.

Cependant, le faible rendement de conversion (16-23%), la dépendance aux facteurs environnementaux (radiances et température) ainsi que la non-linéarité de la tension actuelle (I-V) et de la tension (P-V) d'un module PV sont les principaux défis liés à l'utilisation de ce système. Le point de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque ne coïncide pas toujours avec le point de puissance maximale (PPM). Par conséquent, un mécanisme de contrôle est nécessaire pour identifier et suivre la puissance maximale, appelé « suivi du point de puissance maximale » (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en continu.

Le contrôle MPPT est un contrôle essentiel pour le fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Ce principe de commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en lui faisant atteindre la valeur optimale pour atteindre le maximum l'énergie fournie par le panneau photovoltaïque

2) L'objectif global de ce projet de recherche est d'étudier, de modéliser et de simuler des panneaux solaires, en plus des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPP) basées d'intelligence Artificielle qui permettent d'augmenter leur productivité, qui sont conçues, simulées et analysées.

Ce travail se compose de trois chapitres:

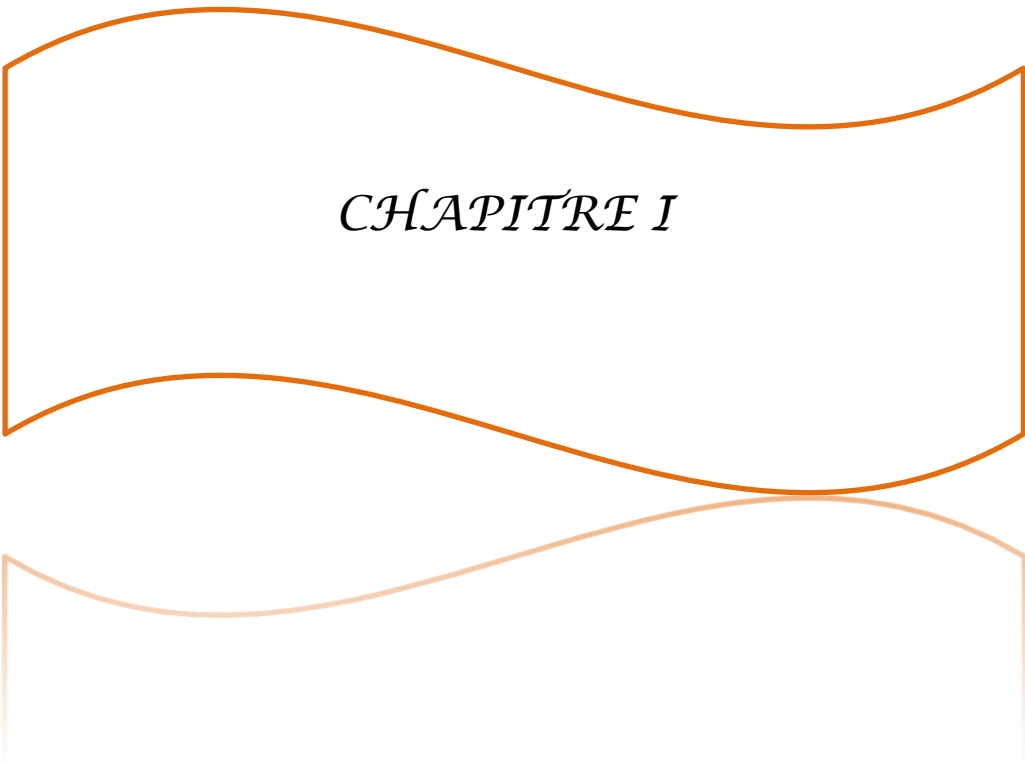
Dans le premier chapitre, nous présenterons un aperçu des systèmes photovoltaïques. En introduisant le générateur photovoltaïque et le principe de conversion photovoltaïque, puis nous avons étudié les effets des changements climatiques sur le module photovoltaïque .

Chapitre deuxième , nous avons modélisé le module photovoltaïque. , nous sommes partis du générateur photovoltaïque "GPV" puis modélisons les cellules photovoltaïques, , puis nous avons étudié le convertisseur DC-DC couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques (boost convertisseur) et ensuite nous étudié la modélisation et le principe de fonctionnement dédié au principe de recherche en PPM.

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Dans le dernier chapitre nous avons présenté de nombreux algorithmes MPPT et nous avons expliqué le principe de chacun d'entre eux ,et nous présenterons les résultats de simulation et enfin nous terminerons notre étude par une conclusion générale qui le résume.



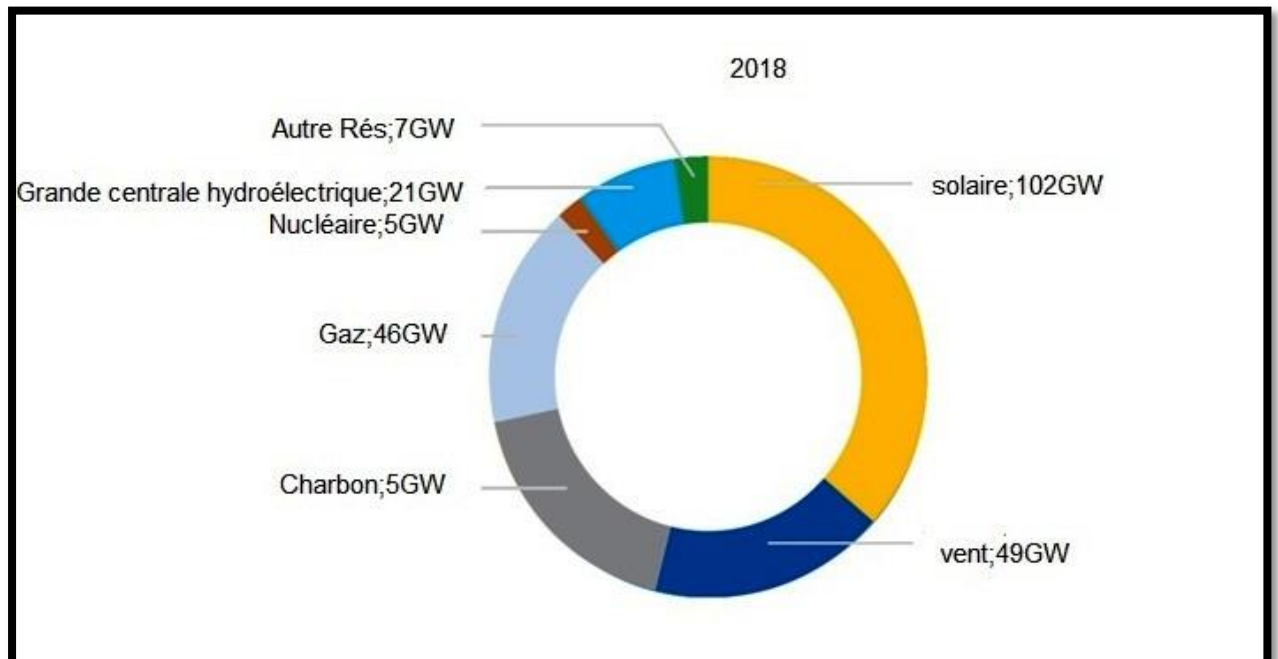
*CHAPITRE I*

## INTRODUCTION

L'énergie photovoltaïque (PV) est une énergie durable pouvant être une énergie alternative aux énergies fossiles. A cet effet, elle est considérée par les chercheurs dans le but de satisfaire les besoins futurs en matière d'énergie. Actuellement, la technologie de fabrication de modules PV est énormément améliorée en termes de qualité et du coût de fabrication .

Ces atouts ont sollicité l'intérêt de la classe politique ainsi que de la communauté scientifique à lancer et financer un nombre important de travaux de recherche dans différents axes afin de promouvoir ce domaine et de créer une nouvelle richesse. Ce développement se concrétise par la réduction du coût de fabrication des modules PV ainsi que les travaux de recherche qui ont permis de promouvoir l'électronique de puissance. Par conséquent, la mise en œuvre des installations PV, plus particulièrement celles de petites puissances raccordées au réseau Basse Tension (BT) sont apparues progressivement. Un grand intérêt est accordé à l'onduleur utilisé dans un système PV connecté au réseau de distribution d'électricité car ses propriétés techniques peuvent influencer la qualité de la production d'énergie électrique et en conséquence la rentabilité financière d'un système PV.

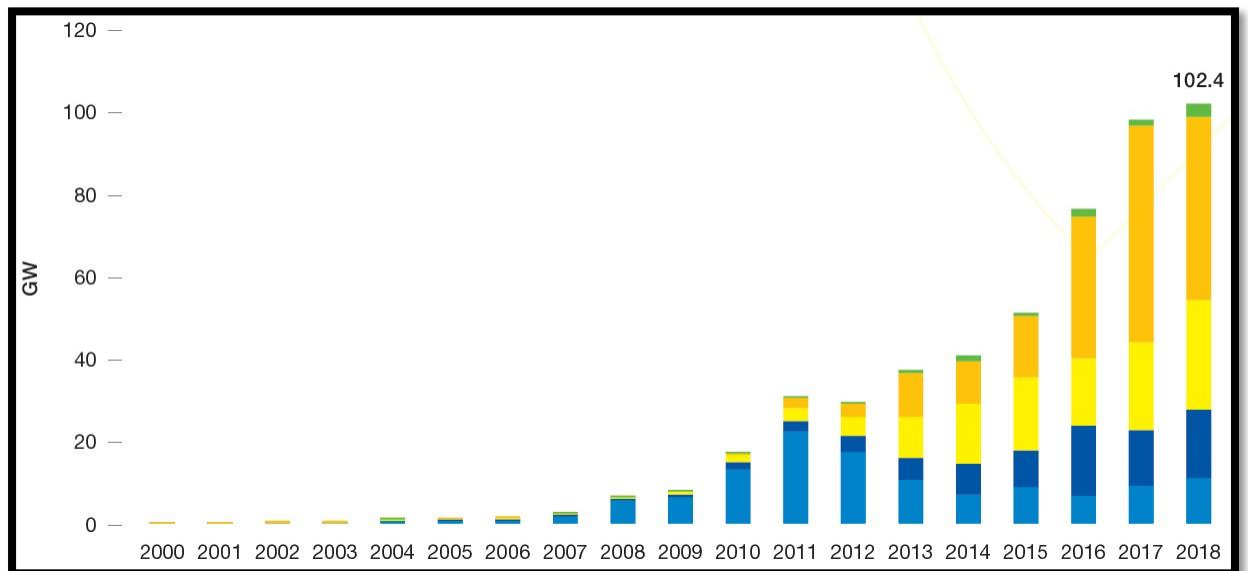
### I.1. Evolution du marché mondial de l'énergie photovoltaïque



**Fig. I.1** Puissance des installations ajoutées par différentes sources d'énergie en 2018

[1].

En 2018, le domaine de l'énergie PV a connu une progression remarquable en termes de capacité d'installations à travers le monde par rapport aux autres types d'énergies (Fig. I.1). Cependant, sa part totale des énergies renouvelables ne représente que 33 % de la puissance mondiale totale en 2017 donc il reste un chemin à faire avant qu'elle ne soit considérée comme une réelle alternative aux énergies fossiles [1].



**Fig. I.2** Evolution de la capacité des installations PV cumulatives installées globales 2000-2018 (MW) [1].

La technologie PV a connu un taux de développement historique, aussi durant les périodes économiques difficiles ce qui fait d'elle une des sources principales de génération d'énergie dans le monde. Le marché solaire PV global est passé de 5 MW en 1982 pour atteindre un record de 102.4 GW en 2018 .

En 2018, la Chine reste le premier mondial en termes d'installations PV cumulées (34 %) suivie des USA (12 %), Japon (11 %) et l'Allemagne (9 %). Plusieurs marchés en dehors de l'Europe n'ont réservé qu'une petite part de leurs potentiels à ce type d'installations. Cependant, l'expérience est à ses débuts dans ce domaine pour la plupart des pays en voie de développement à savoir les pays africains, le moyen orient, le sud-est asiatique et l'Amérique latine [1].

## I.2. Système Photovoltaïque

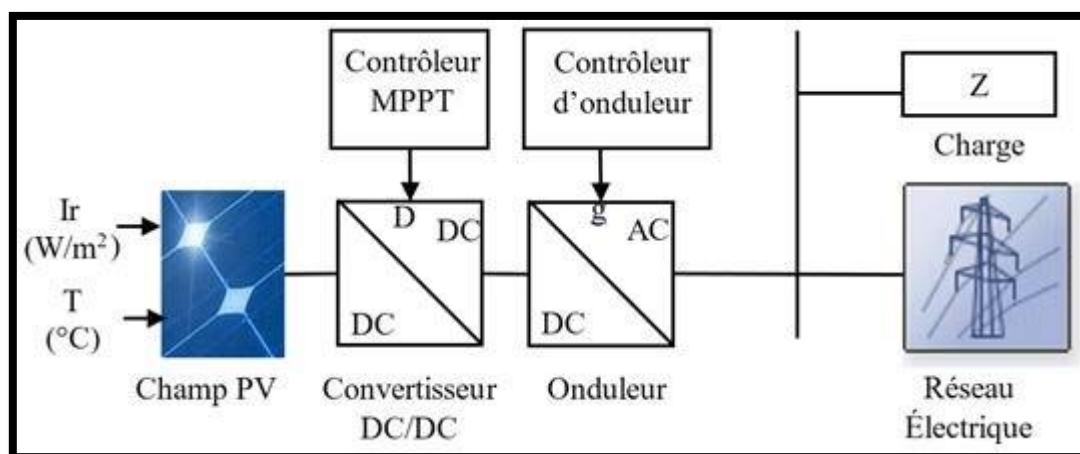
l'installations. Cependant, l'expérience est à ses débuts dans ce domaine pour la plupart des pays en voie de développement à savoir les pays africains, le moyen orient, le sud-est asiatique et l'Amérique latine Le générateur PV est un ensemble

d'équipements connectés pour exploiter l'énergie PV afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les panneaux peuvent être assemblés pour constituer un "champ PV". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement [2].

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement mais à d'autres moments qui nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On dote alors le système de batteries qui permettent de stocker l'électricité et de la rétablir en cas de nécessité.

Un régulateur est alors essentiel pour parer aux problèmes de surcharges ou les décharges profondes de la batterie.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur PV, est converti à l'aide d'un onduleur PV en courant alternatif.



*Fig. I.3* Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau.[2]

## I.2.1 Générateur PV

C'est un dispositif qui transforme l'énergie PV en électricité. Selon la puissance crête désirée, ce générateur PV est constitué d'un certain nombre de modules assemblés entre eux en série ou en parallèle.

### I.2.1.1 Effet photovoltaïque

L'effet PV ou la conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement). Ce phénomène se produit lorsqu'un corps semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, ses atomes réagissent aux photons constituant la lumière. A cet effet, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à se décrocher. Dans les

cellules PV, les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue et faible [3].

L'effet PV constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules PV. Pour avoir une puissance suffisante, les cellules sont interconnectées afin de produire un module PV ou un champ PV.

### I.2.1.2 Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile âgée de 4,5 milliards d'années et elle est distante d'environ 150 millions de kilomètres de la Terre. L'énergie du soleil est issue de réactions thermonucléaires se produisant en permanence dans son noyau [4].

Le soleil représente le centre du système solaire auquel appartient notre planète la Terre. Cette étoile qui nous procure de la chaleur et de la lumière, est une source d'énergie abondante disponible, renouvelable et propre. Le soleil produit une puissance d'environ  $1.7 \cdot 10^{23}$  kW. Une partie de cette puissance alimente la terre, elle est de l'ordre de  $8.5 \cdot 10^{13}$  kW ; Uniquement 70% (environ  $6 \cdot 10^{13}$  kW) de cette puissance pénètre l'atmosphère. Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. La longueur d'onde du rayonnement varie de  $0.22 \mu\text{m}$  à  $10 \mu\text{m}$ . La Fig. I.4 représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement [6][5][7]. Le rayonnement solaire incident à la limite de l'atmosphère est égal à  $342 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . La surface terrestre n'absorbe que  $168 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , ce rayonnement est composé de 60 % de rayonnement direct et 40 % sous forme de rayonnement diffus [1].

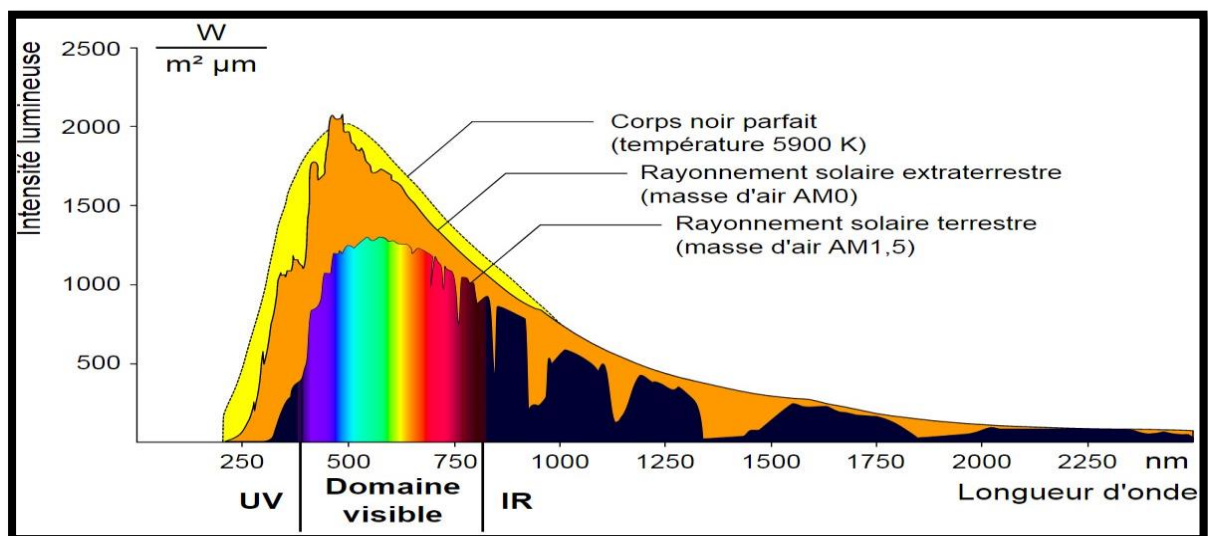


Fig. I.4 Répartition spectrale du rayonnement [4].

### I.2.2 Cellule PV

La cellule PV est fabriquée à base d'un semi-conducteur caractérisé par une bande de conduction et une bande de valence. Comme le montre la Fig. I.5, ces deux bandes sont séparées par une bande appelée bande interdite.

Comme tous les matériaux, un semi-conducteur a son propre niveau de Fermi ( $E_f$ ) qui correspond au potentiel électrochimique ou au travail de sortie des électrons dans le solide.

Le niveau de fermi se situe entre la bande de conduction et une bande de valence. Afin que l'électron puisse passer de la bande de valence à la bande de conduction, il a besoin d'une énergie issue du photon de lumière.

Cette énergie doit être supérieure à l'énergie de transition dite de gap qui lui permet de traverser la bande interdite pour atteindre la bande de conduction. La cellule PV n'absorbe que 25 %, au mieux, de la lumière du soleil. En effet, la lumière du soleil est composée de différentes radiations, et il faut que le rayonnement ait une énergie suffisamment élevée pour arracher les électrons à la cellule PV.

Cependant, si on choisissait un matériau avec un gap plus petit pour pouvoir utiliser plus de photons de la lumière du soleil, on aurait une tension plus petite.

Le gap optimal aurait une valeur de 1,4 eV. De plus, les électrons doivent circuler d'un côté de la cellule à l'autre à travers un circuit externe. On peut donc recouvrir le dessous de la cellule avec un métal très bon conducteur qui doit aussi ne pas subir des phénomènes de corrosion ; mais si on recouvrait le dessus, on bloquerait les photons.

La solution trouvée est de placer une grille métallique sur le dessus de la cellule. Aussi, le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Son rôle est de capter le maximum de soleil. Une couche de verre de quelques millimètres protège la cellule. Le noyau de la cellule est formé de deux : une couche semi-conductrice est dopée négativement (N) l'autre couche est dopée positivement (P). Ces deux couches forment la jonction P-N (Fig. I.6) qui crée un champ électrique. Ce champ électrique crée un photo-courant en séparant les paires d'électrons et de trous qui tendent à se recombiner en créant une énergie thermique. Le champ électrique réduit l'effet négatif de recombinaison des paires de trous et d'électrons mais il ne peut pas l'éliminer car il est dû à la qualité du matériau utilisé qui est symbolisée par le facteur d'idéalité  $n$ . Ainsi, le facteur d'idéalité représente la fréquence de recombinaison du matériau [5][6].

La puissance produite par une cellule PV reste trop faible. Pour atteindre une puissance suffisante, les cellules PV sont interconnectées et forment le module PV.

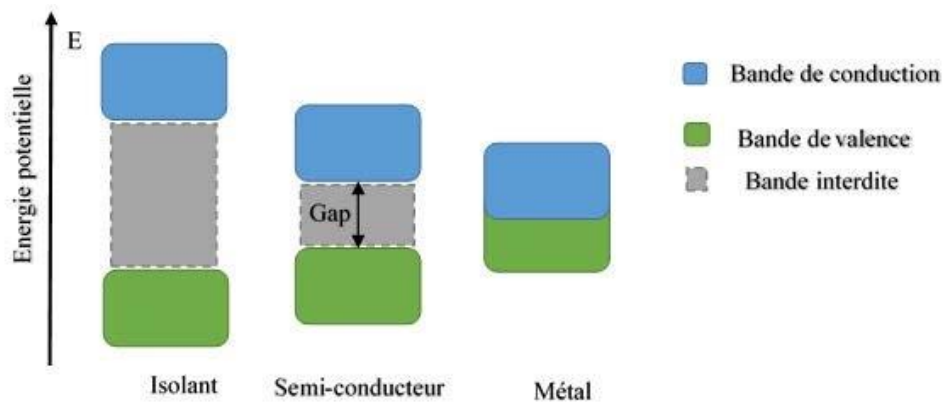


Fig. I.5 Schéma de bandes d'énergies des différents matériaux [5].

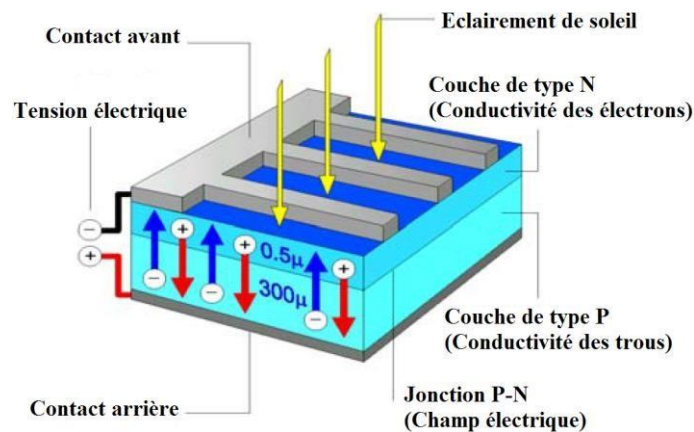


Fig. I.6 Structure d'une cellule PV [6].

### I.2.2.1 Caractéristiques électriques d'une cellule PV

Dans le cas idéal, le courant délivré par la cellule PV [7] s'écrit :

$$I(v) = I_{PV}(v) - I_{obsc}(v) \tag{I.1}$$

- $I_{ph}$  : densité de courant photo-généré .
- $I_{obsc}$  : densité de courant d'obscurité.
- $V$  : la tension de cellule PV.

μ Dans le cas d'obscurité,  $I(v)$  obéit à l'équation du courant de la diode Schottky suivante [7]:

$$I_D(v) = I_s \times \left( e^{\frac{q \times v}{n \times k \times T}} - 1 \right) \tag{I.2}$$

$I_D$  : courant de la diode Schottky.

L'équation (1.1) peut être écrite sous la forme suivante [7]:

$$I(v) = I_{ph} - I_s \times \left( e^{\left( \frac{q \times v}{n \times k \times T} \right)} - 1 \right) \quad (I.3)$$

- $I_s$  : Le courant de saturation de la diode.
- $q$  : La charge élémentaire.
- $k$  : Constante de Boltzmann.
- $T$  : La température.
- $n$  : Le paramètre intrinsèque de l'idéalité de la diode.

### I.2.2.2 Circuit électrique équivalent de la cellule PV

La Fig. I.7 montre le modèle électrique de la cellule PV réelle. Le circuit est constitué de [8]:

- Générateur de courant  $I_{ph}$ , correspondant au courant photo-généré.
- $R_s$  est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et 224 des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point  $V_{oc}$  représente l'inverse de la résistance série ( $1/R_s$ ).
- $R_p$  est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe  $I(V)$  au point  $I_{cc}$  représente l'inverse de la résistance shunt ( $1/R_p$ ).
- Diodes  $D_1$  et  $D_2$ .

D'après la Fig. I.7, nous avons considéré le modèle électrique à deux diodes de la cellule PV donné par :

$$I(v) = I_{PH} - I_{D1} - I_{D2} - \frac{v + I \times R_s}{R_p} \quad (I.4)$$

Le modèle mathématique de schéma électrique de la cellule PV est données par :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \times \left( e^{\left( \frac{q \times (V + I \times R_s)}{n_1 \times k \times T} \right)} - 1 \right) - I_{s2} \times \left( e^{\left( \frac{q \times (V + I \times R_s)}{n_2 \times k \times T} \right)} - 1 \right) - \frac{v + I \times R_s}{R_p} \quad (I.5)$$

Selon les Eq. (I.4)( I.5) la cellule PV est un générateur de photo-courant  $I_{ph}$  dont la valeur dépend uniquement de l'éclairement reçue par la cellule PV.  $I_{ph}$  définit les paires de trous-électron qui traversent la jonction P-N sans recombinaison.  $I_{ph}$  est réduit à cause de la présence des courants :

$I_{s1}$  qui est le courant de saturation de la diode  $D_1$  due à la diffusion (voir partie A de ce chapitre) et  $I_{s2}$  celui de la diode  $D_2$  due aux recombinaisons.  $n_1$  et  $n_2$  sont respectivement les facteurs d'idéalité de  $D_1$  et  $D_2$ . La tension aux bornes de cette cellule est réduite à cause des résistances parasites telles que la résistance série  $R_s$  qui

provoquée aux contacts métalliques et interconnexions. Elle agit de manière peu prononcée sur le courant de court-circuit et peut être déterminée à partir de la courbe I-V en calculant la dérivée de celle-ci aux alentours de  $V_{oc}$ . Pour un meilleur rendement de la cellule PV, il faut que  $R_S$  la faible que possible [9][10]. L'autre type de résistance c'est la résistance parallèle  $R_P$  qui est due aux impuretés proches de la jonction P-N. Ces impuretés engendrent des courants de fuite dans la jonction. Plus  $R_P$  est grande, on obtiendra une cellule PV plus performante[10].

- $I_{ph}$ : courant de photo-génération.
- $I_{S1}$  : courant de génération-recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espaces.
- $I_{S2}$  : courant de diffusion dans les zones neutres.
- $R_P$  : résistance parallèle.
- $R_S$ : résistance série.
- $I_S$  : courant de saturation.
- $n_1$  et  $n_2$  : facteurs d'idéalité de la diode.

Le modèle mathématique de schéma électrique de la cellule PV est donné par :

$$I = I_{ph} - I_{S1} \times \left( e^{\left( \frac{q \times (V + I \times R_S)}{n_1 \times k \times T} \right) - 1} \right) - I_{S2} \times \left( e^{\left( \frac{q \times (V + I \times R_S)}{n_2 \times k \times T} \right) - 1} \right) - \frac{V + I \times R_S}{R_P} \quad (I.5)$$

Le courant  $I_{ph}$  dépend linéairement de l'éclairement et de la température comme le montre l'Eq.(1.6) [9].

$$I_{ph}(T) = \frac{G}{G_{(STD)}} (I_{ph(STD)} + K_I(T - T_{(STD)})) \quad (I.6)$$

- $I_{ph(STD)}$  : Photo-courant aux conditions d'éclairement et de température de  $1000(W/m^2)$  et  $25C^\circ$ .
- $G$  : Eclairement ( $W/m^2$ ).
- $G(STD)$  : Eclairement standard qui correspond à  $1000 (W/m^2)$ .
- $T$  : Température réelle de la cellule PV en ( $K^\circ$ ).
- $T(STD)$  : Température standard qui correspond à  $298.15 K$ .
- $K_I$ : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température en ( $A/K$ ).

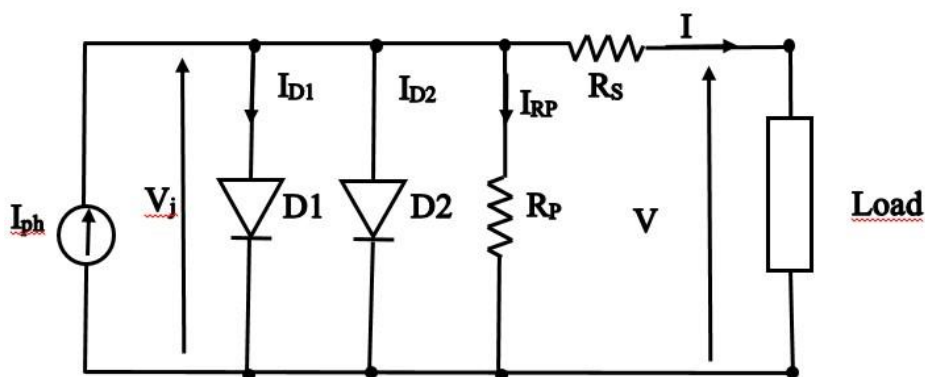


Fig. I.7Circuit électrique équivalent d'une cellule PV.[7]

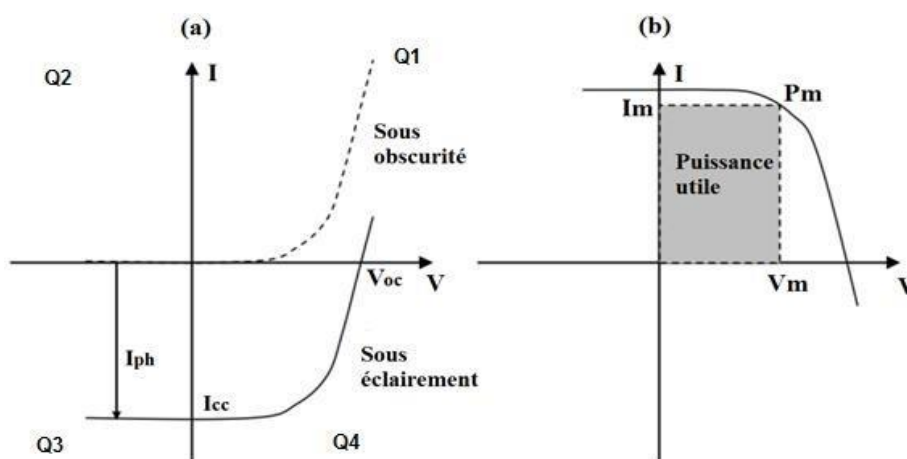


Fig. I.8(a) Caractéristiques I(V) et (b) la représentation classique de courbe I-V d'une cellule PV [7].

La( Fig. I.8.(a)) représente la courbe I-V de la cellule PV dans les quatre quadrants durant l'obscurité et sous un éclairement solaire. Cette cellule, étant électriquement polarisée, se comporte comme une diode. Pour Q<sub>1</sub> & Q<sub>2</sub>, la cellule PV est sans lumière et pour Q<sub>3</sub> & Q<sub>4</sub> la cellule PV est éclairée [5][6]. Dans le cas Q<sub>4</sub>, la cellule étant éclairée, sa jonction P-N est polarisée en inverse et le courant qui circule est celui des porteurs minoritaires. Ce courant est de signe opposé à celui de la tension. On note que la courbe est décalée vers le quadrant Q<sub>4</sub> jusqu' à la valeur de courant de court-circuit (I<sub>cc</sub>) qui est proportionnelle à la quantité maximale de lumière disponible. La tension de circuit ouvert (V<sub>oc</sub>) représente la tension aux bornes de la cellule PV lorsque le courant s'annule [5][6].

La partie intéressante de la caractéristique I-V (Fig. I.8.(b)) est celle qui génère de l'énergie et plus précisément au point P<sub>m</sub> de la puissance est maximale. A ce point, on associe la tension maximale V<sub>m</sub> et le courant maximal I<sub>m</sub> [7].

$$P_m = V_m \times I_m \tag{I.7}$$

On appelle facteur de forme FF (filling factor), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ( $I_m \times V_m$ ) de la cellule sous les conditions de mesures standardisées, et le produit ( $I_{cc} \times V_{co}$ ) où :

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (I.8)$$

Le rendement énergétique de conversion  $\eta$  est défini comme suit :

$$\eta = \frac{P_m}{E \times S} \quad (I.9)$$

- E : Eclairage en  $W/m^2$ .
- S : Surface active de la cellule.
- $I_{CC}$  : Courant de court-circuit (obtenu pour  $V=0$ ).
- $V_{CO}$  : Tension en circuit ouvert (obtenue pour  $I=0$ ).
- $I_{mp}$  : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV.
- $V_{mp}$  : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV.
- $\eta$ : Rendement de conversion.
- FF : facteur de forme.

### I.2.3 Module PV

Une cellule PV seule est souvent peu utilisable, sa faible épaisseur la rend très fragile d'une part, sa tension et son courant très faibles la rendent inutilisable directement dans des applications électriques courantes [10].

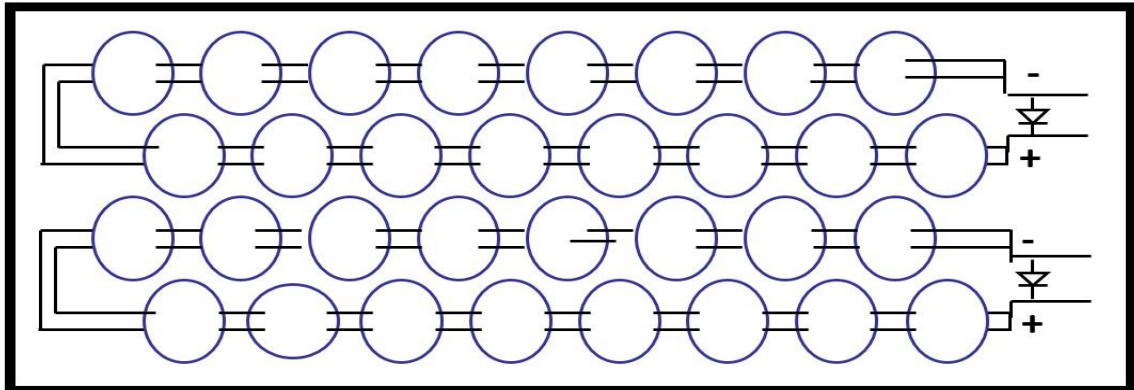
Les tensions de fonctionnement des équipements électriques sont normalisées (12, 24, 48V, etc...) et une seule cellule PV ne permet pas de les alimenter directement. Ainsi, afin d'accroître la puissance disponible et l'énergie produite par des cellules PV, les fabricants assemblent en série et en parallèle les cellules PV pour former un module PV (Fig. I.9).

La tension désirée est atteinte en connectant plusieurs cellules en série ( $N_s$ ). Pour obtenir la puissance désirée, plusieurs de ces séries de cellules peuvent être montées sous forme de branches en parallèle ( $N_p$ ). Ces enchaînements sont ensuite protégés sous un conditionnement conférant à l'ensemble une bonne résistance mécanique et une protection efficace face aux agressions extérieures. Ainsi, la puissance  $P_{GPV}$  fournie à la sortie du générateur PV est donnée par [3]:

$$P_{GPV} = V_{GPV} \times I_{GPV} \quad (I.10)$$

$$P_{GPV} = N_s \times V_{PV} \times N_p \times I_p \quad (I.11)$$

- $P_{GPV}$  : La puissance du générateur PV.
- $V_{GPV}$  : La tension du générateur PV.
- $I_{GPV}$  : Le courant du générateur PV.
- $V_{PV}$  : La tension de la cellule PV
- $I_{PV}$  : Le courant de la cellule PV.
- $N_s$  : Nombre de cellules PV connectées en série et qui constituent une branche PV.
- $N_p$  : Nombre de branches PV connectées en parallèle.



**Fig. I.9** Module PV de  $N_p$  branches parallèles et  $N_s$  cellule en séries.[35]

Pour avoir un important courant  $I_{PV}$  du champ PV, on a la possibilité d'utiliser des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, ou de connecter plusieurs modules PV de paramètres identiques. Ce qui permet d'avoir un fonctionnement optimal du générateur PV .

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale ( $P_{max}$ ). La valeur maximale de cette puissance correspond à la crête de la courbe  $P(V)$  du champ PV.  $P_{max}$  est obtenue à partir des valeurs optimales de la tension ( $V_{mp}$ ) et du courant ( $I_{mp}$ ). Pour réduire les dysfonctionnements, les fabricants ont choisi de ne pas commercialiser des cellules PV seules. Ainsi, les générateurs PV se trouvent souvent sous forme de modules pré-câblés, constitués de plusieurs cellules.

### I.2.3.1 Modèle mathématique d'un module PV

Le modèle mathématique, qui caractérise le panneau PV, est donné par l'équation suivante [11] :

$$I = I_{PV} - I_{s1} \times \left( e^{\left( \frac{q \times (v + N_s \times I \times R_s)}{\alpha_1 \times N_s \times k \times T} \right) - 1} \right) - I_{s2} \times \left( e^{\left( \frac{q \times (v + N_s \times I \times R_s)}{\alpha_2 \times N_s \times k \times T} \right) - 1} \right) - \frac{v + N_s \times I \times R_s}{N_s \times R_p}$$

(I.12)

- $N_s$  : Nombres de cellules PVs raccordées en série.

### I.2.3.2 Influence de l'éclairement et température sur le comportement du module PV

Le comportement du module PV est très sensible aux variations de l'éclairement (E) et de la température (T) car ces variations ont un effet important sur la puissance fournie par le module. La (Fig. I.10.(a)) montre que pour une température constante de 25°C, le courant  $I_{PV}$  et la puissance

$P_{PV}$  varient en fonction de la tension  $V_{PV}$  pour différents valeurs d'éclairements et on constate plusieurs les courbes P(V) qui correspondent aux Points de Puissance Maximale *MPP* ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ). Selon la (Fig. I.10.(a)), le courant de court-circuit  $I_{sc}$  ou  $I_{cc}$  varie proportionnellement à l'éclairement. Par contre, la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  varie très légèrement.

La (Fig.I.10.(b)) montre que si l'éclairement est constant ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) et la température augmente, la tension  $V_{oc}$  diminue par contre le courant  $I_{sc}$  varie peut. Donc le fonctionnement de module PV dépend essentiellement des conditions environnementales auxquelles il est soumis. [12]

A cet effet, il faut prendre en considération ces facteurs afin de dimensionner correctement le générateur PV qui permettra d'obtenir la puissance souhaitée [20]

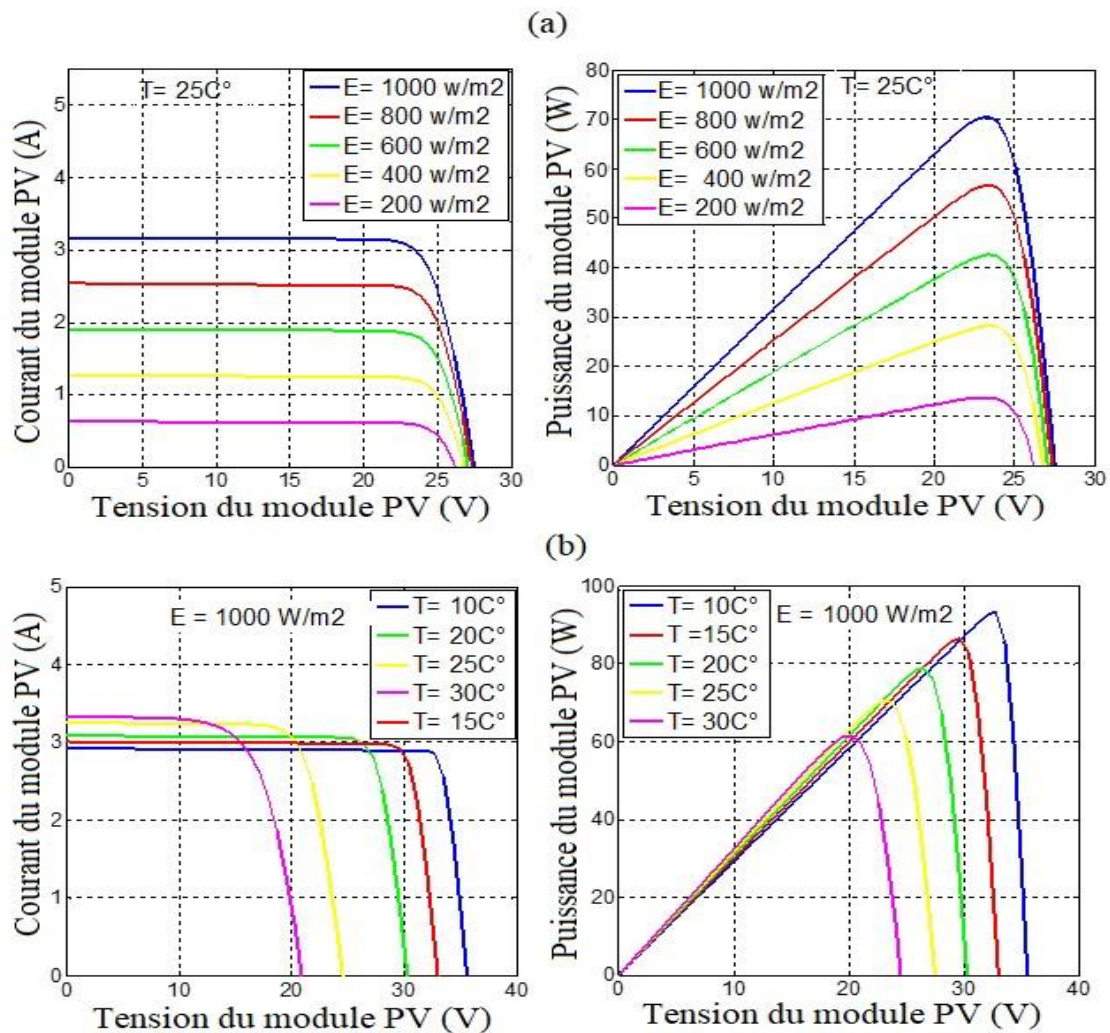


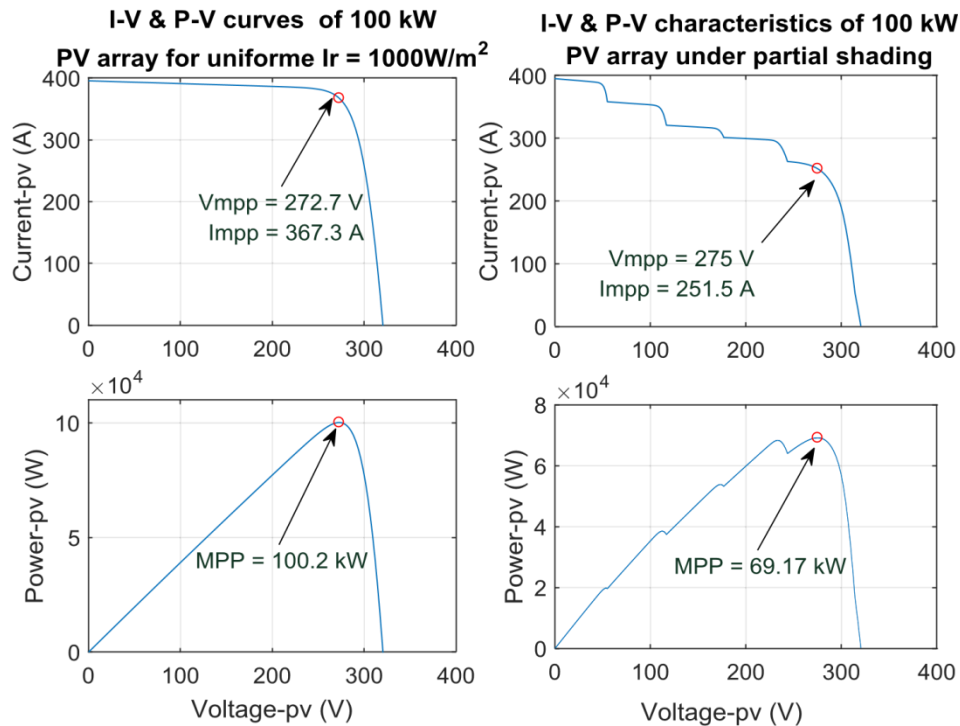
Fig. 1.10.(a,b) Influence de l'éclairement et de la température sur  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$ . [12]

### 1.2.3.3 Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du module PV

L'efficacité de la production l'énergie PV dépend essentiellement des conditions auxquelles est soumis le champ PV à savoir le rayonnement, la température et l'état de la surface de champ PV (salissure, détérioration). Ces facteurs influent directement sur son absorption photonique et affectent par conséquent la productivité des panneaux PV. Le phénomène d'ombrage partiel est un des problèmes qui nuisent au bon fonctionnement d'une centrale PV. L'ombrage partiel est une répartition non uniforme de l'éclairement qui est dû à plusieurs raisons (Fig .I.11). A cet effet, on distingue deux types d'ombrage [5]:

- ✓ Ombrage lointain qui correspond à la disparition du soleil derrière la ligne d'horizon.

- ✓ Ombrage proche qui est souvent dû à des obstacles inévitables tels que : les lignes électriques, les arbres, les bâtiments voisins, la saleté.



**Fig. 1.11** Courbe de I(V) et P(V) d'un générateur PV de 100 kW.[6]

Ce phénomène indésirable affecte l'efficacité de la conversion et l'habilité à extraire le maximum de puissance disponible du champ PV en engendrant de multiples maxima locaux. L'ombrage perturbe aussi le fonctionnement des cellules PV causant ainsi deux problèmes :

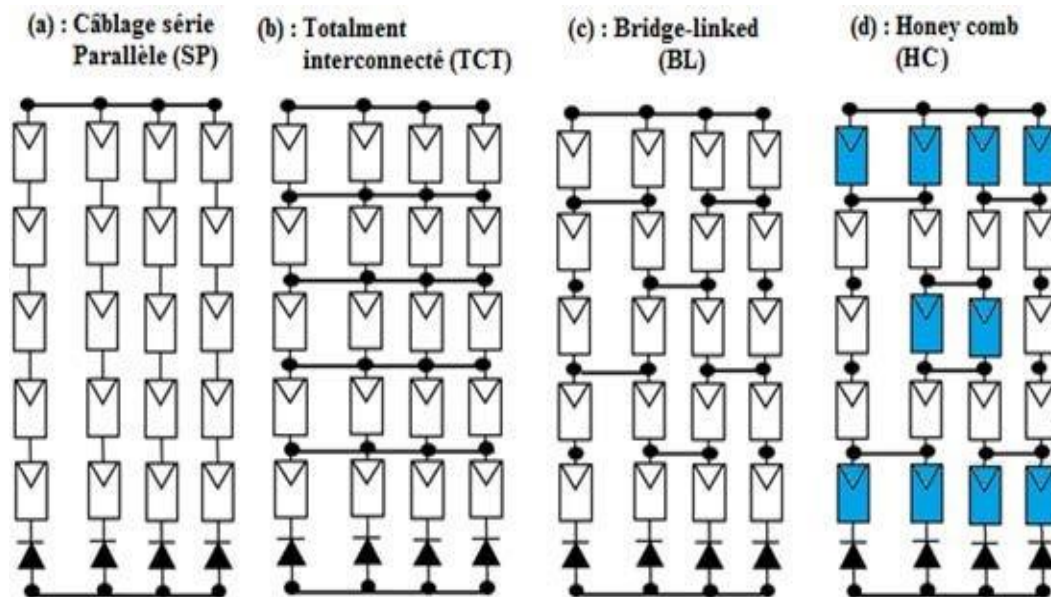
- ✓ Le premier problème c'est celui de mis match qui est dû au fait que le courant total d'un champ PV est limité par le courant du module ombragé (de faible puissance) dans le cas où le courant  $I_{cc}$  du module ombragé est supérieur au  $I_{cc}$  des modules uniformément éclairés.
- ✓ Le second problème est celui du point chaud (hot pot). Ce problème se produit quand le courant  $I_{cc}$  du module ombragé est inférieur au  $I_{cc}$  des modules uniformément éclairés donc le module ombragé se conduit comme un récepteur d'énergie reçu par les autres modules PV. Ceci engendre, en plus de la déformation de la courbe I-V (Fig .I.11), l'échauffement de ce module par dissipation de cette énergie et si le point de fonctionnement du module ombragé atteint la tension de claquage, ce module sera détruit à cause de l'effet de l'avalanche [5][6].

Afin de concevoir un système PV performant, il est important de trouver une tension de fonctionnement optimale pour extraire le maximum de puissance PV, ce qui permet d'augmenter l'efficacité du générateur PV. Cependant, le générateur PV peut être partiellement ombragé comme le montre la (Fig. I.11), ce qui force les modules PV à fonctionner avec plusieurs courants.

D'où l'apparition de plusieurs points de puissances maximales (MPP) locaux. Ce problème affecte la production de l'énergie PV et donc l'efficacité du système PV .

### I.2.3.4 Assemblage des modules PV

L'assemblage des modules PV est une étape primordiale dans la conception de système PV car elle est conditionnée par un ensemble de critères à satisfaire comme la puissance, la tension ainsi que le courant désirés. Elle dépend aussi de l'environnement dans lequel fonctionne ce système avec ses contraintes. A cet effet, plusieurs configurations ont été mise au point suivant les stratégies adoptées telles que : le câblage série-parallèle (SP), total cross tied (TCT), bridge linked (BL) et Honey comb (HC) [13][14].



*Fig. I.12* Configuration de câblage des modules PV.[35]

La (Fig. I.12) montre quelques types de ces configurations [3]. La configuration TCT est obtenue à partir de la configuration SP et ce en connectant tous les nœuds de chaque ligne (Fig. I.12.(b)). Dans la configuration TCT, les tensions de tous les nœuds sont égales ainsi que la somme des courants dans les différentes jonctions sont égales. Selon la (Fig. I.12.(c)), la configuration BL est basée sur la

connexion de chaque quatre modules PV sous forme d'un pont redresseur (bridge rectifier) dans lequel deux modules sont connectés en série, puis en parallèle [13][14][15]. La configuration HC est une amélioration de la configuration du BL . D'après la (Fig .I.12.(d)), la configuration HC est inspirée de la forme hexagonale des cellules de la ruche d'abeille. Les modules PV en bleu sont en parallèle et les autres blocs désignent les modules PV qui sont seuls [15].

### **I.3 Système PV raccordé au réseau électrique**

Un système PV raccordé au réseau électrique a pour rôle principal de contribuer à la production d'électricité issue d'une source renouvelable sur le réseau. L'énergie produite par le générateur PV est directement exploitée par les charges locales de l'installation et l'éventuel excès de production d'électricité est introduit dans le réseau. Le réseau est utilisé en complément à la production PV. Dans ce cas, le réseau est considéré comme une forme de stockage virtuel d'énergie [5].

Cependant, l'insertion des systèmes PV au réseau de distribution peut avoir des effets bidirectionnels indésirables. D'une part, ça peut affecter la variation des flux de puissance, la protection et la qualité de l'énergie. D'une autre part, les caractéristiques et les troubles associés au fonctionnement sur les réseaux de distribution pouvant perturber le bon fonctionnement des systèmes PV comme dans le cas de la déconnexion des systèmes PV causée par un creux de tension et qui provoque une perte importante de production pouvant conduire à un fort déséquilibre production / consommation donc à une panne .

Par conséquent, il est recommandé de prendre en considération, d'une part l'effet de l'ajout des sources PVs au réseau de distribution, d'autre part la réponse dynamique des systèmes PV en régime permanent et sous différentes perturbations. Il est nécessaire de trouver des solutions permettant d'améliorer les performances des onduleurs PV afin d'augmenter leur taux d'intégration au réseau de distribution [16].

#### **I.3.1 Eléments constituant le système PV raccordée au réseau**

Dans le but d'assurer une conversion de l'énergie PV en énergie électrique alternative adaptée au réseau, la centrale PV raccordée au réseau est composée essentiellement des éléments suivants : le module PV, le convertisseur DC/DC , le contrôleur MPPT qui a pour but de ramener le point de fonctionnement de système PV au point de puissance maximale (MPP) [12], l'onduleur PV qui convertit l'énergie

électrique continue en énergie alternative. Il peut être de type monophasé ou triphasé.

Parmi les fonctions qu'accomplit l'onduleur, on cite les suivantes :

- ✓ Assurer une parfaite synchronisation avec le réseau.
- ✓ Adapter la tension de sortie à la valeur maximale admissible pour le réseau.
- ✓ Minimiser le déphasage.
- ✓ Réduire le taux de fréquences harmoniques afin d'avoir un signal de sortie presque sinusoïdale.
- ✓ Diminuer les perturbations électromagnétiques.
- ✓ Garantir le rendement élevé de la puissance transférée au réseau.

## **CONCLUSION**

Dans ce chapitre, on a vu l'importance du générateur PV dans la production de l'énergie. On a passé en revue ses caractéristiques et les différentes technologies de productions de la cellule PV.

Un aperçu est donné sur l'influence de la température, de l'ensoleillement et de l'ombrage partiel sur le rendement du générateur PV. On a mis l'accent sur les systèmes connectés au réseau électrique car ce travail propose d'améliorer les performances d'un système PV connecté au réseau BT.



*CHAPITRE II*



*CHAPITRE II*

---

## INTRODUCTION

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont de plus en plus utilisés dans les technologies de l'énergie électrique. Les principaux inconvénients des systèmes PV sont le coût de fabrication élevé et le faible rendement de conversion d'énergie, qui sont en partie dus à leurs caractéristiques  $V-I$  et  $P-I$  non linéaires et dépendantes de la température. Pour pallier ces inconvénients, trois approches essentielles peuvent être suivies :

- 1) Améliorer les processus de fabrication des panneaux solaires : de nombreux efforts de recherche ont été réalisés en ce qui concerne les matériaux et la fabrication des panneaux photovoltaïques.
- 2) Contrôle de l'entrée d'isolation des panneaux photovoltaïques : l'énergie solaire d'entrée est maximisée à l'aide de capteurs solaires à suivi du soleil ou en réorganisant les configurations de cellules solaires des panneaux photovoltaïques en fonction des changements des conditions environnementales .
- 3) Utilisation du suivi du point de puissance maximale (MPPT).

Une modification de l'irradiation solaire ou de la température entraîne un déplacement du MPP sur une large plage. Les conditions d'ombrage instantanées et le vieillissement des cellules PV affectent également le locus MPP. De plus, les caractéristiques électriques de la charge peuvent également varier .

Comme mentionné précédemment, le MPPT est la technique qui garantit que le panneau PV, quel que soit le changement des conditions d'éclairement et de température des cellules, donne la puissance maximale disponible. En d'autres termes, il est nécessaire de suivre le MPP pour maximiser la puissance tirée du panneau PV dans toutes les circonstances susceptibles d'entraîner une perte de régulation du système .

### II.1 Générateur photovoltaïque « GPV »

C'est un dispositif qui transforme l'énergie PV en électricité. Selon la puissance crête désirée, ce générateur PV est constitué d'un certain nombre de modules assemblés entre eux en série ou en parallèle.

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont

habituellement branchés en série-parallel pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de module.

Ainsi la caractéristique I-V du générateur PV est basé sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent bien connu de la figure 1 [17]. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série  $R_s$  et parallèle (shunt)  $R_{sh}$  pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

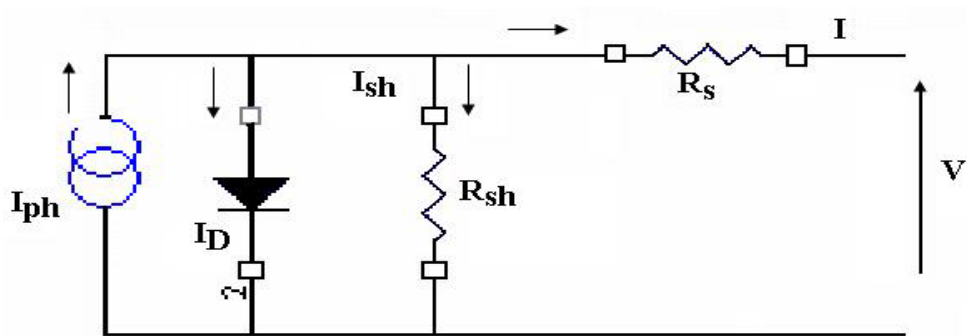


Fig.II.1 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.[17]

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance parallèle rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si cette pénétration est profonde). Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [17][18].

L'équation reliant le courant délivré par un module PV constitué par la mise en série de  $N_s$  cellules et la tension à ses bornes est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{V+I.R_s}{V_T}} \right) - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Où:  $I_{ph}$ ,  $I_0$  et  $V_T = \frac{N_s \cdot n \cdot k \cdot T}{q}$  désignent respectivement le photo-courant, le courant de saturation inverse de la diode et la tension thermique, avec:  $n$  le facteur d'idéalité de la diode,  $q$  la charge de l'électron,  $k$  la constante de Boltzman,  $T$  la température de la cellule qui varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante, selon la relation linéaire [17]

$$T - T_a = \left( \frac{T_{fn} - 20}{800} \right) \cdot \Psi(w/m^2) \quad (2)$$

Où  $T_{fn}$  est la température de fonctionnement normale des cellules PV ( $^{\circ}\text{C}$ ) dans les conditions suivantes: un ensoleillement de  $800 \text{ W/m}^2$ , une température ambiante de  $20^{\circ}\text{C}$  et une masse d'air optique AM égale à 1,5. La valeur de  $T_{fn}$  est généralement donnée par le constructeur,  $T_a$  est la température ambiante, et  $\Psi(\text{W/m}^2)$  est l'irradiation solaire globale du lieu considéré et reçue par le module PV.

A partir de cette équation, une méthodologie simple a été développée pour la détermination des caractéristiques d'une cellule ou d'un panneau photovoltaïque. On introduit les deux paramètres externes de la cellule (facilement mesurables), tels que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , pour en déduire l'expression mathématique implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque, ainsi que sa caractéristique I-V.

Le courant de court-circuit est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur est nulle. Son expression approchée est donnée par :

$$I_{CC} = \frac{I_{ph}}{1 - R_s/R_{sh}} \quad (3)$$

A des niveaux d'éclairement usuels, le photo-courant est proportionnel à l'irradiation solaire ou au flux lumineux  $\Psi$  ( $\text{W/m}^2$ ). Dans le cas idéal, il correspond au courant de court-circuit qui peut alors simplement s'écrire [17]:

$$I_{CC} = I_{CC0} \left( \frac{\Psi}{1000} \right) \quad (4)$$

où  $I_{CC0}$  est le courant de court-circuit pour une irradiation solaire standard de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

La tension de circuit ouvert est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nul, c'est la tension maximale de la cellule. Dans le cas idéal, elle est légèrement inférieure à:

$$V_{CO} = V_T \cdot \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0 + 1} \right) \quad (5)$$

En utilisant les équations (3) à (5) l'équation (1) devient :

$$I = I_{CC} \cdot \left[ \alpha - \beta \left( e^{y(V - V_{CO} + R_s I)} \right) \right] - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

Avec  $\alpha = \Psi / 1000$ ,  $\beta = 1 + (R_s / R_{sh})$  et  $y = 1 / VT$ .

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules photovoltaïques. En se basant sur le modèle donné par Sukamongkol *et al*, on peut l'intégrer dans l'équation (6):

$$I = I_{CC} \cdot \left[ \alpha - \beta \left( e^{y(V - V_{CO} + R_s I)} \right) \right] + \lambda(T - T_{ref}) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

Où  $\lambda$  est un coefficient caractérisant la variation de puissance en fonction de la température et  $T_{ref}$  est la température du module dans les conditions standards.

Pour un système PV fonctionnant en mode de tension fixe, la tension aux bornes du champ de modules est identique à la tension de fonctionnement du système, c'est-à-dire celle des batteries. L'équation de la caractéristique relative à un champ de modules formé par la mise en série de  $M_s$  modules et de  $M_p$  modules est extrapolée de celle d'un module, et elle est donnée par [17]:

$$I_G = I_{CC} \cdot M_p \left[ \alpha - \beta \left( e^{\frac{y}{M_p} (M_s (V - V_{c0}) + \frac{R_s R_s I}{M_p})} \right) \right] - \left( \frac{M_s \cdot V + \frac{M_s R_s I}{M_p}}{\frac{R_{sh} \cdot M_s}{M_p}} \right) \quad (8)$$

Cette relation n'est valable que si tous les modules, constituant le générateur PV, sont identiques et reçoivent la même irradiation (ayant la même caractéristique I-V).

## II.2 Modélisation des cellules photovoltaïque

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

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

On présentera deux modèles du GPV à savoir [19] :

- Modèle à une diode (ou exponentielle simple).
- Modèle à deux diodes (ou double exponentielle).

Tous les deux sont basés sur l'équation de diode bien connue de Shockley.



**Fig.II.2** Module BP Solar340.[19]

Le tableau II.1 donne les caractéristiques du module BP Solar 340 sous les conditions standards (1000 W/m<sup>2</sup>, masse optique: AM 1.5, Température de cellule: 25 °C).

Grandeurs	Valeur
Puissance nominale	40 W
Tension au MPP ( $V_{mp}$ )	16,50 V
Courant au MPP ( $I_{mp}$ )	2,42 A
Courant de court-circuit ( $I_{CC}$ )	2.60 A
Tension de circuit ouvert ( $V_{Co}$ )	20.00 V
Coefficient du rendement $\epsilon$ de la température	0.0049 %
Facteur de forme (FF)	0.771
Nombre de cellules en série ( $N_s$ )	36
Nombre de cellules en parallèle ( $N_p$ )	2
Coefficient de sensibilité de la tension à la température $\mu_{Co}$	-0.09 V/K
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température $\mu_{CC}$	+0,0065 A/K

**Tableau.II.1** Caractéristiques du module BP Solar 340.[19]

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit :

- Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) qui fournit chaque cellule est :

$$I_{cc(\text{cellule})} = \frac{I_{CC}}{N_p} \quad (9)$$

- La tension du circuit ouvert ( $V_{Co}$ ) de chaque cellule est:

$$V_{co(cellule)} = \frac{V_{co}}{N_s} \quad (10)$$

- Le courant maximal de chaque cellule est :

$$I_{mp(cellule)} = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (11)$$

- La tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp(cellule)} = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (12)$$

- La puissance maximale de chaque cellule est:

$$P_{max(cellule)} = I_{mp(cellule)} \cdot V_{mp(cellule)} \quad (13)$$

- La résistance série de chaque cellule est :

$$R_{s(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} R_{s(modele)} \quad (14)$$

- La résistance shunt de chaque cellule est :

$$R_{sh(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} R_{sh(modele)} \quad (15)$$

## II.3 Convertisseur DC-DC

### II.3.1 Définition

Un convertisseur statique est un dispositif, à base de semi-conducteurs, qui transforme de l'énergie électrique disponible, en une forme appropriée pour alimenter une charge.

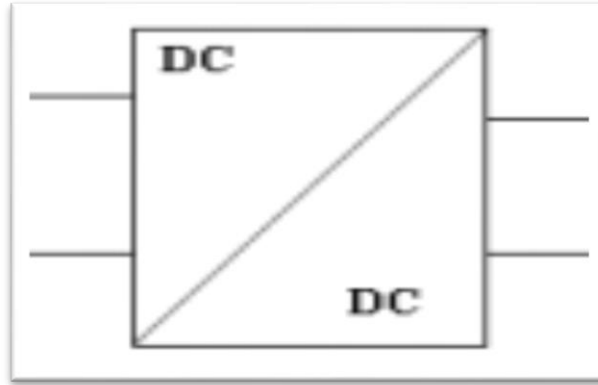
Les convertisseurs statiques sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique.[20]

On distingue deux types de sources de tension :

- Sources de tension continues caractérisées par la valeur  $V$  de la tension.
- Sources de tension alternatives définies par les valeurs de la tension efficace  $V_{eff}$  et de la fréquence  $f$ .

Ce fonctionnement de convertisseur est réalisé par des moyens purement électroniques (semi-conducteurs), et permet :

- Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique.
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.
- Une réduction des masses et des volumes, mais aussi du bruit.



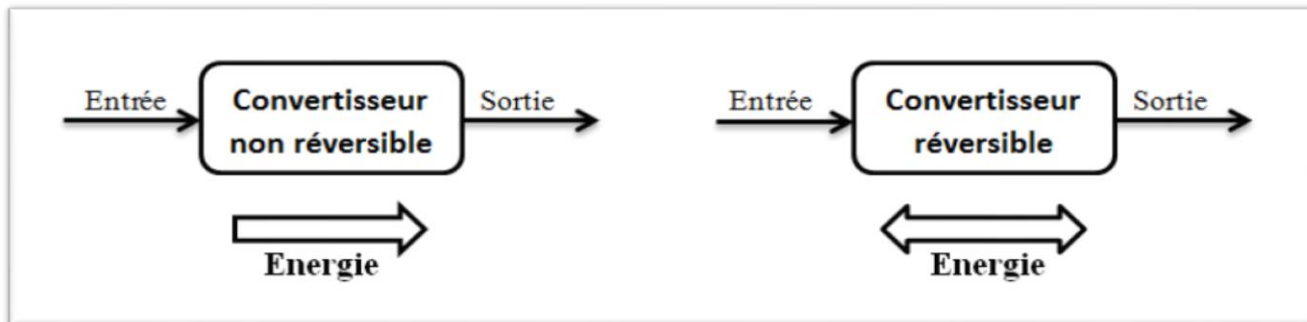
*Fig.II.3* Symbole d'un convertisseur DC-DC.[20]

### II.3.2 Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques

L'énergie électrique est disponible soit sous forme alternative (réseau de distribution électrique, alternateurs) soit sous forme continue (batterie d'accumulateurs, génératrice à courant continu, cellules photovoltaïques, pile à combustible, ...).

La charge peut nécessiter une alimentation en alternatif ou en continu. Il existe donc quatre fonctions de base des convertisseurs statiques. Ces convertisseurs transforment directement l'énergie électrique, sont appelés mono-étages.

Un convertisseur statique est dit réversible lorsque l'énergie, peut transiter (en général, être contrôlée) de manière bidirectionnelle, c'est à dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Les notions d'entrée et de sortie ne sont alors plus évidentes. Un convertisseur non réversible transfère l'énergie d'une source vers une charge utilisatrice. (Fig II.2). [21]



*Fig.II.4* Réversibilité (et non réversibilité) des convertisseurs statiques.[21]

### II.3.3 Les types des convertisseurs de tension DC/DC « HACHEUR »

Elles permettent d'abaisser, élever et inverser une tension continue avec de très faibles pertes (Fig.II.3). Par conséquent ils ont un très bon rendement, peu d'énergie à dissiper par le transistor. [22]

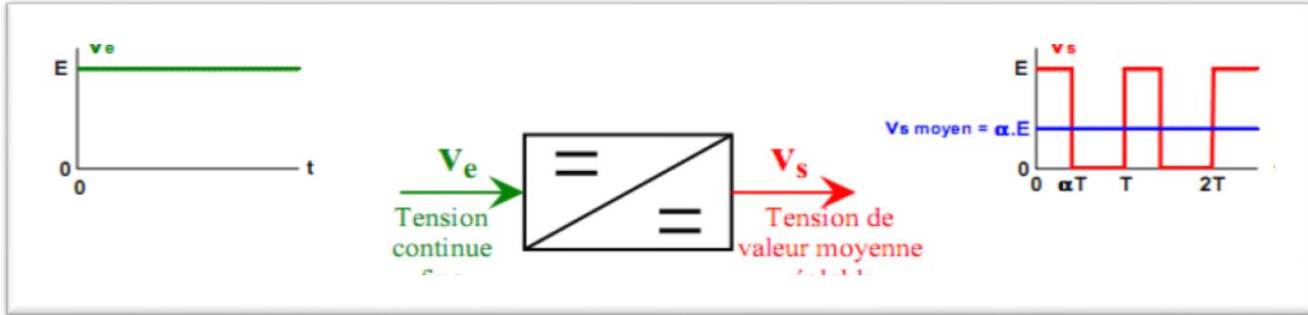


Fig.II.5 Symbole et signaux du convertisseur.[22]

**II.3.3.1 Convertisseur élévateur « BOOST »**

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant-continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). Connue aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la (Fig.II.4).

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [23]

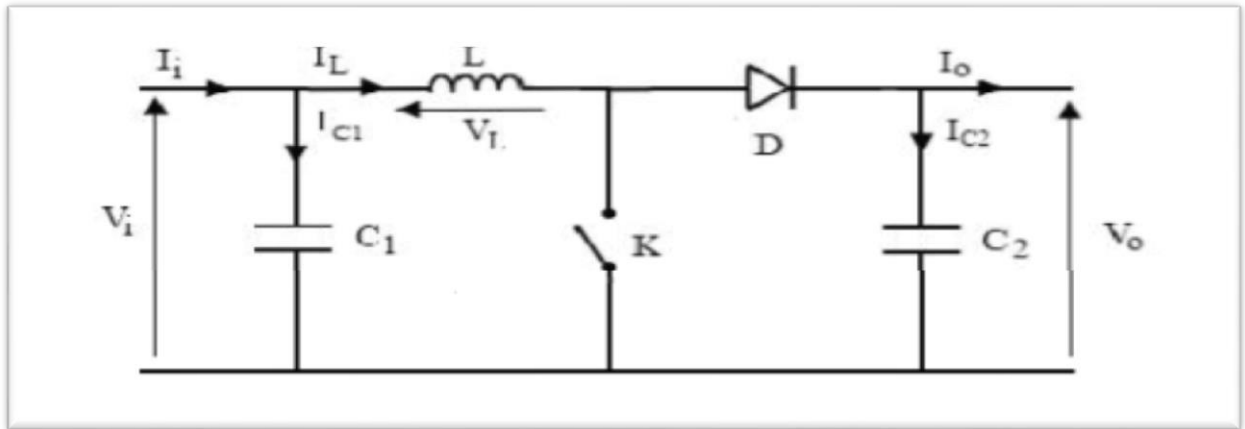


Fig.II.6 Schéma de convertisseur élévateur « Boost ».[23]

**a. Principe de fonctionnement**

Lorsque l'interrupteur 'K' est fermé, l'inductance se charge et le courant  $i(t)$ , provenant du module solaire, augmente progressivement et ce durant  $t \in [0, dTs]$ . Quand 'K' s'ouvre, la rupture du courant provoque une surtension d'où l'utilité de la diode qui protège K en empêchant le retour du courant.

Le condensateur sert à lisser la tension de sortie. L'inductance L libère une énergie qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge via la diode D durant  $t \in [dT_s, T_s]$ . Le rapport de conversion  $M(d)$  est donc écrit sous la forme suivante: [23].

$$M(d) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{d} = \frac{1}{1-d}$$

En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :

$$V_0(1-d) = V_i$$

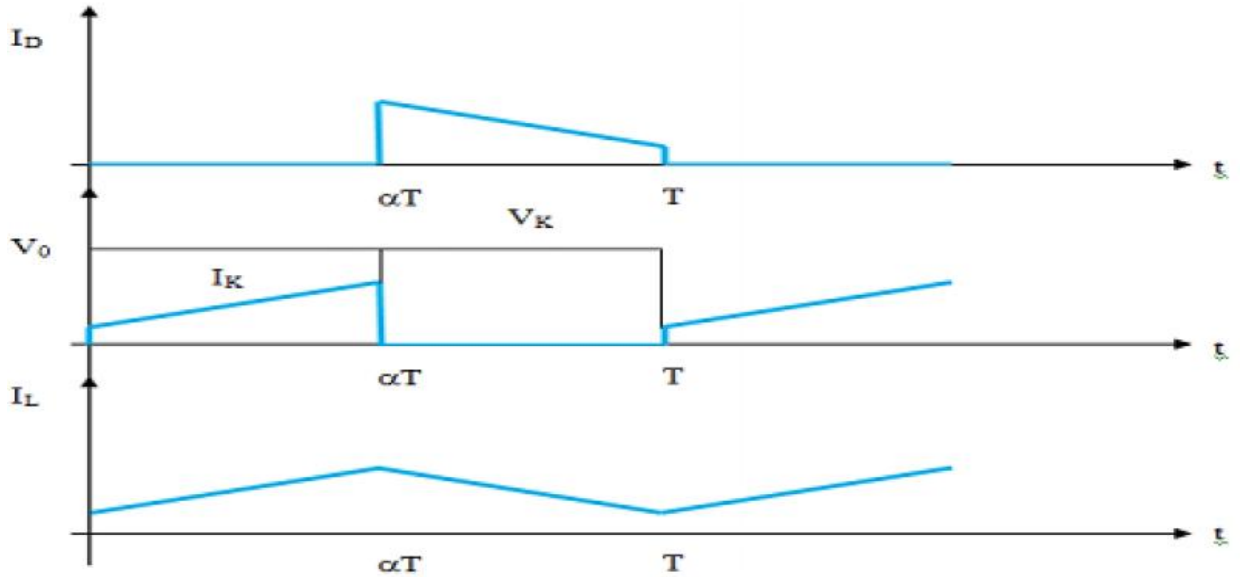


Fig.II.7 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.[23]

**b. Modèle mathématique équivalent:**

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la (Fig.II.6) présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d d'entre  $[0, \alpha T_e]$ . [23]

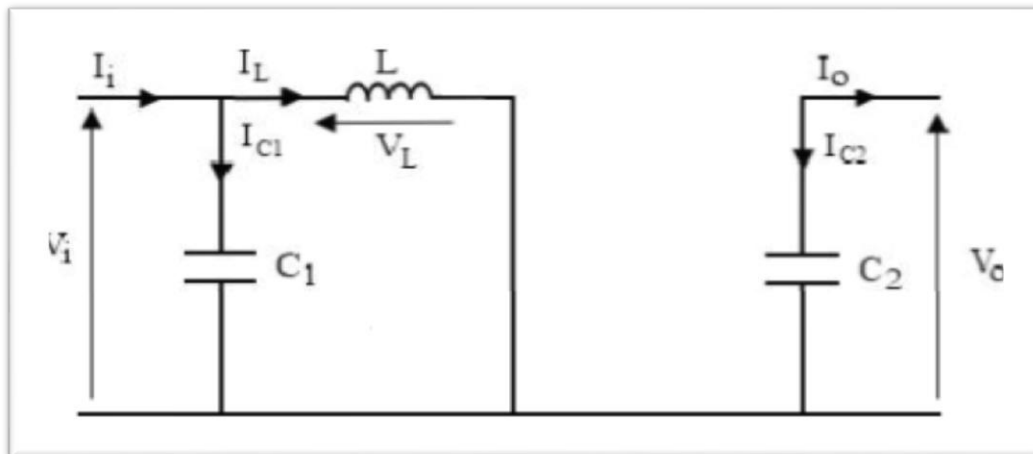


Fig.II.8 Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.[23]

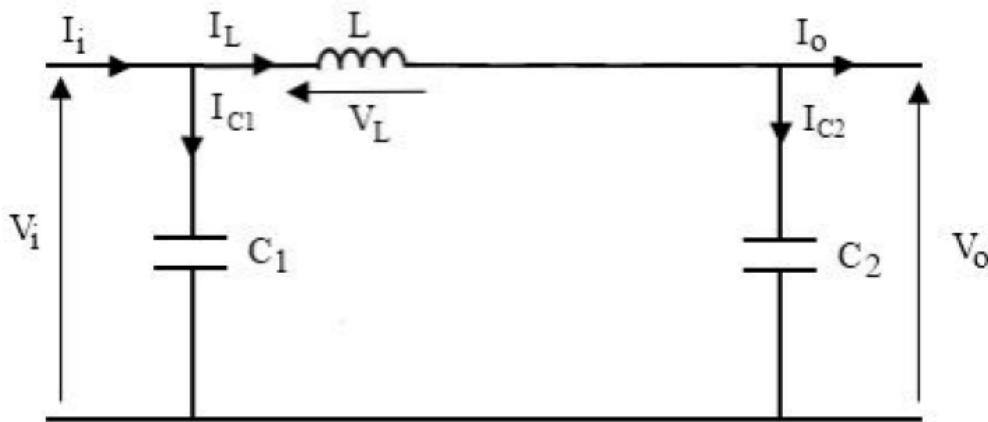
L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les équations suivantes :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t)$$

L'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:



*Fig.II.9* Schéma électrique boost ouvert.[23]

D'après la loi de Kirchhoff :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t)$$

$$I_L(t) = C_1 \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t)$$

### II.3.3.2 Convertisseur abaisseur « BUCK »

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K (Fig.II.8) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

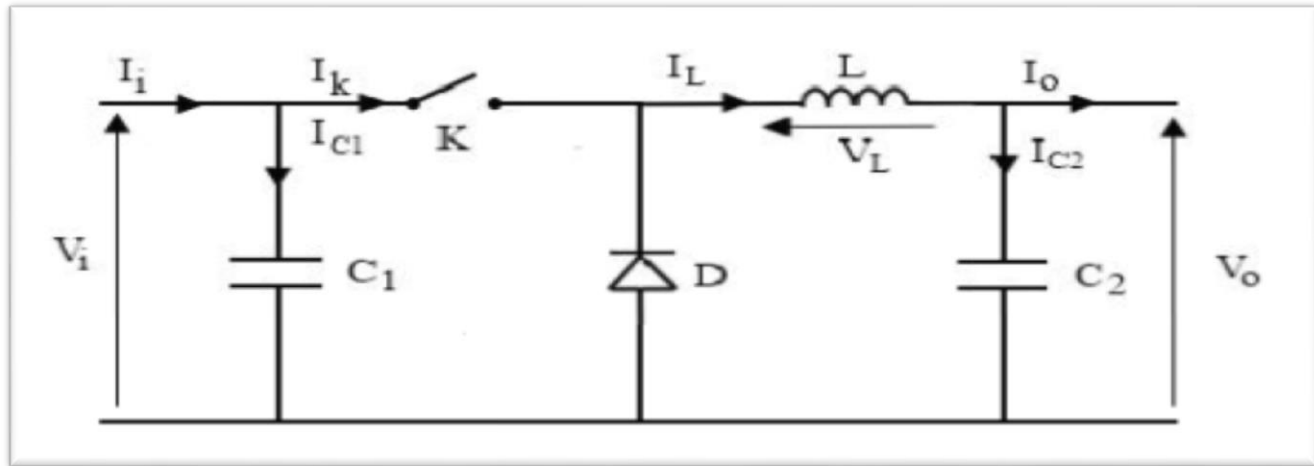


Fig.II.10 Schéma électrique d'un convertisseur buck.[24]

**a. Principe de fonctionnement**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée  $\alpha T_e$ , la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage. La source  $V_i$  fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps  $t_e$  [ $\alpha T_e, T_e$ ] l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [24].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la (Fig.II.9) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [25] :

$$V_0 = \alpha V_i$$

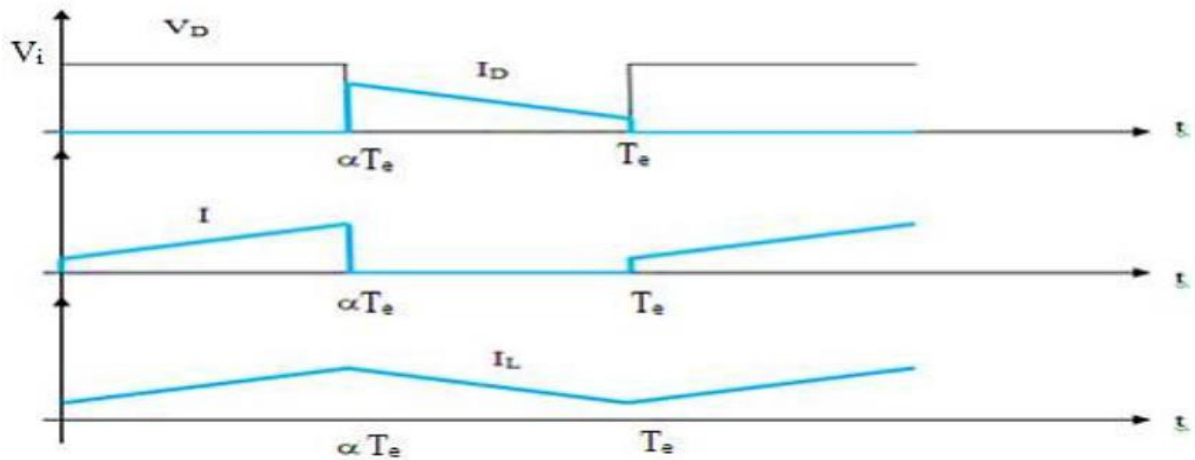
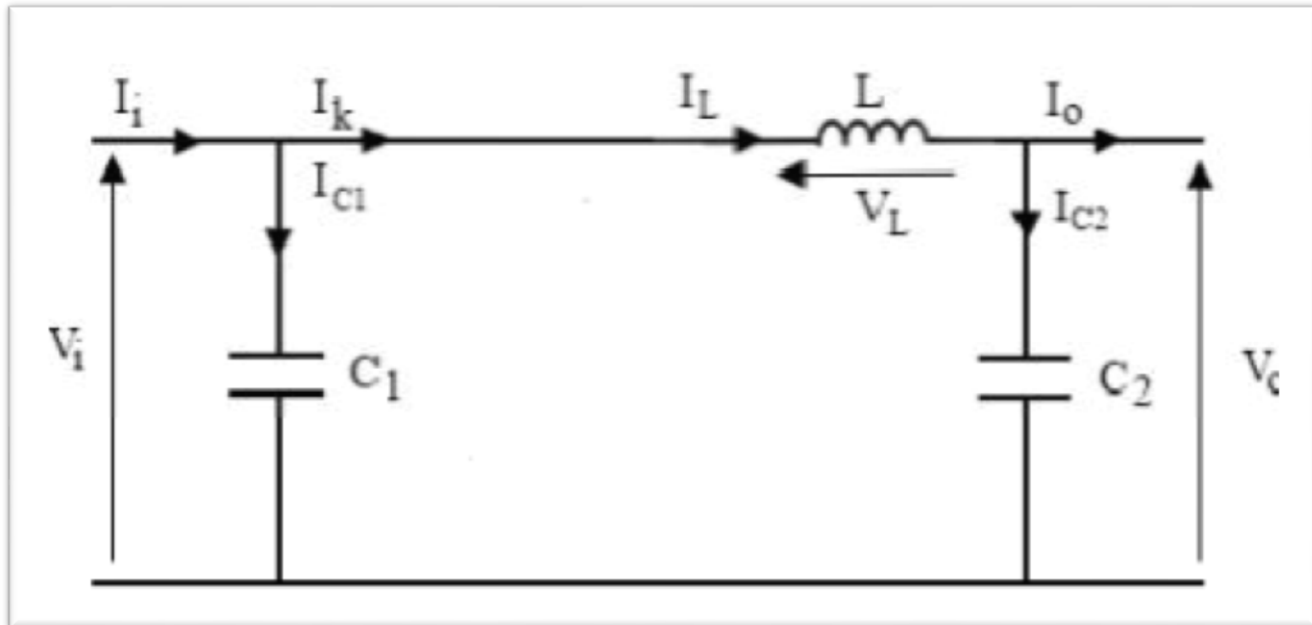


Fig.II.11 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck.[25]

**b. Modèle mathématique équivalent :**

Comme pour le hacheur boost nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (Fig.II.10) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que (Fig.II.11) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant  $(1-\alpha) T_e$  [26].



*Fig.II.12* Schéma électrique d'un hacheur buck fermé. [26]

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes:

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_i(t) - I_o(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = I_i(t) - V_o(t)$$

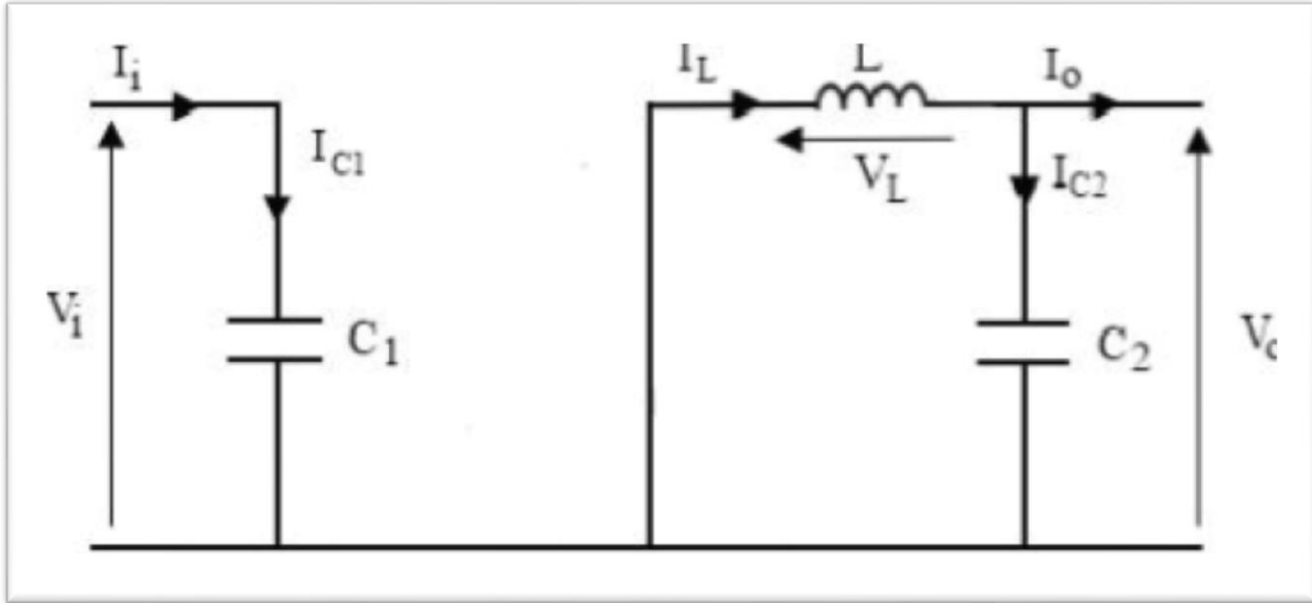


Fig.II.13 Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.[26]

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t)$$

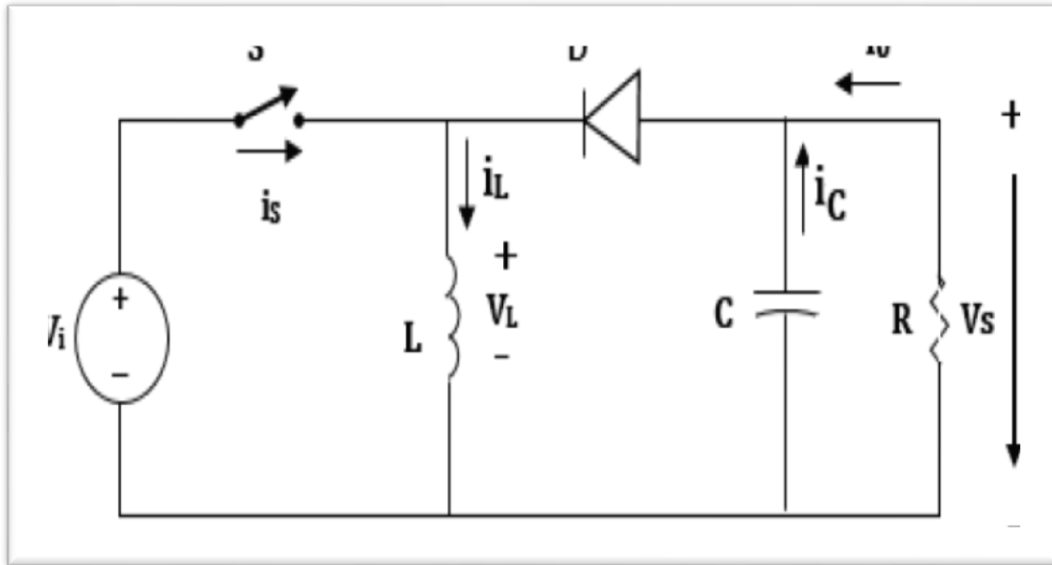
$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_0(t)$$

### II.3.3.3 Convertisseur inverseur « BUCK - BOOST »

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la (Fig.II.12). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (*on*) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (*off*), la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donné comme suit [27]:

$$V_s = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot V_i$$

Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge sont données par la (Fig.II.13).

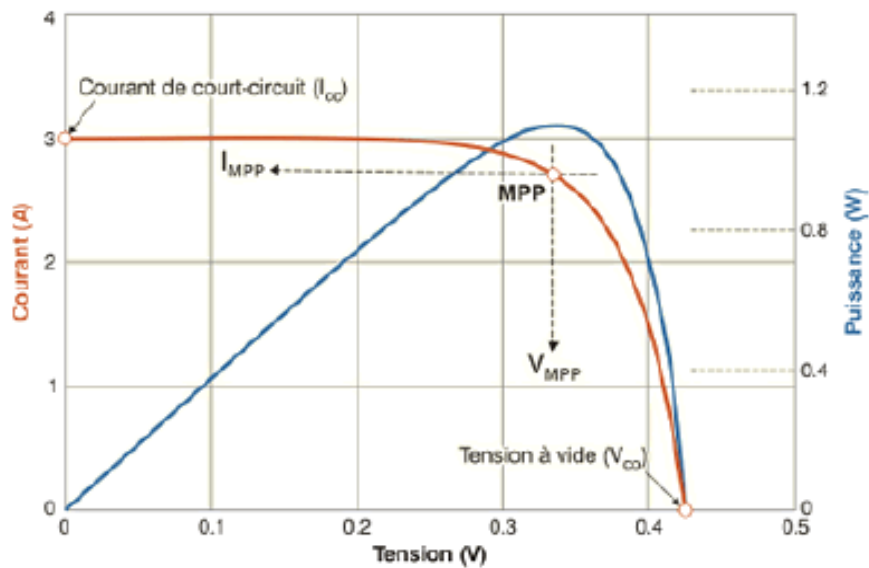


*Fig.II.14* schéma électrique d'un convertisseur buck-boost.[27]

## II.4 Commandes de poursuite du point de puissance maximale MPPT

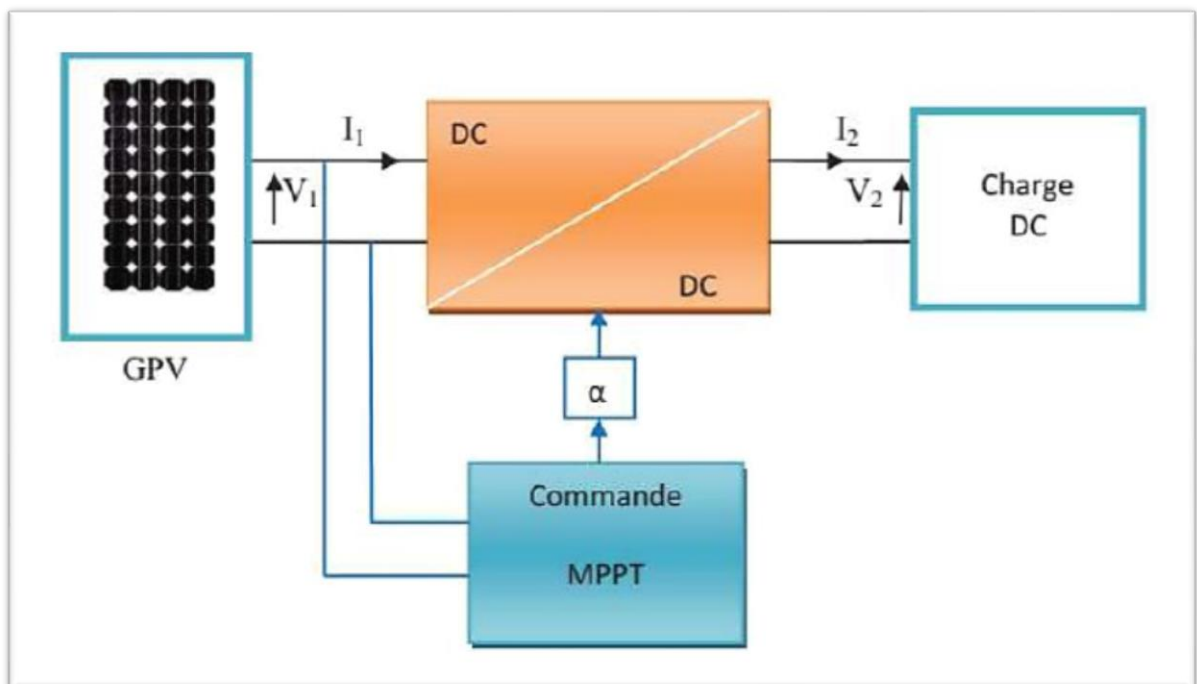
### II.4.1 Principe du MPPT

Le suiveur de point de puissance maximum (MPPT) permet au module photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance maximale. Le principe des commandes de (MPPT) est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance prélevée sur le panneau solaire. Le point de puissance maximale (MPP) est généralement contrôlé par deux variables de contrôle. La tension ou la puissance, mesurée à chaque fois est utilisée à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module solaire est au point de puissance maximale.



**Fig.II.15** Courbe caractéristique de puissance d'un GPV.[28]

L'association d'un convertisseur statique DC / DC, comme illustré à la (Fig.II.16), modifie le point de fonctionnement du panneau à l'aide d'une commande externe afin de maximiser l'énergie transférée de manière permanente. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.



**Fig.II.16** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.[28]

---

## II.5 Classification des MPPT

Il est possible de classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles exécutent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [28].

### II.5.1 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

#### a. Méthodes indirectes :

Dans les méthodes indirectes, les bases de données regroupant les valeurs physiques du panneau PV sont généralement utilisées pour générer les signaux de contrôle dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement). Ces méthodes, utilisées uniquement pour les systèmes PV sont la méthode de tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ), la méthode du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), ainsi que la méthode MPPT basée sur l'intelligence artificielle (IA).

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis, devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [28].

#### b. Méthode directe :


Les valeurs instantanées de la tension ou du courant de sortie PV sont généralement utilisées pour générer les signaux de commande et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du PV. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée.

## CONCLUSION

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, MPPT est un processus important pour le système PV pour fournir une puissance maximale à la charge et également pour augmenter l'efficacité. Un convertisseur DC-DC est inclus dans le système entre la charge et la source pour obtenir un transfert de puissance maximal entre la source et la charge. Le convertisseur élévateur est utilisé lorsque l'impédance de charge est inférieure à l'impédance de source.

La plupart des algorithmes MPPT développés au cours des dernières années ont été passés en revue dans les sections précédentes. Certains d'entre eux sont

très similaires et utilisent le même principe mais exprimé de manière différente, comme les trois derniers algorithmes répertoriés dans les techniques d'escalade.



*CHAPITRE III*



*CHAPITRE III*

## INTRODUCTION

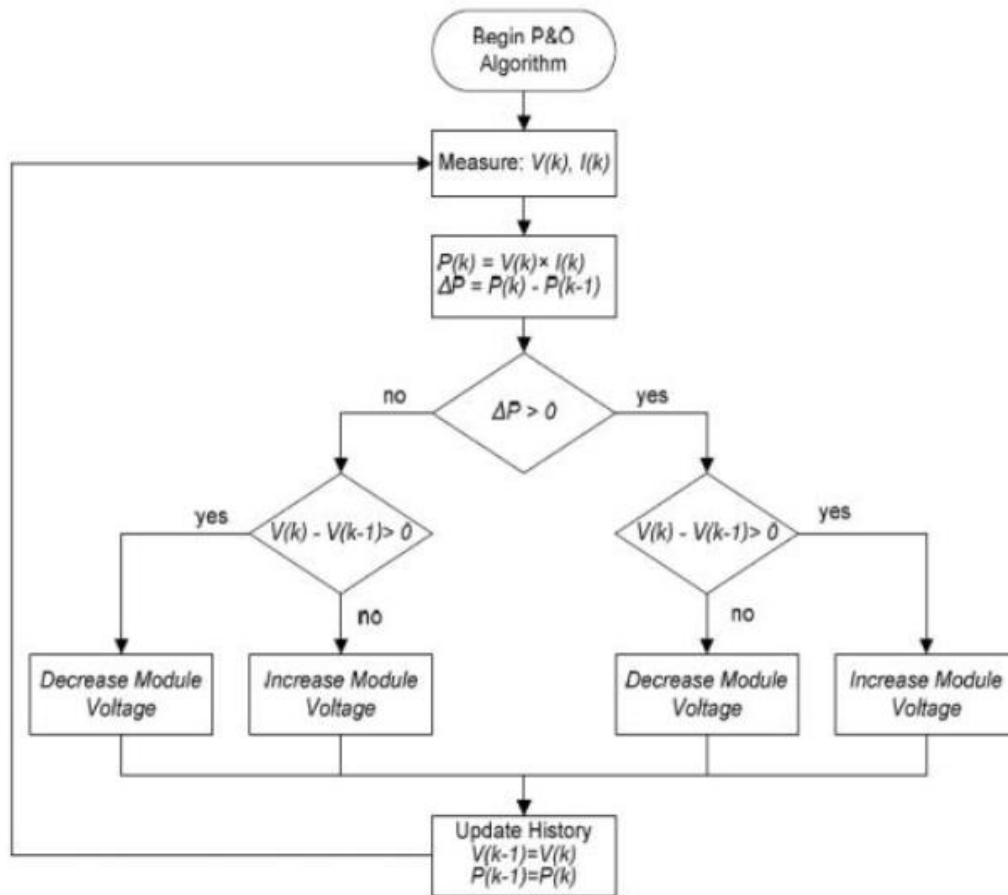
Dans la première partie de ce chapitre, nous étudions les méthodes de traçage de puissance maximale du PV classique, de l'intelligence artificielle (P&O), de l'InC, de la logique floue.

Dans la deuxième partie de ce chapitre se trouve la simulation du système photovoltaïque, l'utilisation de la simulation est une étape très importante dans l'étude des systèmes photovoltaïques, elle permet de modifier très facilement les paramètres du système et de tester les performances des méthodes MPPT sous conditions différentes et nous avons testé trois méthodes différentes, à savoir P&O, InC et logique floue.

### III.1 Les algorithmes MPPT

#### III.1.1 Algorithme Perturbation & Observation (P&O)

Cet algorithme a été considéré par un certain nombre de chercheurs. L'algorithme P&O peut être mise en oeuvre en appliquant des perturbations à la tension de référence ou au signal de courant de référence du panneau solaire. L'algorithme P&O est basé sur le calcul de la puissance de sortie PV et de la variation de puissance en échantillonnant à la fois le courant et la tension du PV. Le tracker fonctionne en incrémentant ou décrémentant périodiquement la tension du générateur solaire. Si une perturbation donnée entraîne une augmentation (diminution) de la puissance de sortie du PV, la perturbation ultérieure est générée dans la même direction (opposée). Le rapport cyclique du hacheur est varié et le processus est répété jusqu'à ce que le point de puissance maximum soit atteint.



**Fig.III.1** Algorithme Perturb Observe (P&O).[28]

D'après (Fig.III.1), la tension et le courant  $V$  et  $I$ , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante  $P(k)$  de la rangée. Cette valeur  $P(k)$  est comparée à la valeur  $P(k-1)$  de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

- Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement  $V$  est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint,  $V$  oscillera autour de la tension idéale  $V_{MP}$  de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple  $C_p$ .
- Si  $C_p$  est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.

- Si  $C_p$  est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

La valeur  $C_p$  idéale dépend du système. Elle doit être déterminée expérimentalement.

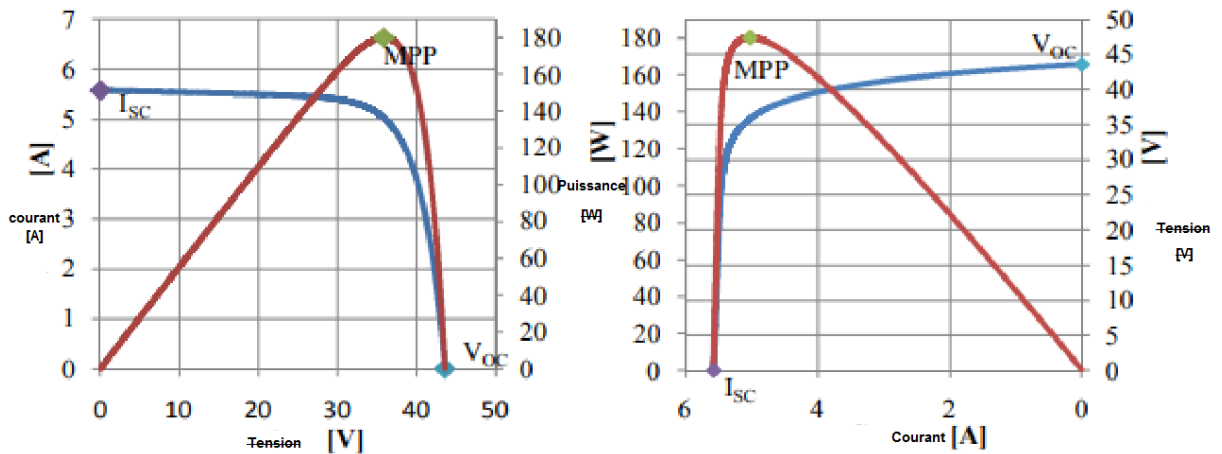


Fig.III.2 Courbes caractéristiques des panneaux PV.[28]

### III.1.2 Méthode de conductance incrémentale (IncCond)

La méthode de la conductance incrémentielle (IncCond) utilise la pente des caractéristiques de puissance du générateur PV pour suivre le MPP. Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe de puissance du générateur photovoltaïque est nulle sur le point MPP, positive pour les valeurs de puissance de sortie inférieure à MPP et négative pour les valeurs de puissance supérieure à MPP.

Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dP}{dV} = 1 + V \frac{dI}{dV}$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V}$$

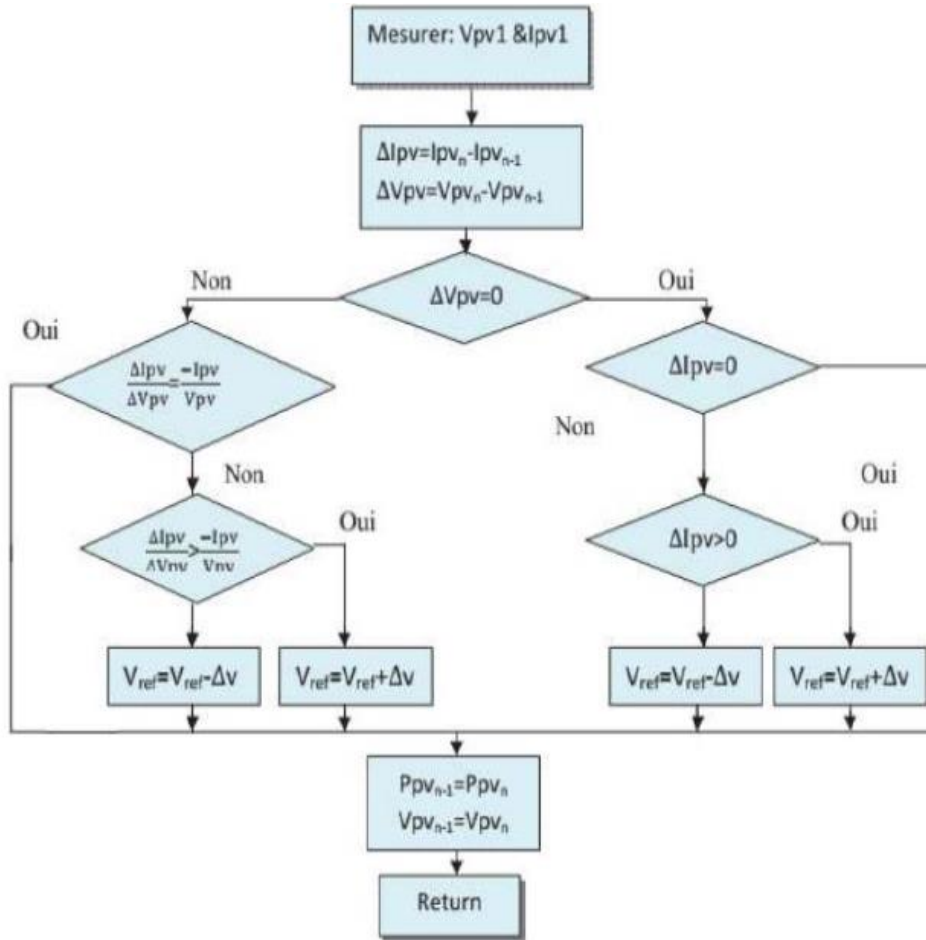


Fig.III.3 Algorithme d'incrémentation de la conductance.[28]

### III.1.3 Autres méthodes MPPT « hill climbing »

Il existe trois autres techniques révisées dans [29] qui peuvent être regroupées avec les algorithmes d'escalade : le contrôle de corrélation d'ondulation (RCC), le contrôle de rétroaction  $\mathbf{dP/dV}$  ou  $\mathbf{dP/dI}$  et le contrôle de glissement.

RCC utilise l'ondulation imposée par le convertisseur de puissance sur le générateur photovoltaïque pour suivre le MPP. Il corrèle  $\mathbf{dp/dt}$  avec  $\mathbf{di/dt}$  ou  $\mathbf{dv/dt}$ , pour amener le gradient de puissance à zéro, ce qui se produit lorsque le MPP est atteint. Selon  $\mathbf{dp/dt} \times \mathbf{di/dt}$  ou  $\mathbf{dp/dt} \times \mathbf{dv/dt}$  sont positifs à gauche du MPP, négatifs à droite et nuls au MPP. En fait, le même critère est utilisé par l'algorithme InCond mais exprimé sous une forme différente, il souffrira donc des mêmes problèmes. Dans en effet, il n'a été testé qu'avec des étapes d'irradiation, qui ne sont pas appropriées pour tester les performances dynamiques. De plus, il a besoin de basses fréquences de commutation pour avoir suffisamment d'ondulation afin que les bonnes décisions puissent être prises et c'est une technique analogique. Au contraire,

les onduleurs sont aujourd'hui contrôlés numériquement avec des DSP, donc cette méthode ne présente aucun avantage pour le P&O ou InCond.

Le contrôle de rétroaction  $dP/dV$  ou  $dP/dI$  est une technique qui calcule la pente de la courbe caractéristique P-V ou P-I et la renvoie au contrôleur afin de la ramener à zéro, car elles sont nulles au MPP. Encore une fois, il s'agit d'une autre implémentation de l'algorithme InCond, il présente donc les mêmes avantages et inconvénients.

Enfin, dans la commande à glissière, la fonction de commutation utilisée est à nouveau  $dP/dV$ , donc les mêmes problèmes qu'avec l'algorithme InCond peuvent être attendus sous une irradiation changeante.

Pour résumer, les trois dernières méthodes MPPT sont basées sur les mêmes principes que les algorithmes P&O et InCond, elles ont donc les mêmes avantages et inconvénients. Toutes les méthodes MPPT d'escalade dépendent des caractéristiques V-P ou I-P du générateur photovoltaïque, qui varient en fonction de la température et de l'irradiation. Par conséquent, ces méthodes MPPT peuvent être confondues lorsque l'irradiation ou la température changent, comme cela est expliqué dans [30]. Enfin, les autres méthodes MPPT d'escalade n'offrent aucune amélioration par rapport aux algorithmes originaux P&O et InCond.

### III.2 Commande par logique floue

L'utilisation de la logique floue est devenue populaire au cours de la dernière décennie car elle peut traiter des entrées imprécises, n'a pas besoin d'un modèle mathématique précis et peut gérer la non-linéarité. Les microcontrôleurs ont également contribué à la vulgarisation du contrôle par logique floue [29].

La logique floue se compose de trois étapes : la fuzzification, le système d'inférence et la défuzzification. La fuzzification comprend le processus de transformation d'entrées numériques nettes en variables linguistiques basées sur le degré d'appartenance à certains ensembles. Les fonctions d'appartenance, comme celles de la figure III.4, sont utilisées pour associer une note à chaque terme linguistique. Le nombre de fonctions d'appartenance utilisées dépend de la précision du contrôleur, mais il varie généralement entre 5 et 7 [29][31]. Dans la Figure 15, sept niveaux flous sont utilisés : NB (Négative Big), NM (Négative Medium), NS

---

(Négative Small), ZE (Zéro), PS (Positive Small), PM (Positive Medium) et PB (Positive Big). Les valeurs a, b et c sont basées sur les valeurs de plage de la variable numérique. Dans certains cas les fonctions d'appartenance sont choisies moins symétriques voire optimisées pour l'application pour une meilleure précision [29][31].

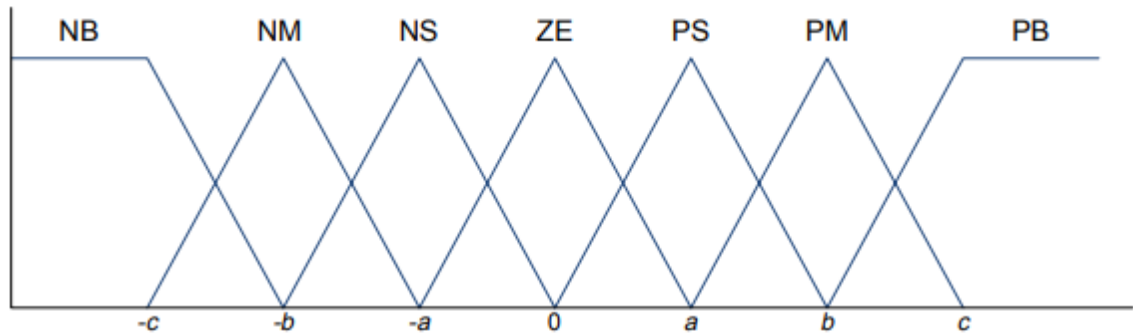


Fig.III.4 Fonctions d'adhésion.[29]

Les entrées du contrôleur flou sont généralement une erreur, E, et la variation de l'erreur,  $\Delta E$ . L'erreur peut être choisie par le concepteur, mais elle est généralement choisie comme  $\Delta P/\Delta V$  car elle est nulle au MPP. Alors E et  $\Delta E$  sont définis comme suit :

$$E = P(k) - P(k-1) \quad V(k) - V(k-1) \quad \text{(III.1)}$$

$$\Delta E = E(k) - E(k-1) \quad \text{(III.2)}$$

Dans d'autres cas,  $\Delta P/\Delta I$  est utilisé comme erreur ou d'autres entrées sont considérées, comme dans , où  $\Delta U$  et  $\Delta P$  sont utilisés.

La sortie du convertisseur à logique floue est généralement une modification du rapport cyclique du convertisseur de puissance,  $\Delta D$ , ou une modification de la tension de référence de la liaison CC,  $\Delta V$ . La base de règles, également appelée table de correspondance de base de règles ou algorithme de règles floues, associe la sortie floue aux entrées floues en fonction du convertisseur de puissance utilisé et des connaissances de l'utilisateur. Le tableau I montre les règles pour un onduleur triphasé, où les entrées sont E et  $\Delta E$ , comme défini dans (7) et (8), et la sortie est une variation de la tension du circuit intermédiaire,  $\Delta V$ . Par exemple, si le point de fonctionnement est loin à droite du MPP, E est NB et  $\Delta E$  est égal à zéro, alors pour

atteindre le MPP, la tension de référence doit diminuer, donc  $\Delta E$  doit être NB (Négatif) pour déplacer le point de fonctionnement vers le MPP.

$E \Delta E$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

*Tableau.III.1* Tableau de base des règles.[29]

La dernière étape de la commande par logique floue est la défuzzification. Dans cette étape, la sortie est convertie d'une variable linguistique en une variable numérique nette en utilisant à nouveau des fonctions d'appartenance comme celles de la figure III. 6. Il existe différentes méthodes pour transformer les variables linguistiques en valeurs nettes. On peut dire que la plus populaire est la méthode du centre de gravité. Cependant, l'analyse de ces méthodes sort du cadre de cette thèse.

Les avantages de ces contrôleurs, en plus de traiter des entrées imprécises, de ne pas avoir besoin d'un modèle mathématique précis et de gérer la non-linéarité, sont une convergence rapide et des oscillations minimales autour du MPP. De plus, il a été démontré qu'ils fonctionnent bien sous des changements d'étape dans l'irradiation. Cependant, aucune preuve n'a été trouvée qu'ils fonctionnent bien sous les rampes d'irradiation. Par conséquent, leurs performances dans les conditions spécifiées dans pour tester l'efficacité MPPT dynamique sont inconnues. Un autre inconvénient est que leur efficacité dépend beaucoup des compétences du concepteur ; non seulement pour choisir le bon calcul d'erreur, mais aussi pour proposer une base de règles appropriée [29].

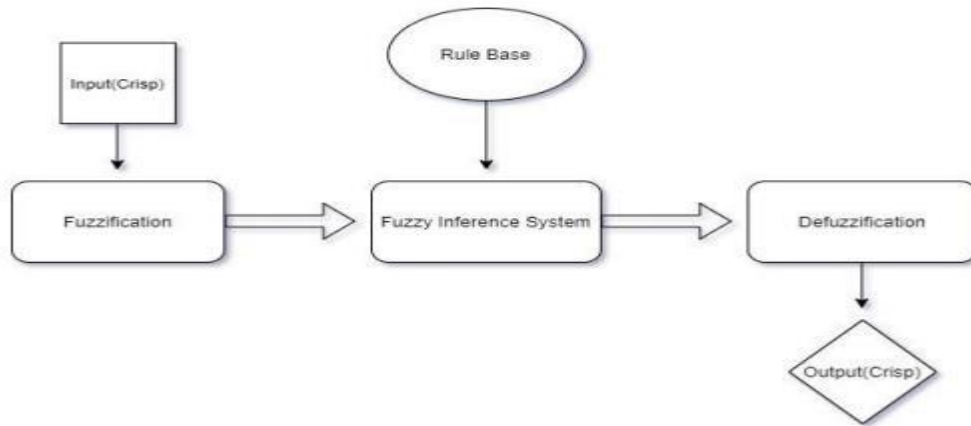
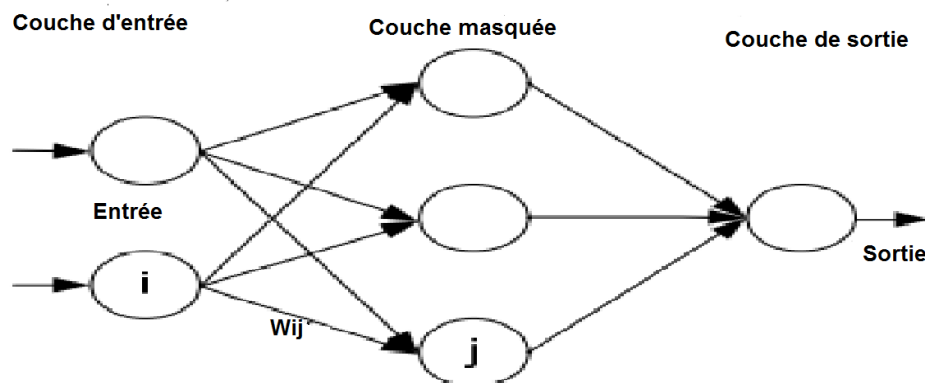


Fig.III.5 Organigramme de la commande par logique floue.[29]

### III.3 Réseaux de neurones

Une autre méthode MPPT bien adaptée aux microcontrôleurs est les réseaux de neurones [29]. Ils sont venus avec Fuzzy Logique et tous deux font partie de ce qu'on appelle le "Soft Computing". L'exemple le plus simple d'un réseau neuronal (NN) comporte trois couches appelées couche d'entrée, couche cachée et couche de sortie, comme le montre la figure III.6. Des NN plus compliqués sont construits en ajoutant plus de couches cachées. Le nombre de couches et le nombre de nœuds dans chaque couche ainsi que la fonction utilisée dans chaque couche varient et dépendent des connaissances de l'utilisateur. Les variables d'entrée peuvent être des paramètres du générateur photovoltaïque tels que VOC et ISC, des données atmosphériques telles que l'irradiation et la température ou une combinaison de celles-ci. La sortie est généralement un ou plusieurs signaux de référence comme le rapport cyclique ou la tension de référence du circuit intermédiaire.



*Fig.III.6* Réseau de neurones.[29]

Les performances du NN dépendent des fonctions utilisées par la couche cachée et de la qualité de l'apprentissage du réseau de neurones. Les liens entre les nœuds sont tous pondérés. Dans la figure 24, le poids entre les nœuds  $i$  et  $j$  est étiqueté comme  $w_{ij}$ . Les poids sont ajustés dans le processus de formation. Pour exécuter ce processus de formation, les données des modèles entre les entrées et les sorties du réseau neuronal sont enregistrées sur une longue période de temps, de sorte que le MPP puisse être suivi avec précision.

Le principal inconvénient de cette technique MPPT est le fait que les données nécessaires au processus de formation doivent être spécifiquement acquises pour chaque générateur photovoltaïque et emplacement, car les caractéristiques du générateur photovoltaïque varient en fonction du modèle et les conditions atmosphériques dépendent de l'emplacement. . Ces caractéristiques changent également avec le temps, de sorte que le réseau neuronal doit être formé périodiquement.

### III.4 Tension fractionnaire en circuit ouvert

Cette méthode utilise la relation approximativement linéaire entre la tension MPP ( $V_{MPP}$ ) et la tension en circuit ouvert ( $V_{OC}$ ), qui varie avec l'éclairement et la température :

$$V_{MPP} \approx k_1 V_{OC}$$

où  $k_1$  est une constante dépendant des caractéristiques du générateur photovoltaïque et doit être déterminée au préalable en déterminant le  $V_{MPP}$  et le  $C_{OV}$  pour différents niveaux d'irradiation et différentes températures. Selon , la constante  $k_1$  est comprise entre 0,71 et 0,78.

Une fois que la constante de proportionnalité,  $k_1$ , est connue, la tension MPP  $V_{MPP}$  peut être déterminée périodiquement en mesurant  $V_{OC}$ . Pour mesurer les  $C_{OV}$ , le convertisseur de puissance doit être arrêté momentanément, de sorte qu'à chaque mesure, une perte de puissance se produit. Un autre problème de cette méthode est qu'elle est incapable de suivre le MPP sous des pentes d'irradiation, car la

détermination du  $V_{MPP}$  n'est pas continue. Un autre inconvénient est que le MPP atteint n'est pas le vrai parce que la relation n'est qu'une approximation.

Pour pallier ces inconvénients, des solutions ont été proposées, comme cela est rapporté dans [29]. Par exemple, des cellules pilotes peuvent être utilisées pour obtenir des  $C_{OV}$ . Ce sont des cellules solaires qui représentent les cellules du générateur photovoltaïque et qui ne sont pas utilisées pour produire de l'électricité mais pour obtenir des paramètres caractéristiques tels que les  $C_{OV}$  sans interférer avec les convertisseurs de puissance. Ces cellules pilotes doivent être soigneusement choisies et placées pour représenter les caractéristiques du générateur photovoltaïque et les conditions d'irradiation. Un inconvénient de l'utilisation de ces cellules pilotes est que le coût du système est augmenté.

Selon l'application, cette technique peut être utilisée car elle est très facile à mettre en œuvre et peu coûteuse - elle ne nécessite pas de contrôle DSP ou de microcontrôleur et un seul capteur de tension est utilisé. Cependant, selon [29], cette méthode n'est pas valide sous un ombrage partiel du générateur PV car alors la constante  $k_1$  change. Pour mettre à jour alors  $k_1$ , un balayage de tension est proposé bien que cela augmente la complexité du système, le coût augmente et il y a plus de pertes de puissance pendant le balayage.[29]

### III.5 Courant de court-circuit fractionnaire

Tout comme dans la méthode de la tension fractionnaire en circuit ouvert, il existe une relation, dans des conditions atmosphériques variables, entre le courant de court-circuit  $I_{SC}$  et le courant MPP,  $I_{MPP}$ , comme le montre :

$$I_{MPP} \approx k_2 I_{SC}$$

Le coefficient de proportionnalité  $k_2$  doit être déterminé en fonction de chaque générateur PV, comme dans la méthode précédente qui s'est produite avec  $k_1$ . Selon [29], la constante  $k_2$  est comprise entre 0,78 et 0,92.

Mesurer le courant de court-circuit pendant que le système fonctionne est un problème. Cela nécessite généralement l'ajout d'un commutateur supplémentaire au convertisseur de puissance pour court-circuiter périodiquement le générateur photovoltaïque et mesurer l' $I_{SC}$ . Dans  $I_{SC}$  est mesuré en court-circuitant le générateur PV avec un transistor à effet de champ supplémentaire ajouté entre le générateur PV

et le condensateur de liaison CC. Une autre option est illustrée dans [32] : un convertisseur élévateur est utilisé et le commutateur du convertisseur est utilisé pour court-circuiter le générateur PV. La mise en court-circuit du générateur photovoltaïque entraîne également une perte de puissance. Un dernier handicap est que le PPM réel n'est pas atteint car la relation proportionnelle est une approximation. De plus,  $k_2$  change si le générateur photovoltaïque est partiellement ombragé, ce qui se produit en raison d'ombres ou d'une contamination de surface. Pour surmonter ce problème, propose un réglage en ligne de  $k_2$  et un balayage périodique de la tension PV du circuit ouvert au court-circuit pour mettre à jour  $k_2$  et garantir que le MPP réel est atteint en présence de maxima multiples qui évidemment augmente la complexité du système. La plupart de la littérature utilisant cette technique MPPT utilise un DSP comme contrôleur [29].

### III.6 Balayage en courant

Dans cette méthode, la courbe caractéristique I-V est obtenue à l'aide d'une forme d'onde de balayage pour le courant du générateur PV. Le balayage est répété à des intervalles de temps fixes de sorte que la courbe I-V est mise à jour périodiquement et que la tension MPP ( $V_{MPP}$ ) peut être déterminée à partir de celle-ci à ces mêmes intervalles. La façon dont la courbe I-V est déterminée et la fonction choisie pour la forme d'onde de balayage peuvent être trouvées dans .

Avec cette méthode, le vrai MPP est obtenu. D'autre part, le balayage prend un certain temps pendant lequel le point de fonctionnement n'est pas le MPP, ce qui implique une certaine perte de puissance disponible. Strictement parlant, il n'est pas possible de suivre le MPP sous des pentes d'irradiation, car le MPP varie de manière continue. Ce n'est que si le balayage est instantané que le MPP global pourrait être trouvé, mais c'est impossible. De plus, la complexité de mise en œuvre est élevée, la vitesse de convergence est lente et des mesures de tension et de courant sont nécessaires. Comme indiqué dans [33], une méthode MPPT ne vaut la peine d'être utilisée que si sa consommation d'énergie est inférieure à l'augmentation de puissance qu'elle apporte à l'ensemble du système PV.

En raison des inconvénients et de la complexité exposés ci-dessus, cette méthode MPPT n'est pas la meilleure option pour suivre le MPP en continu. Cependant, il peut être utilisé en complément d'autres méthodes, par exemple lors de l'initialisation du système PV le matin, pour commencer le suivi dans le MPP réel puis

passer à un autre algorithme, ou pour vérifier parfois dans la journée si le système est fonctionnant au vrai MPP. Une autre application peut être de vérifier s'il existe plusieurs maxima en raison des conditions d'ombrage.

### III.7 Calcul du courant et de la tension maximaux au point de puissance

Le calcul  $I_{MPP}$  &  $V_{MPP}$  est une technique dans laquelle le MPP est calculé sur la base des mesures de l'irradiance et de la température à l'aide d'un modèle du module PV [29]. Les inconvénients sont les mesures supplémentaires nécessaires, qui sont parfois difficiles à obtenir, et la nécessité d'un modèle précis du générateur PV. D'autre part, le MPP est correctement suivi même dans des conditions atmosphériques changeantes. Il peut être utilisé dans de grandes installations, où l'investissement économique est énorme et où un suivi parfait est nécessaire pour obtenir la puissance maximale disponible des panneaux solaires.

### III.8 REGULATEUR PID

Le régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) est l'un des premiers régulateurs industriels conventionnels. Il présente de nombreux avantages comme économique, simple et facile à régler. Le modèle Simulink pour le système non linéaire utilisant un contrôleur PID conventionnel est développé. L'expression mathématique de la même chose est donnée dans l'équation exprimée par l'équation

$$U(t) = K_p \times e(t) + K_I \times \int e(t) dt + K_D$$

Où  $U(t)$  : Signal de commande

$E(t)$  : Erreur de poursuite, la différence entre la sortie souhaitée et la sortie souhaitée et la sortie réelle.

$K_p$  : Gain proportionnel (Paramètre de réglage )

$K_I$  : Gain In églage tégral (Paramètre de r)

$K_D$  : Gain Dérivé (Paramètre de réglage )

### III.9 Recherche de maxima multiples

Cela n'a pas été pris en compte dans cette étude , mais lorsque le générateur PV est ombragé, la courbe P-V présente plusieurs maxima et la plupart des algorithmes MPPT, y compris P&O, InCond et le contrôle.

de logique floue, ne peuvent pas déterminer le maximum global. Habituellement, un MPP local est trouvé, en fonction du point de départ de l'algorithme .

Ces dernières années, certains algorithmes ont été proposés pour pallier cette limitation. Les plus pertinentes sont passées en revue dans l'introduction de , qui affirme que la plus efficace est la technique de recherche DIRECT basée sur l'algorithme de division des rectangles. Si cette méthode est utilisée en continu pour suivre le MPP, l'efficacité maximale signalée est de 97 % .

Cependant, il peut être utilisé périodiquement pour déterminer où se trouve le maximum global, puis passer à un algorithme traditionnel dont l'efficacité peut être supérieure à 99 % [34]. Cela pourrait être efficace car les nuances se déplacent lentement pendant la journée. De cette façon, les pertes qui se produisent en raison de la convergence vers un MPP local au lieu du MPP global, qui est un handicap de la plupart des algorithmes traditionnels, pourraient être évitées.

### III.10 Simulation du système photovoltaïque

#### III.10.1 Teste sur un convertisseur DC/DC.

La Figure III.7 donne le schéma block d'un BOOST testé sous MATLAB/SIMULINK, relié à une charge résistive avec une tension d'entrée :  $V_e=10V$ .

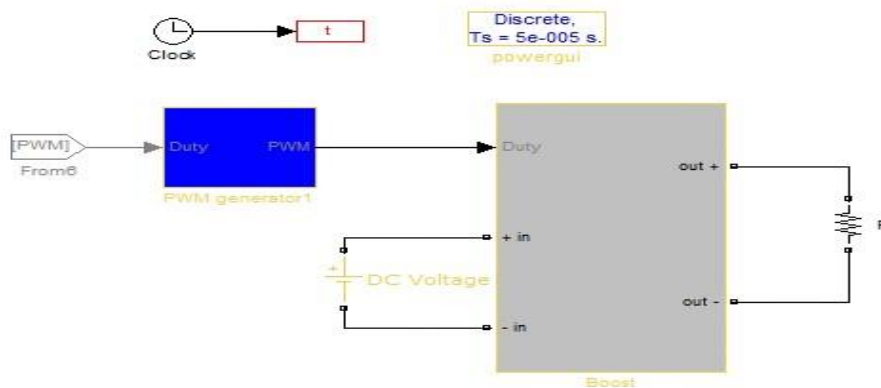


Fig.III.7 Schéma d'un BOOST sous MATLAB/SIMULINK.

C1	C2	L	R
1 <sup>e</sup> -3(F)	1 <sup>e</sup> -3(F)	4 <sup>e</sup> -4(H)	65(ohm)

Tableau III.2 Paramètres du convertisseur DC/DC BOOST.

Les résultats de simulation pour une fréquence  $f=10e-3Hz$ , sont illustrés sur la figure ci-dessus.

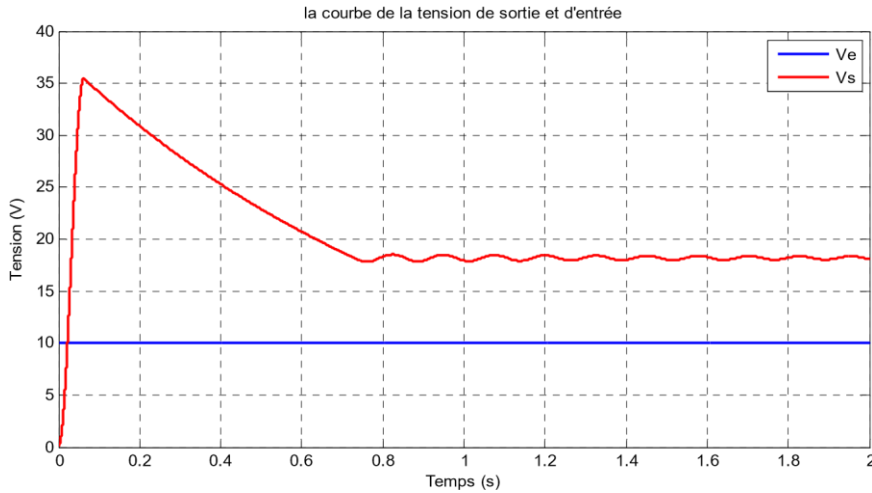


Fig.III.8. Courbes de la tension d'entré et de sortie d'un BOOST.

Pour une tension d'entrée  $V_e = 10V$  la tension de sortie est presque égale à 20V, avec les chutes de tension au niveau du BOOST tel que  $V_s \cong 18.72V$  se qui vérifie l'équation tel que :  $v_s = \frac{1}{1-\alpha} \times v_e$

III.10.2 Simulation du panneau photovoltaïque

La figure suivante représente le modèle du panneau photovoltaïque étudié.

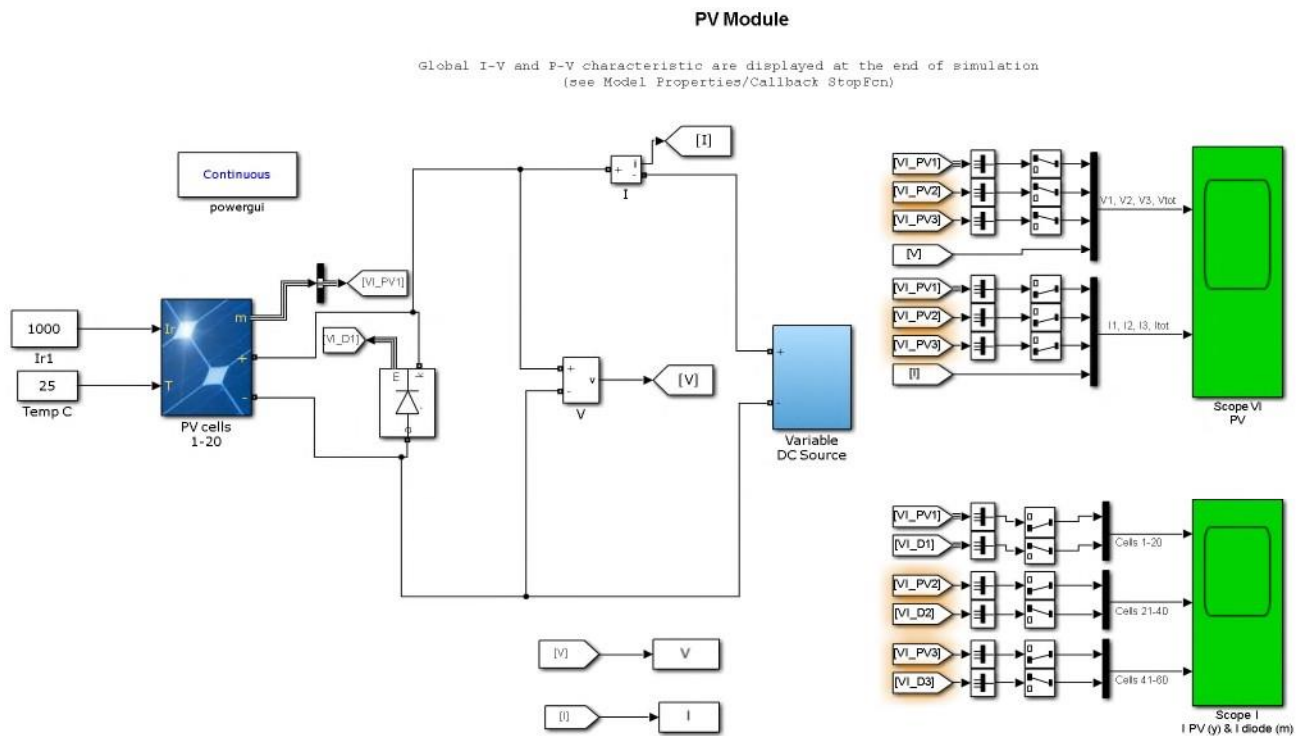


Fig.III.9. Schéma de simulation d'un panneau PV étudié.

Les paramètres du panneau de type ARRAY sont donnés par la figure suivant :

PV array (mask) (link)  
 Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series.  
 Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.  
 Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings

Series-connected modules per string

Module data

Module: **User-defined**

Maximum Power (W)  Cells per module (Ncell)

Open circuit voltage Voc (V)  Short-circuit current Isc (A)

Voltage at maximum power point Vmp (V)  Current at maximum power point Imp (A)

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)  Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

Display I-V and P-V characteristics of ...  
 array @ 25 deg.C & specified irradiances  
 Irradiances (W/m2) [ 1000 500 100 ]

Model parameters

Light-generated current IL (A)

Diode saturation current IO (A)

Diode ideality factor

Shunt resistance Rsh (ohms)

Series resistance Rs (ohms)

Fig.III.10. Paramètre de cellule PV.

Pour l’analyse du fonctionnement du panneau PV choisi, en se basant sur le modèle étudié, une série de simulation ainsi que les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes, tel que :

- La première courbe présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l’éclairement  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$  et de température  $T = 25^\circ\text{C}$ .
- La deuxième courbe présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l’éclairement  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$  et de température  $T = 25^\circ\text{C}$ .

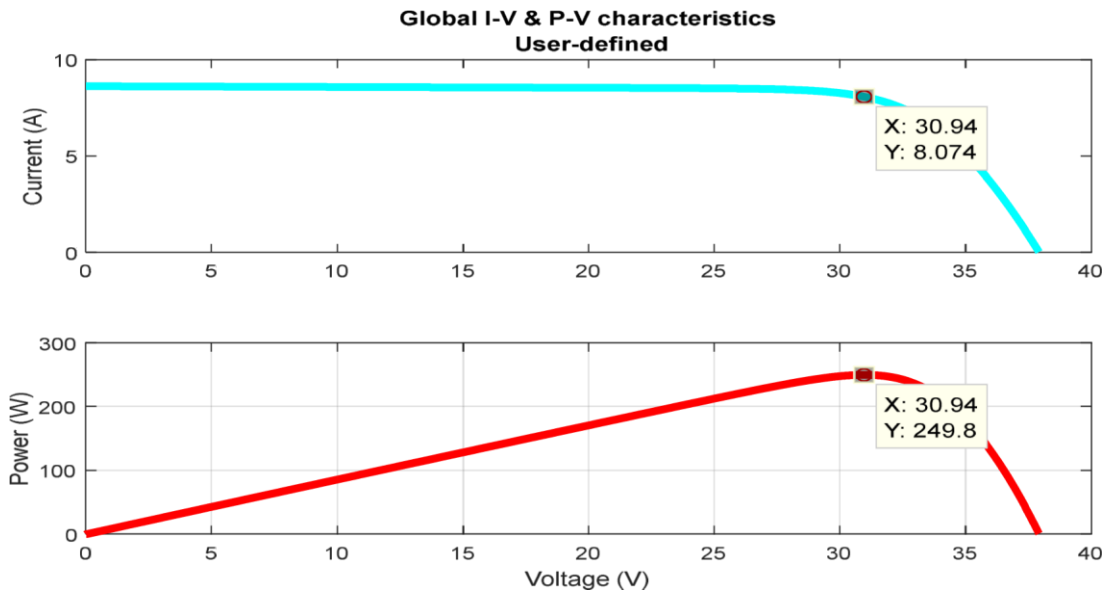


Fig.III.11. Courbe des caractéristiques du I-V et P-V du panneau.

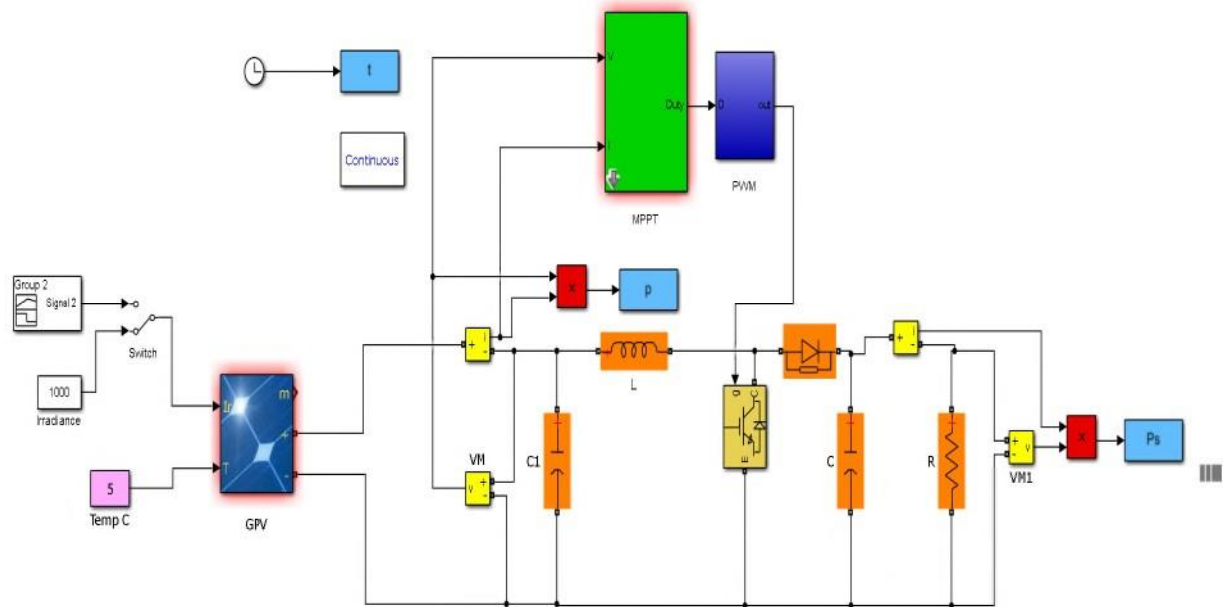
On note alors que pour le bon fonctionnement du panneau PV le point de puissance maximale doit atteindre une puissance  $P \approx 250\text{W}$ , et  $I \approx 8\text{A}$ .

### III.10.3 Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT.

Pour tester les fonctionnements des algorithmes modélisés précédemment, on a inséré le bloc de commande MPPT pour le système photovoltaïque, les entrées de la

commande sont le courant et la tension du panneau, la sortie représente le pas du rapport cyclique qui génère le signal de modulation PWM.

La **Figure III.12** illustre le bloc schématique de SIMULINK du système PV adapté par la commande MPPT :



**Fig.III.12** Modélisation d'un SPV sous MATLAB\SIMULINK.

**III.10.3.1 Simulation avec la commande PO.**

Pour avoir une meilleure connexion entre le GPV et la charge et bénéficier de la puissance maximale, on présente l'une des méthodes de la commande MPPT qui est la méthode PO, partant de la modélisation de cette algorithme aux résultats des tests.

Le principe est de calculer  $\dot{\phi}$  et  $\Delta V$  afin de se rapprocher de la zone du PPM. Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique « perturbation et observation » qu'on a appliqué au GPV avec le convertisseur statique débitant sur une charge. Un masque de sous-système est utilisé pour faciliter le paramétrage du rapport cyclique et de la fréquence du MPPT.

Subsystem (mask)	
Parameters	
Initial value for D output	<input type="text" value="0.9"/>
Dmax	<input type="text" value="1"/>
Dmin	<input type="text" value="0"/>
DeltaD	<input type="text" value="0.001"/>
Command frequency (Hz)	<input type="text" value="800"/>
Simple time (s)	<input type="text" value="Ts*9"/>

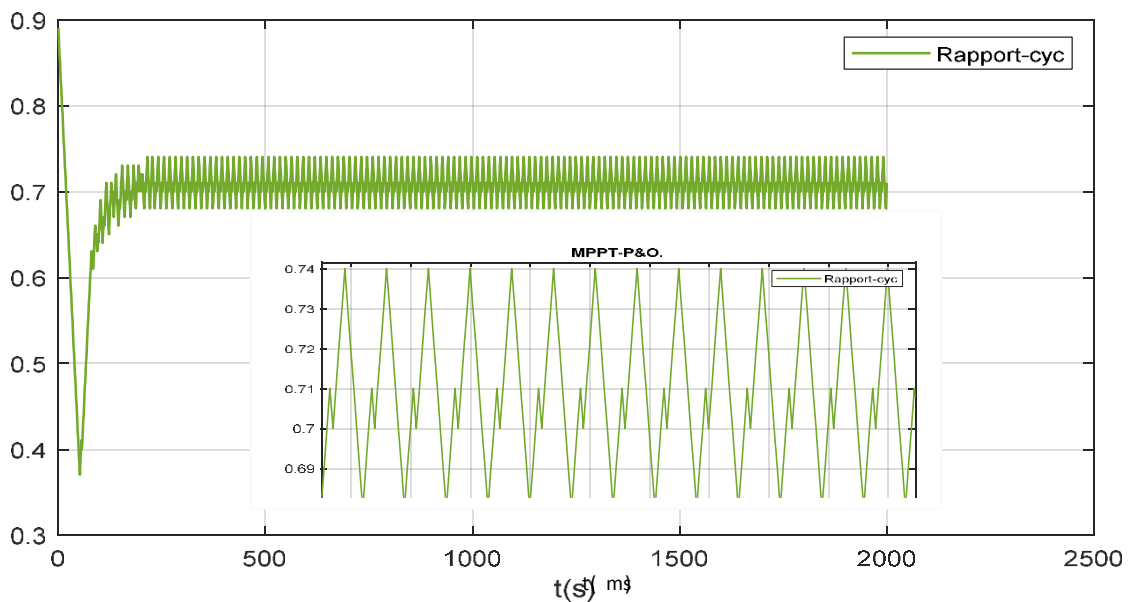
*Fig.III.13.* Masque des paramètres de la commande PO.**a. Simulation sous des conditions climatiques stables**

Pour une évaluation des performances du système photovoltaïque de la commande MPPT du type PO, nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement  $1000\text{W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ )

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la commande MPPT « perturbation et observation » sont représentés par les figures suivantes pour un pas de perturbation de 0.01 et 0.002.

**Pas du rapport cyclique  $\Delta D=0.01$** 

Les Figures suivantes représentent, respectivement, l'évolution du rapport cyclique, la puissance à l'entrée et à la sortie du Boost, la tension à l'entrée et la sortie du Boost.

*Fig.III.14* Courbe d'un pas de rapport cyclique égal à 0.01.

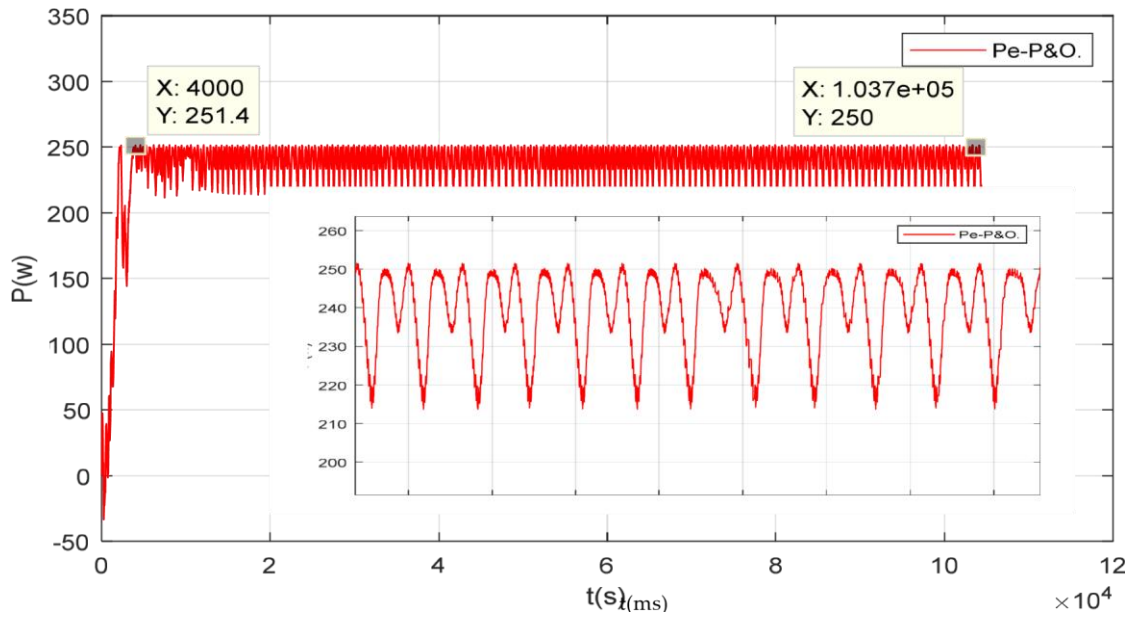


Fig.III.15 Puissance aux bornes du GPV pour un pas de 0.01.

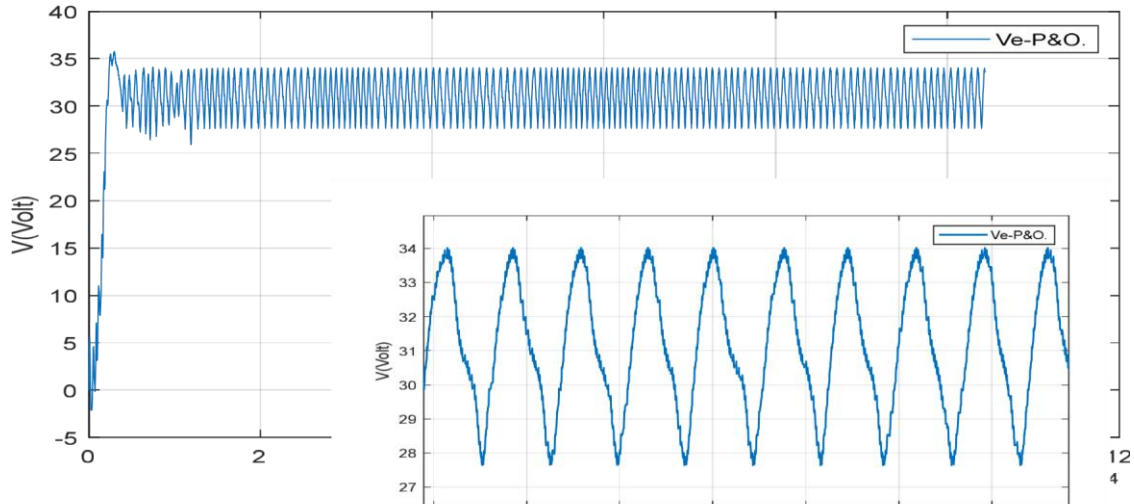


Fig.III.16 Tension du générateur photovoltaïque pour un pas de 0.01.

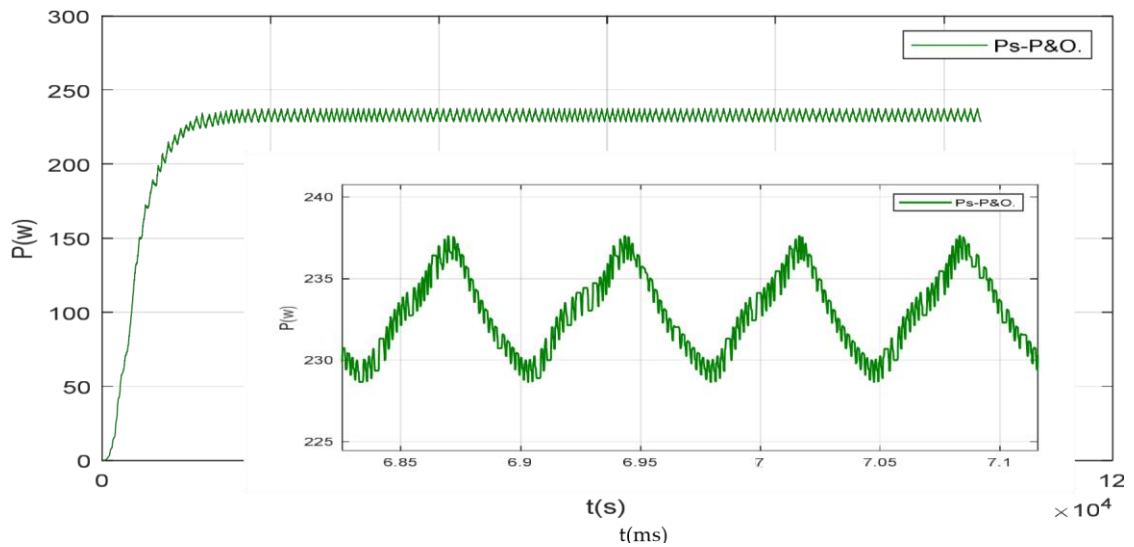


Fig.III.17. Puissance de sortie du système pour un pas de 0.01.

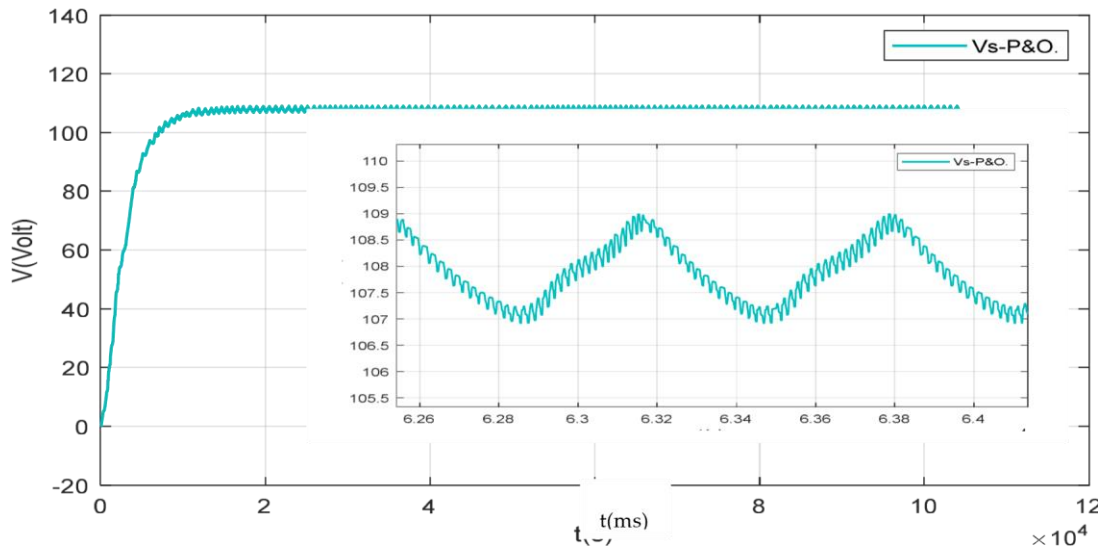


Fig.III.18 Tension de sortie du système pour un pas de 0.01.

**Pas du rapport cyclique  $\Delta D=0.002$**

Les Figures suivantes représentent, respectivement, l'évolution du rapport cyclique, la puissance à l'entrée et à la sortie du Boost, la tension à l'entrée et la sortie du Boost.

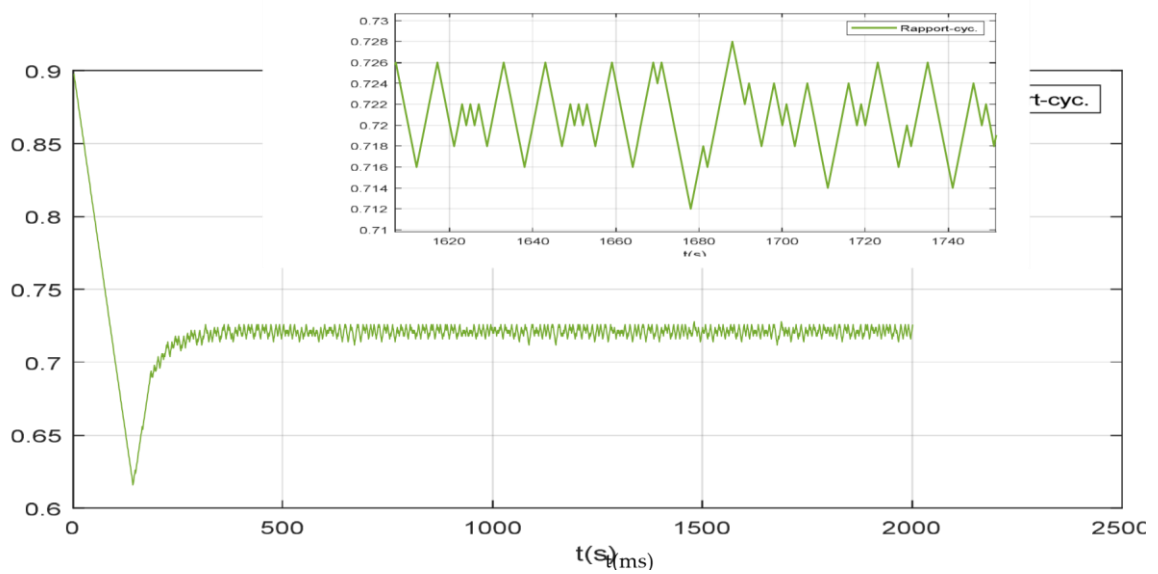


Fig.III.19 Courbe d'un pas de rapport cyclique égal à 0.002.

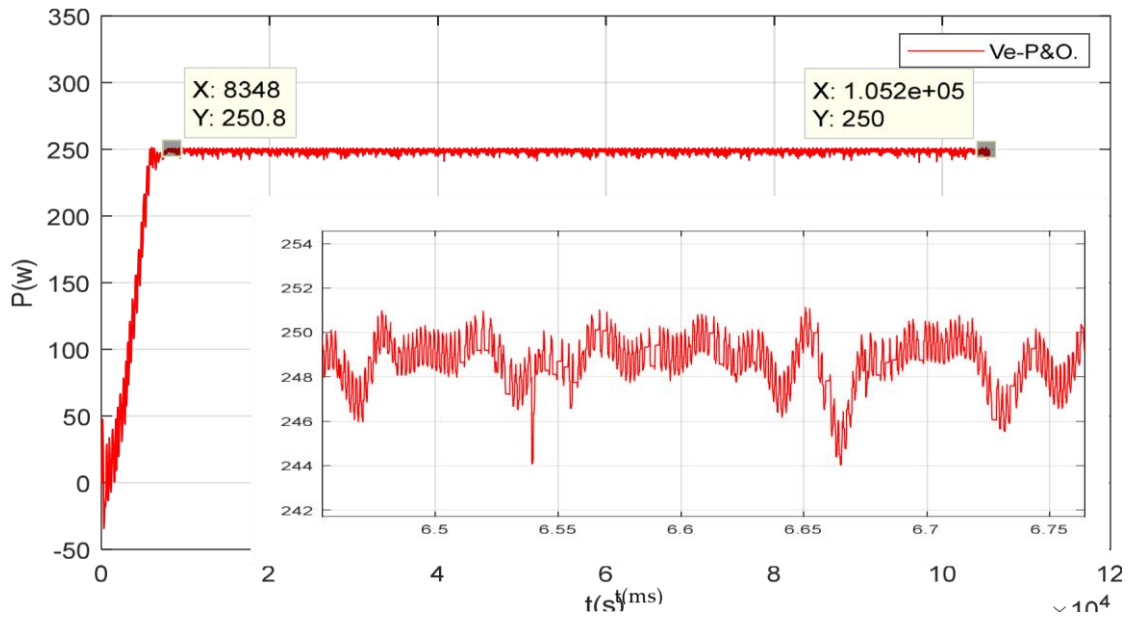


Fig.III.20 Courbe de la tension aux bornes du GPV pour un pas de 0.002.

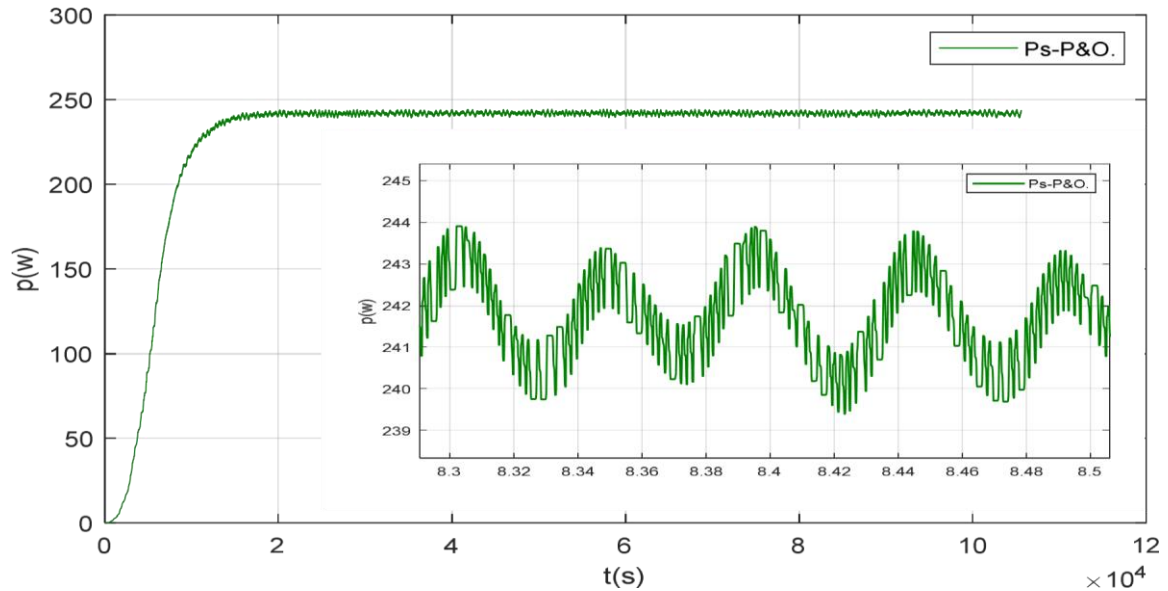


Fig.III.21 Puissance de sortie du système pour un pas de 0.002.

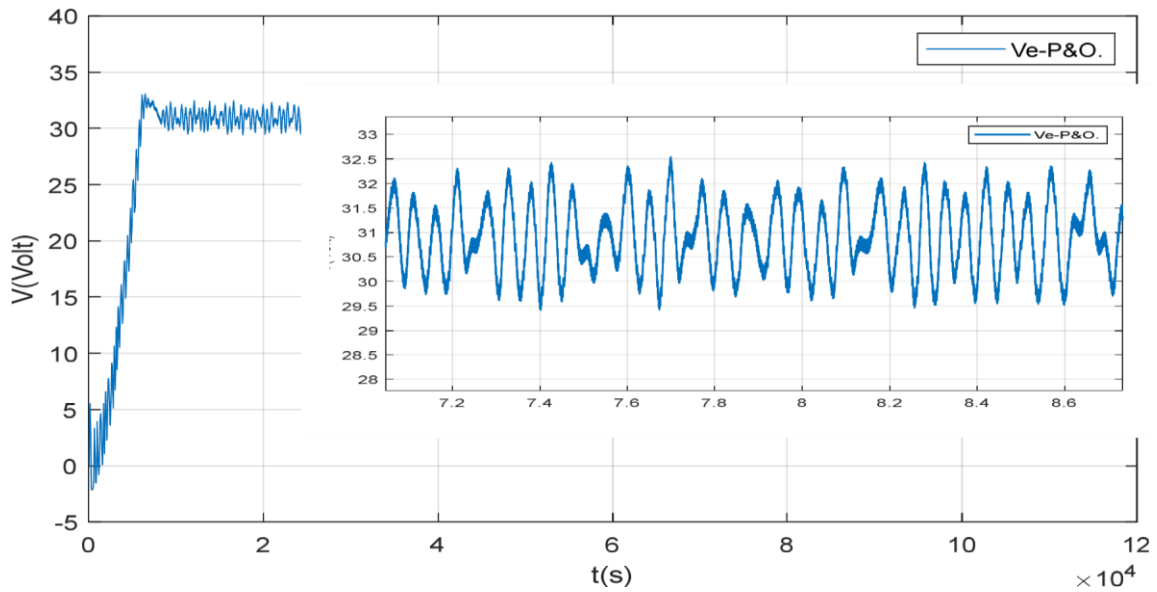


Fig.III.22. Tension à la borne du générateur photovoltaïque pour un pas de 0.002.

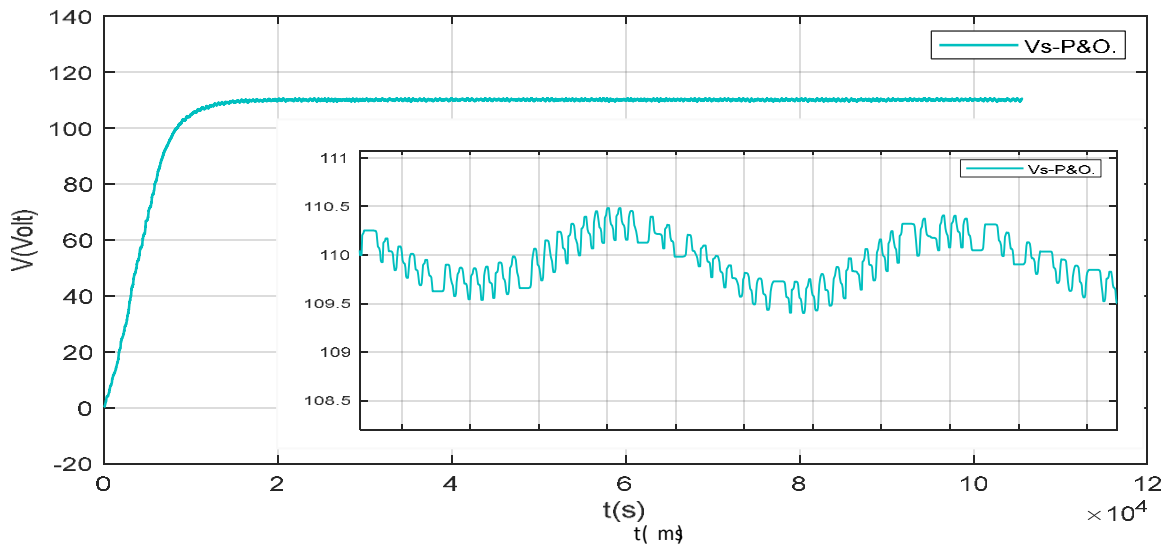
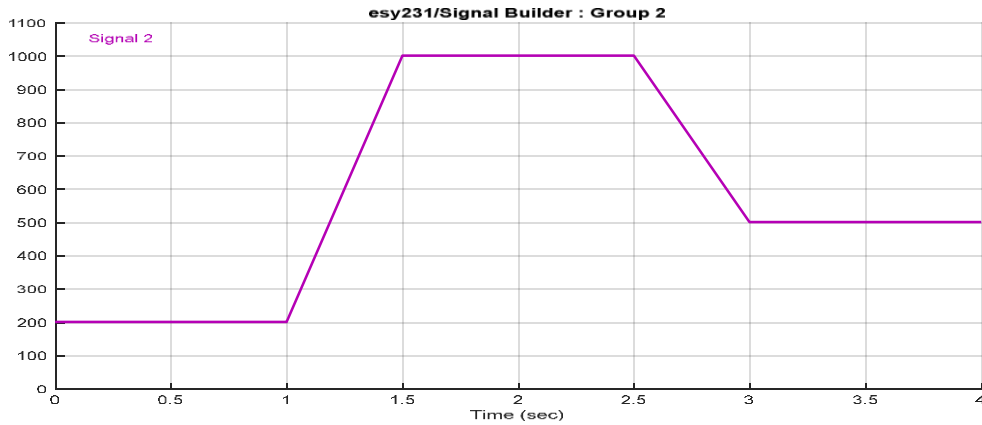


Fig.III.23 Tension de sortie du système pour un pas de 0.002.

**b. Fonctionnement sous des conditions climatiques variables.**

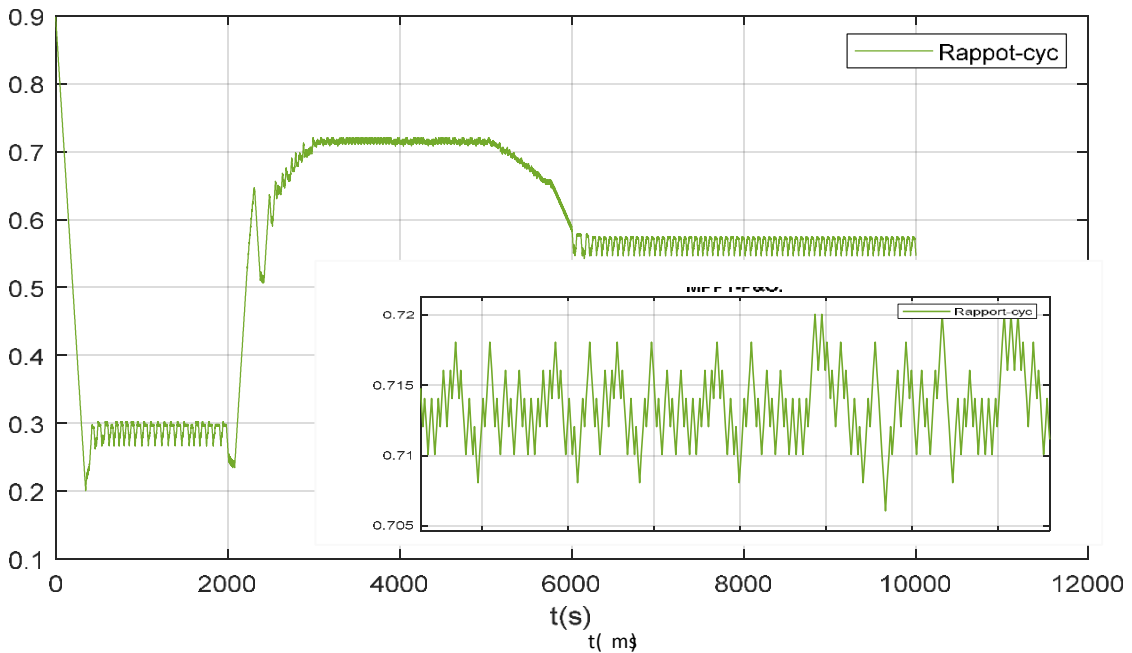
Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous une température fixe de 25°C et un éclairement variable (200W/m<sup>2</sup>, 1000W/m<sup>2</sup>, 500W/m<sup>2</sup>,) comme illustré dans la figure suivante.



**Fig.III.24** Profile d'un éclairage injecté dans le générateur photovoltaïque.

La structure nous montre le fonctionnement de la puissance de GPV suivant le changement de l'éclairage, et les figures suivantes nous montrent les résultats.

Pour un pas de 0.002 on a alors :



**Fig.III.25** Courbe du pas d'un rapport cyclique égal à 0.002.

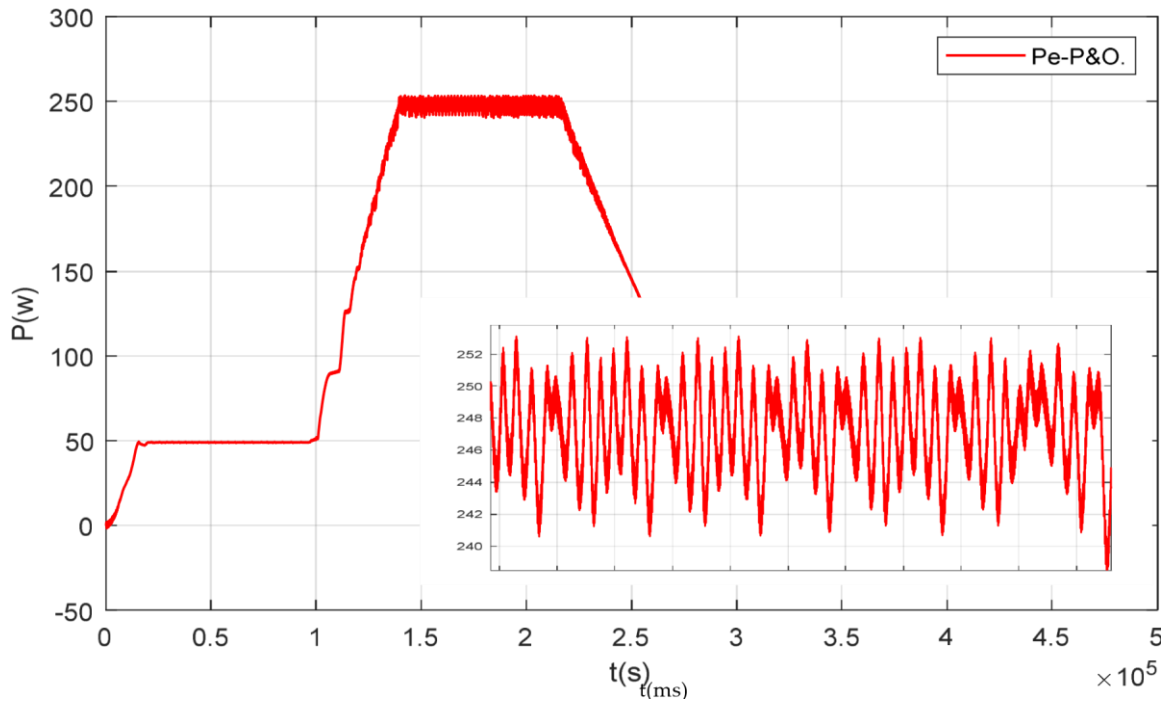


Fig.III.26 Tension aux bornes du générateur photovoltaïque.

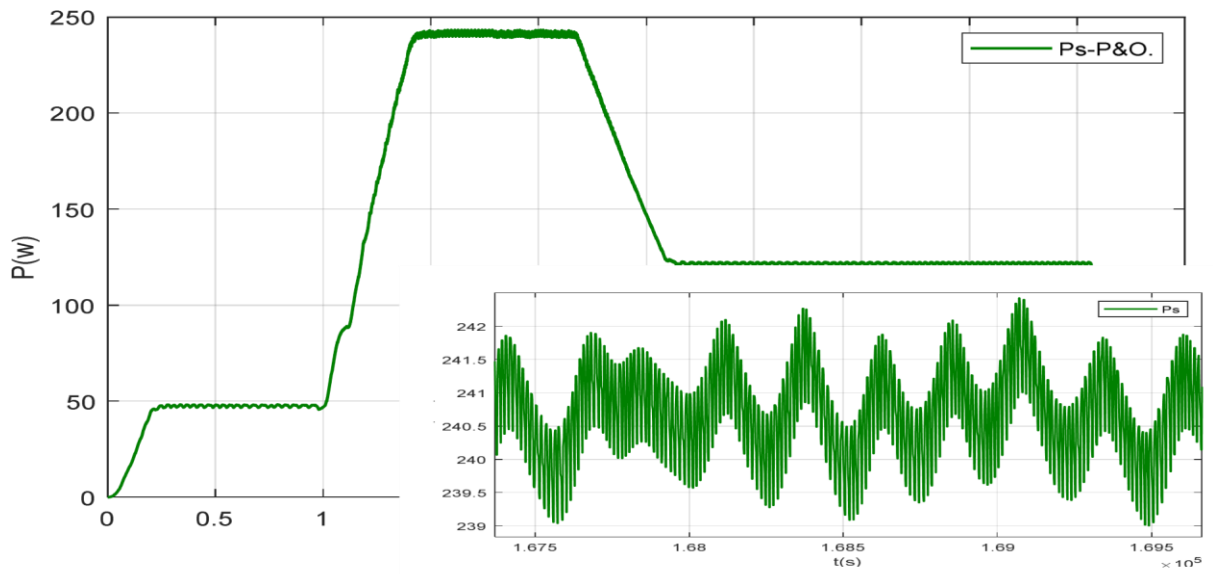
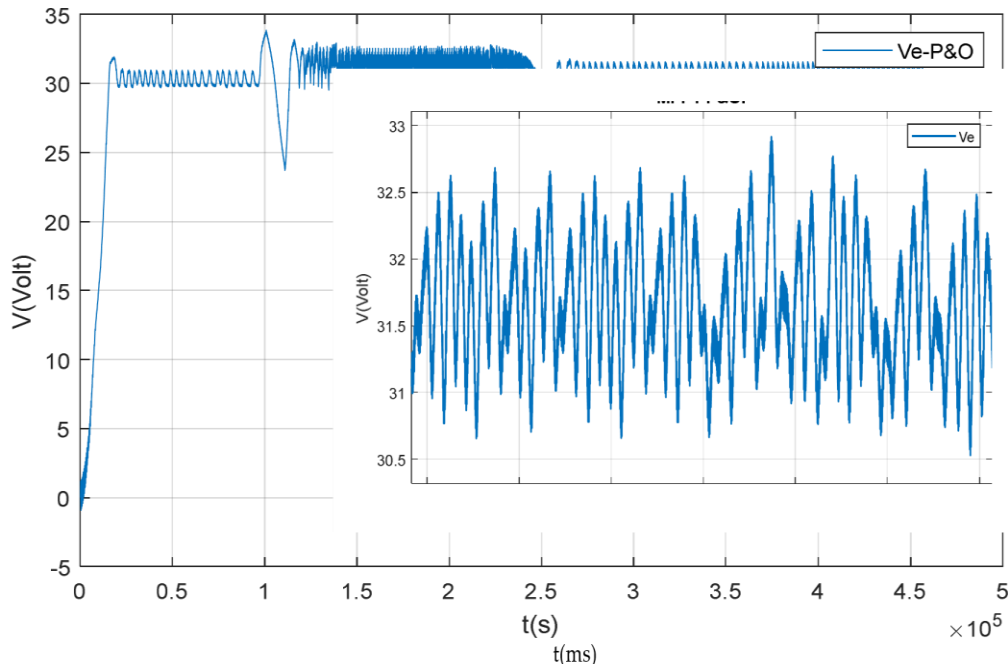
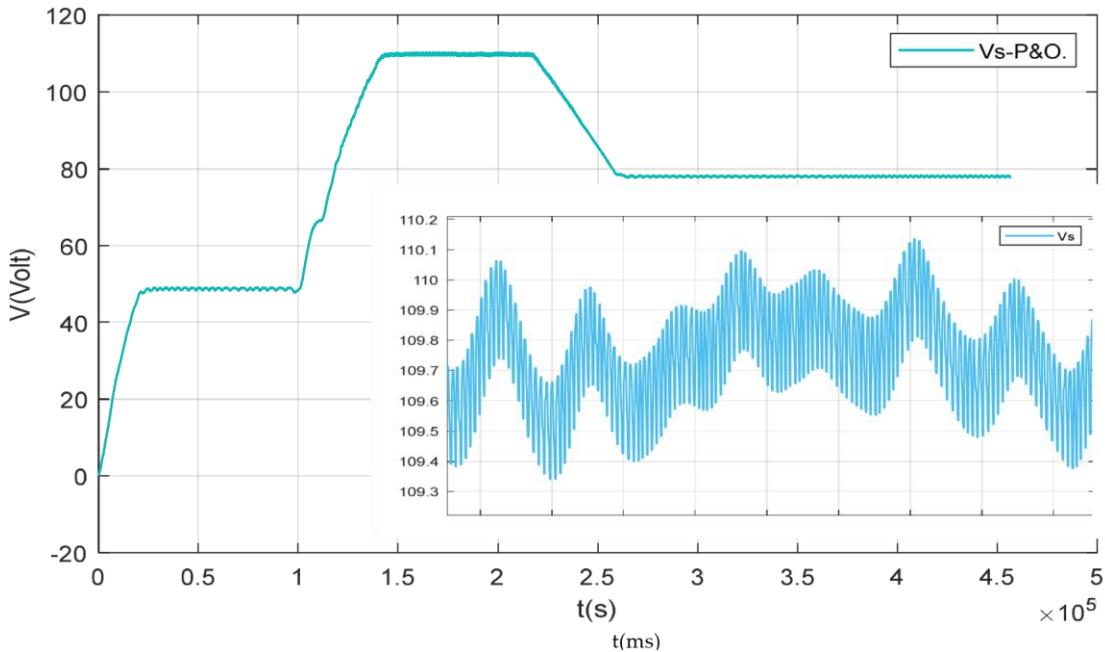


Fig.III.27 Puissance de sortie du système.



**Fig.III.28** Tension aux bornes du générateur photovoltaïque.



**Fig.III.29** Tension de sorti du système

**Analyse des résultats de PO :**

À partir des résultats obtenus, on remarque que malgré que nous avons démarré la simulation avec des conditions initiales nulles, la commande PO a permis de retrouver le point de puissance maximale du panneau ( la même valeur donnée par le constructeur).

Une caractéristique importante sur les oscillations de la courbe. Avec la présence de la commande PO, on remarque que : Pour un pas de 0.01 la courbe du

rapport cyclique illustrée dans la Figure atteint jusqu'à 0.74 avec de grandes oscillations, ce qui conduit à des oscillations importantes de la puissance du PV.

À partir des courbes présentées pour les différents cas de simulation, le hacheur survolteur fournit une tension de sortie  $V_s$  supérieure à celle du générateur photovoltaïque, car :  $D \approx 0.7$ .

Dans le cas du fonctionnement avec l'irradiation variable, on note que le rapport cyclique varie avec l'éclairement dans le but de poursuivre le PPM.

### III.10.3.2 Simulation avec la commande INC.

Cette méthode est basée sur l'évolution de la conductance et la variation de la conductance du générateur PV. Pour atteindre le PPM, il faut comparer à chaque fois la valeur de la conductance avec celle de l'incrément de conductance  $\frac{di}{dv}$ , si l'incrément de conductance est supérieur à l'opposé de la conductance on diminue le rapport cyclique.

La Figure ci-dessous indique un masque de sous-bloc utilisé pour faciliter le paramétrage du rapport cyclique et de la fréquence de la commande.

Subsystem (mask)	
Parameters	
Initial Duty value	<input type="text" value="0.9"/>
Duty upper limit	<input type="text" value="1"/>
Duty lower limit	<input type="text" value="0"/>
Duty increment value	<input type="text" value="0.002"/>
PMPT sample time (s)	<input type="text" value="Ts*10"/>

**Fig.III.30** Masque de paramètre de la commande INC.

#### c. Simulation sous des conditions climatiques stable.

Pour une évaluation les performances du système photovoltaïque de la commande MPPT du type INC, nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement  $1000W/m^2$  et une température de  $25^\circ C$ )

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la commande MPPT « Incremental conduction » sont représentés par les figures suivantes pour un pas de perturbation de 0.01 et 0.002.&

#### **Pas du rapport cyclique $\Delta D=0.01$**

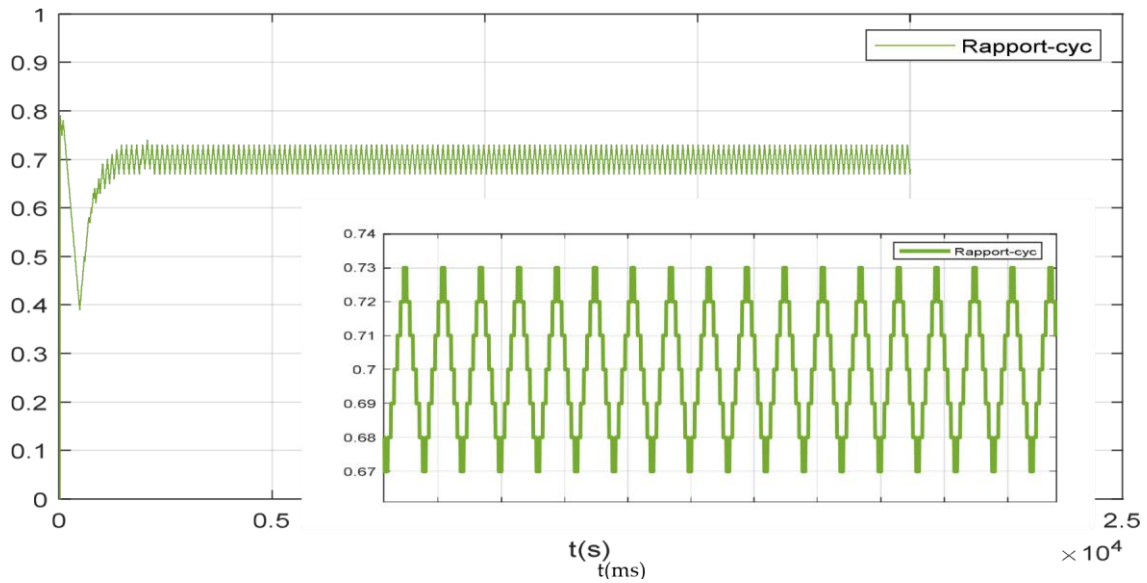


Fig.III.31 Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.01.

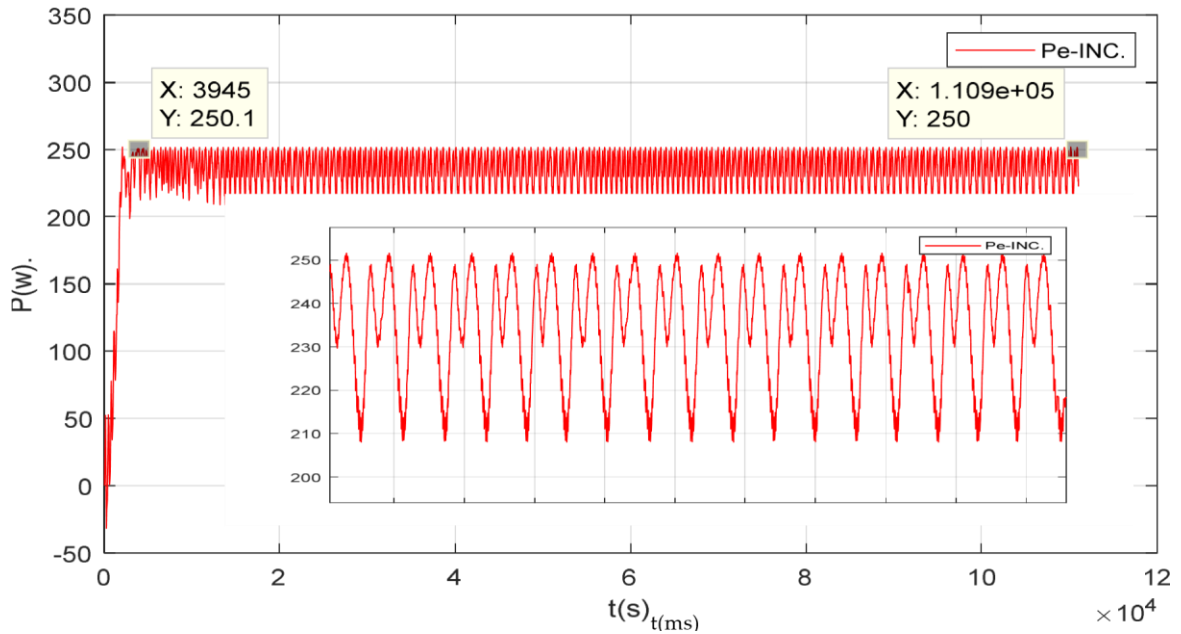


Fig.III.32 Puissance aux bornes du générateur PV pour un pas de 0.01.

Pas du rapport cyclique  $\Delta D=0.002$

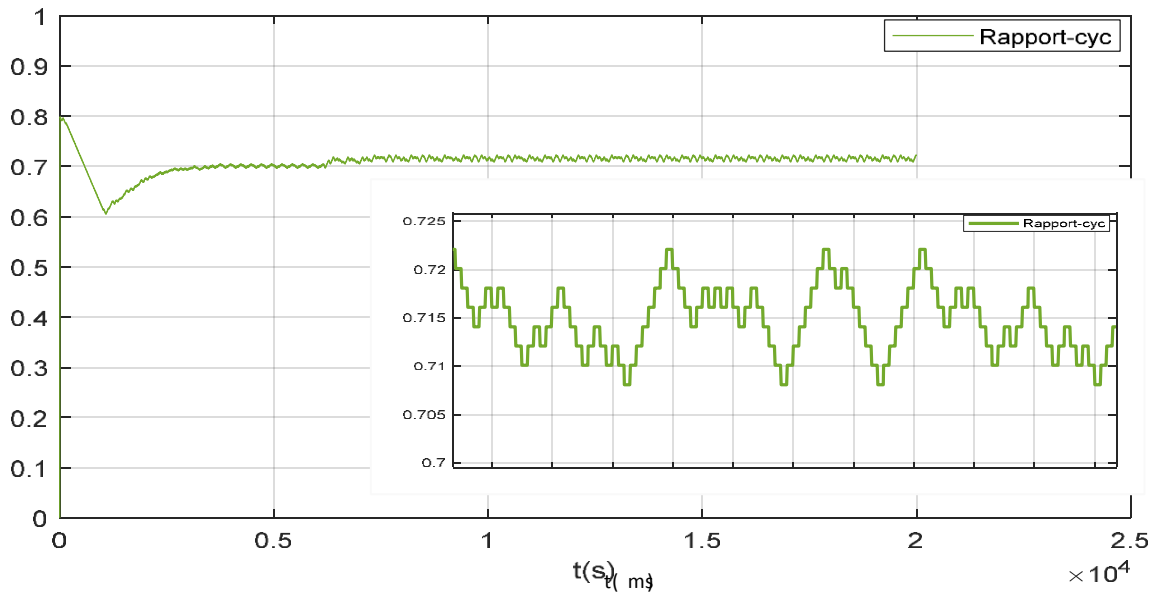


Fig.III.33 Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.002.

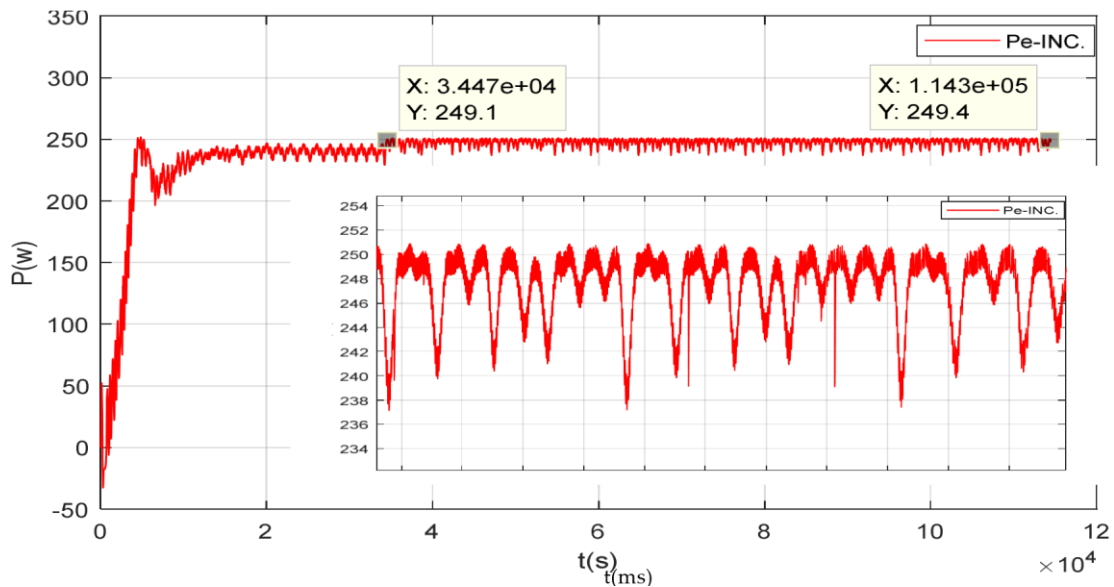


Fig.III.34 Puissance aux bornes du générateur PV pour un pas de 0.002.

**d .Fonctionnement sous des conditions climatiques variables.**

Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous une température fixe à 25°C et un éclairement variable ( $200W/m^2$ ,  $1000W/m^2$ ,  $500W/m^2$ ) comme illustré dans la figure suivante.

La structure nous montre le fonctionnement de la puissance de GPV suivant le changement de l'éclairement, et les figures suivantes nous montrent les résultats.

Pour un pas de 0.002 on a alors :

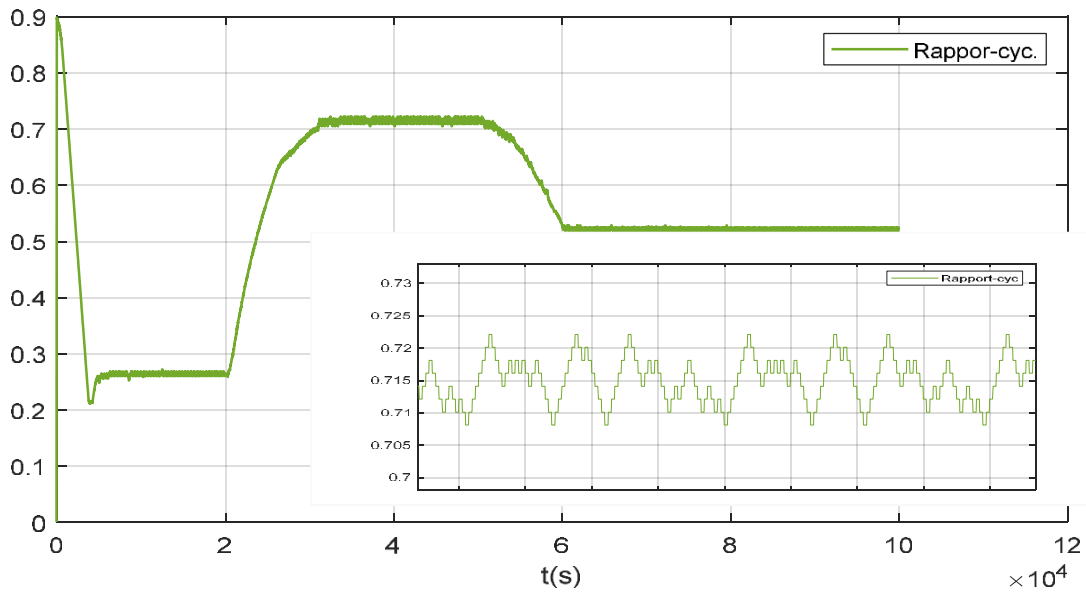


Fig.III.35 Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.002.

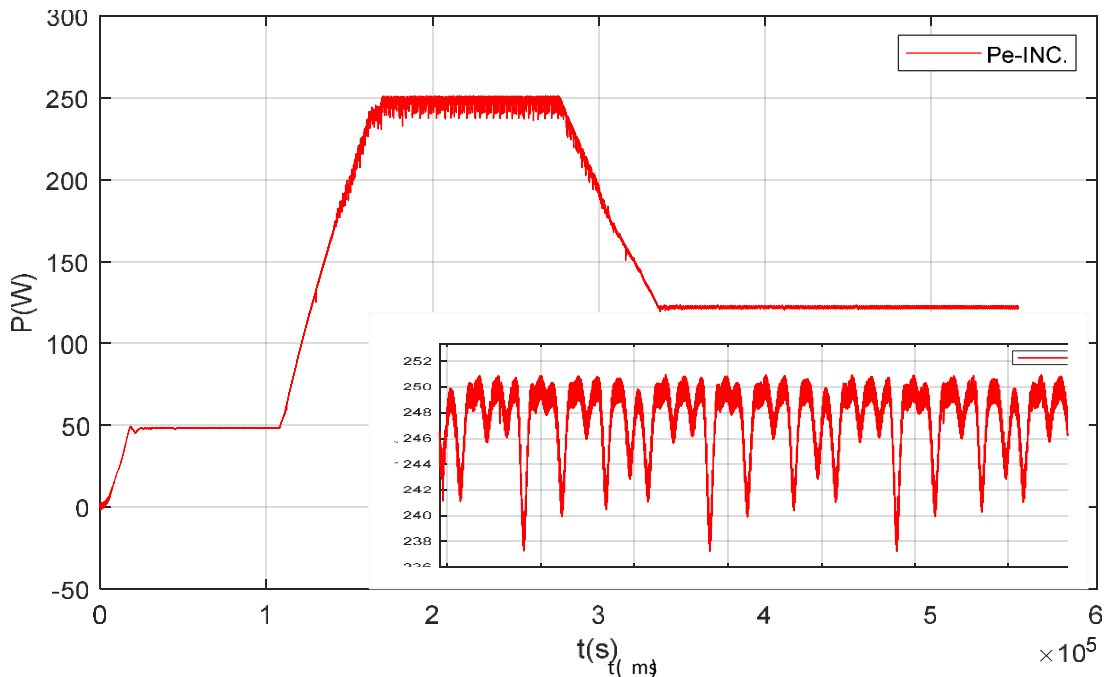


Fig.III.36 Puissance aux bornes du générateur PV.

**Analyse des résultats d'INC**

Comme remarque générale par rapport à l'évolution de la tension et la puissance, malgré que nous avons démarré la simulation avec des conditions initiales nulles, la commande IC a permis de retrouver le point de fonctionnement optimal pour un éclairage et une température standards.

Les résultats de simulation montrent que la commande utilisée répond correctement aux caractéristiques du panneau qui atteint la valeur maximale de la puissance générée avec un temps relativement rapide. Bien qu'un inconvénient se présente durant le régime permanent qui figure des ondulations d'amplitude.

On remarque à partir des paramètres de la commande, de la Figure II.13 et Figure III.30, que pour atteindre la valeur maximale, on a utilisé presque les mêmes paramètres de la commande PO, on note aussi avec la diminution du pas du rapport cyclique, les oscillations autour du point de puissance maximale diminuent ce qui rend le système plus stable.

Pour le fonctionnement dans des conditions d'éclairement variables, on note que la commande INC répond correctement pour les conditions de fonctionnement du système comme il est vérifié pour la commande PO tel que avec l'augmentation de l'éclairement le rapport cyclique diminue bien que la tension de GPV augment suit à celle de la puissance.

**Comparaison entre les deux méthodes :**

	INC	PO
<b>Rapport Cyclique</b>	0.74	0.74
<b>P-GPV</b>	250	250
<b>Ps</b>	234.32	237
<b>V-GPV</b>	34	34
<b>Vs</b>	108	109
<b>Temps attient PPM</b>	0.39	0.4
<b>Temps d'arrêt</b>	11.09	10.37
<b>Amplitude d'oscillation</b>	41	35

*Tableau III.3* Comparaison entre les commandes pour un pas de 0.01.

	INC	PO
<b>Rapport Cyclique</b>	0.723	0.728
<b>P-GPV</b>	250	250
<b>Temps attient PPM</b>	3.44	0.83
<b>Temps d'arrêt</b>	11.43	10.5
<b>Amplitude d'oscillation</b>	15	7

*Tableau III.4* Comparaison entre les commandes pour un pas de 0.002.

Les résultats des tableaux montrent l'efficacité de la commande dans la poursuite du point de puissance maximale. Parlant de la stabilité du système, on note que si le pas du rapport cyclique est grand l'algorithme MPPT répondra rapidement au

changement des conditions de fonctionnement du système, mais les pertes seront accrues dans la stabilité.

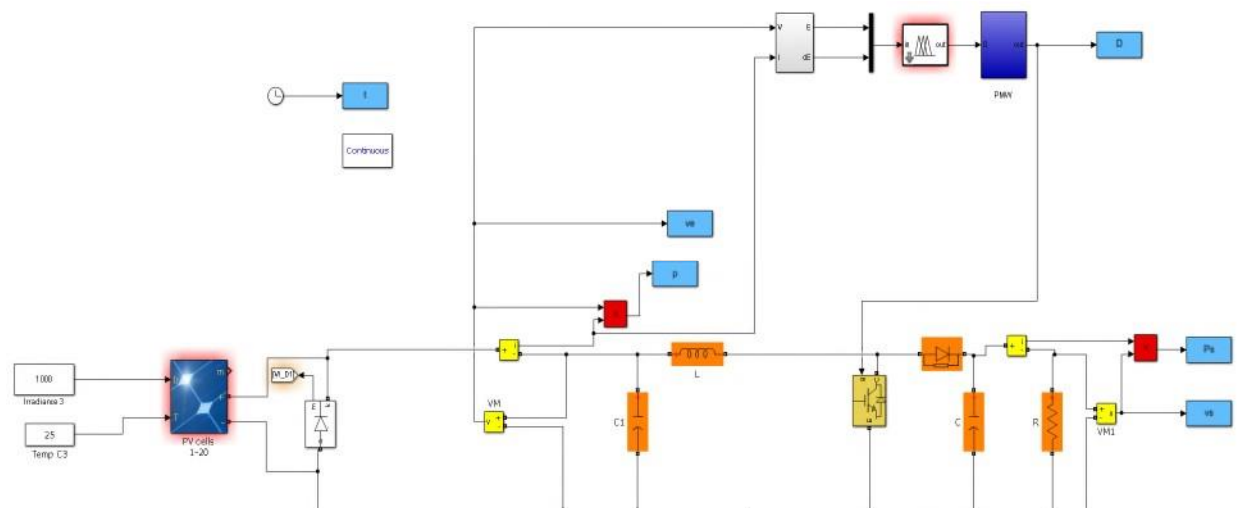
Nous constatons aussi que la technique INC présente des oscillations autour de PPM avec une amplitude plus grande que celle de la Méthode PO, car il est difficile de remplir la condition  $\frac{dp}{dv} = 0$ .

### III.10.3.3 Simulation avec la logique floue.

Précédemment nous avons optimisé les deux commandes PO et INC, le critère a donné des réponses satisfaisantes avec beaucoup de similarités en régime permanent, néanmoins pour certaines réponses le régime transitoire été moins performant.

Pour cela nous avons testé la commande par la logique floue qui représente la commande la plus populaire depuis l'évolution des microcontrôleurs et des capacités de calcul. La commande est déterminée sur la base de la satisfaction de deux critères de variable d'entrée à savoir l'erreur « E » et la variation de l'erreur « CE ».

La technique à commande numérique de MPPT floue a été simulée en utilisant un convertisseur DC-DC sous un environnement MATLAB/SIMULINK, la figure suivante montre le schéma équivalent :



**Fig.III.37** Schéma MATLAB SIMULLINK d'un SPV avec la commande floue

La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes qui sont : la Fuzzification, l'inférence et la Défuzzification. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre II, pour le bon fonctionnement du contrôleur, il faut bien choisir ces paramètres qui sont les fonctions d'appartenance et règles d'inférences. **A. Fonctions d'appartenances.**

Pour chaque variable, on définit cinq (5) fonctions qui sont représentées par des fonctions de triangulaires et trapézoïdales aux extrémités des univers de .

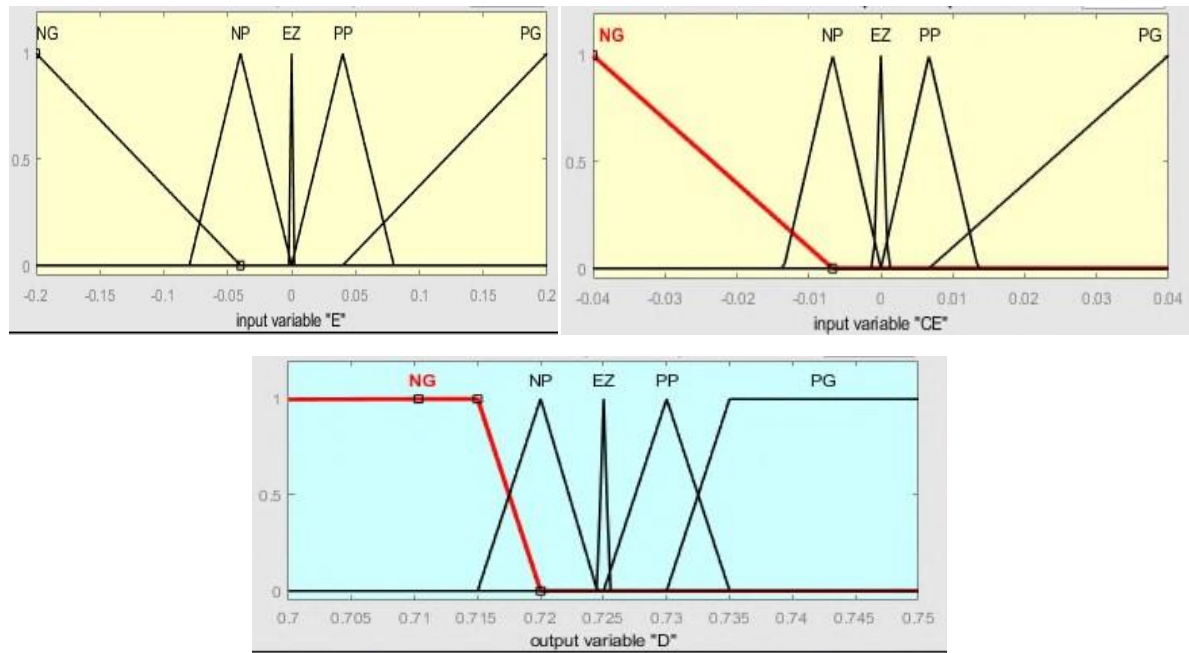


Fig.III.38 Fonction d'appartenance de la logique floue. B. Règles floues.

Le tableau suivant donne l'ensemble des règles qui permettant de déterminer le signal de sortie d'un régulateur MPPT a l'aide des deux signaux d'entrées (E et CE).

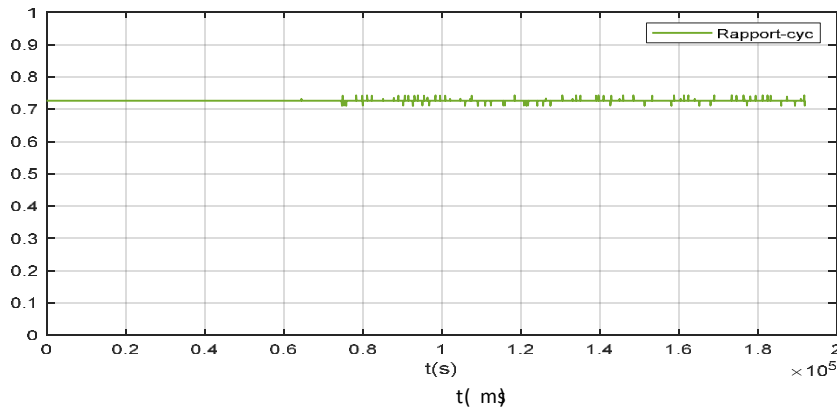
E			CE		
	NG	NP	EZ	PP	PG
NG	PG	NG	NG	NP	NP
NP	PG	NG	NG	NP	NP
EZ	NP	NP	NP	PG	PG
PP	NP	PG	PP	NG	PG
PG	NG	NG	PG	PP	PG

Tableau.III.5 Règle d'inférence de la commande par logique floue

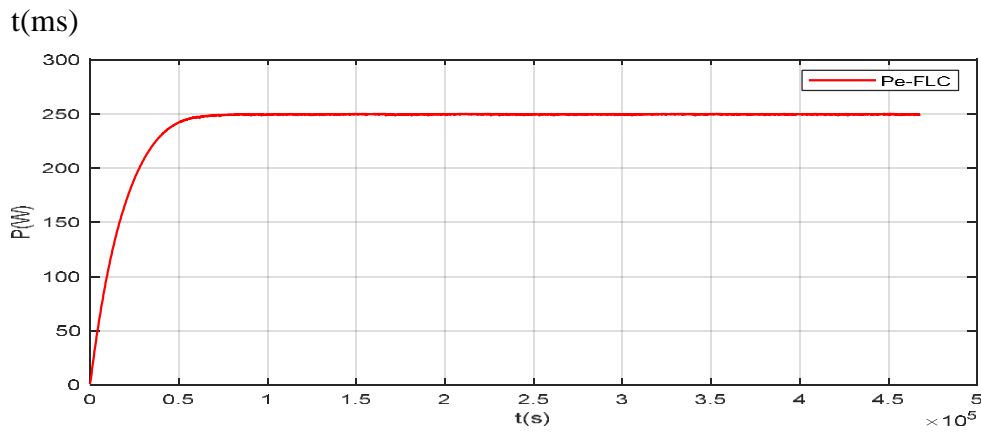
*Simulation sous des conditions climatiques stables.*

Pour une évaluation des performances du système photovoltaïque avec la commande de la logique floue nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement  $1000W/m^2$  et une température de  $25^{\circ}C$ )

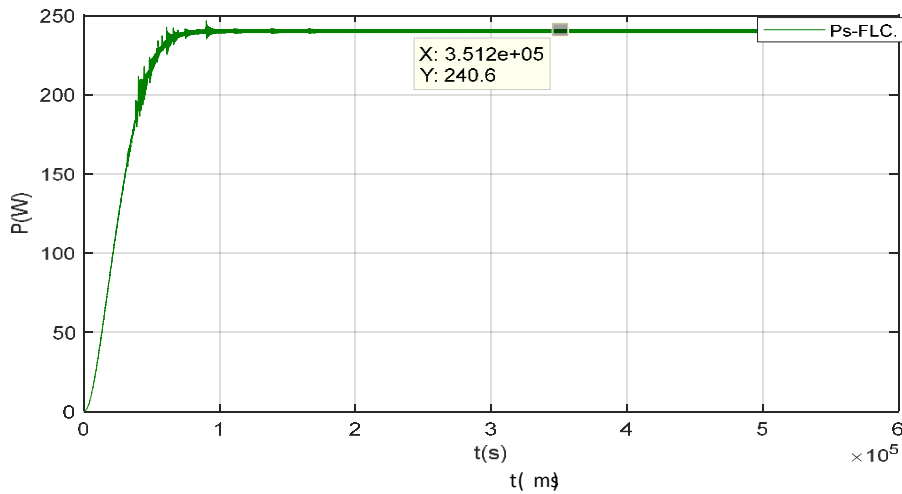
Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la commande MPPT «logique flou» sont représentés par les figures suivantes :



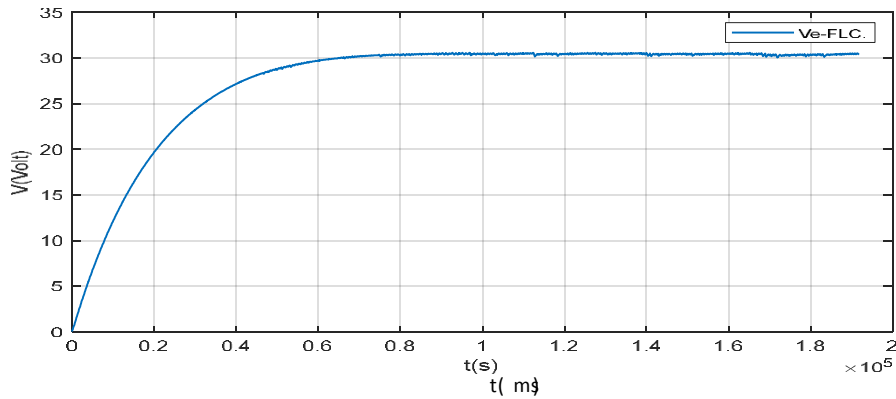
**Fig.III.39** Courbe du rapport cyclique.



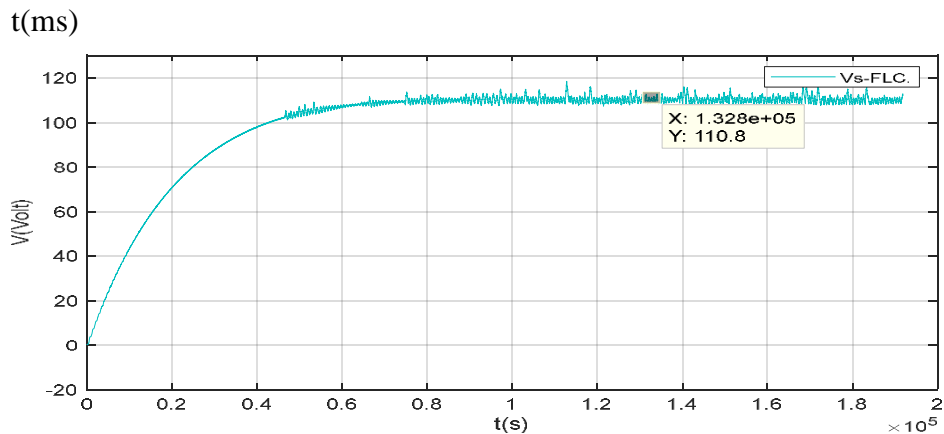
**Fig.III.40** Puissance de sortie avec la logique floue.



**Fig.III.41** Puissance d'entrée avec la logique floue.



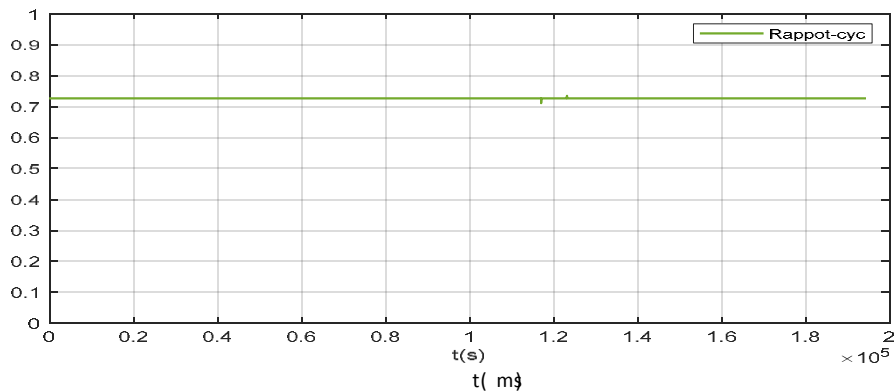
**Fig.III.42** Tension de sortie avec la logique floue.



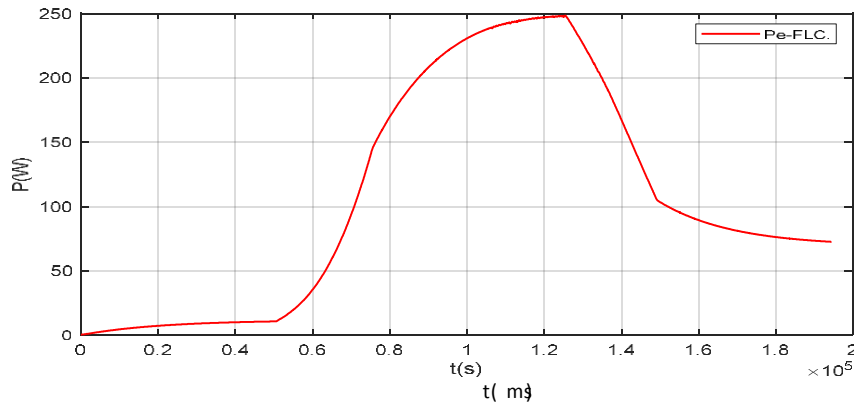
**Fig.III.43** Tension d'entrée avec la logique floue.

**e. Fonctionnement sous des conditions climatiques variables.**

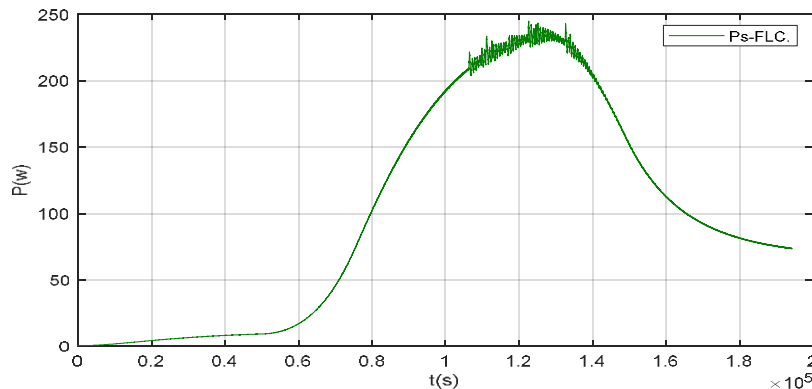
Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous une température fixe à 25°C et un éclairement variable ( $200W/m^2$ ,  $1000W/m^2$ ,  $500W/m^2$ ,) comme illustré dans la figure suivante.



**Fig.III.44** Courbe du rapport cyclique pour un ensoleillement variable.



**Fig.III.45** Puissance de sorti avec la logique floue.



**Fig.III.46** Puissance d'entrée avec la logique floue.

#### Analyse des résultats de la commande floue :

Les résultats obtenus, Figure III.40 et Figure III.41, montrent que le contrôle à base de la logique floue répond correctement aux caractéristiques du panneau. La puissance électrique générée par le panneau solaire est toujours maintenue à sa puissance maximale, quelles que soient les conditions atmosphériques.

Le contrôle par la logique floue est un pas vers une approche mathématique précise basée sur la prise de décision, ou l'expertise, humaine. L'algorithme basé sur la logique floue est une technique robuste et efficace qui fonctionne, dans le cas du MPPT, au point optimal. Cependant, l'implémentation de ce type de commande est plus complexe que les algorithmes classiques. La difficulté principale consiste à bien choisir les paramètres de la commande floue (le choix des fonctions d'appartenance et des règles d'inférence). C'est pour cela qu'on va opter à l'optimisation de ce contrôleur, dans le cas de l'ombrage partiel, avec une approche évolutionnaire.

## CONCLUSION

Ce chapitre présente les méthodes de commande Maximum Power Point Tracking et les résultats obtenus grâce à trois méthodes de contrôle MPPT appliquées à un générateur PV.

Le travail a été réalisé dans un environnement MATLAB / SIMULINK. Nous calculons deux scénarios : conditions climatiques idéales (25 degrés et 1000 W/m<sup>2</sup>) et

mi-ombre. Nous avons mené une étude comparative entre trois méthodes MPPT, la première est la méthode P&O, la deuxième est la méthode INC et la troisième est la méthode de contrôle flou. Dans le cas de conditions météorologiques normales, les trois méthodes donnent d'assez bons résultats. Cependant, d'après les résultats obtenus, en ombre partielle, la commande par logique floue donne des résultats très compétitifs par rapport aux deux autres méthodes.



*CONCLUSION Générale*



*CONCLUSION Générale*

Ce travail est un 2ème mémoire de Master en Automatique réalisé à l'Université El-Oued Hama Lakhdar.

Sur contrôleur MPPT pour panneaux photovoltaïques. Il peut être considéré comme une étude comparative entre trois méthodes MPPT, à savoir P&O, INC et la commande par logique floue. L'objectif principal est de mettre en évidence la manière dont.

Il résulte de l'extraction de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

Pour atteindre cet objectif, après avoir introduit des généralités aux systèmes PV, nous avons commencé par la modélisation mathématique du panneau PV. Le modèle obtenu formalise l'assemblage des cellules en série ou en parallèle en fonction des caractéristiques de la plaque considérée.

La visualisation de ce modèle nous a permis de développer un diagramme SIMULINK pour notre système. Dans des conditions atmosphériques normales, les cellules du panneau sont exposées à une température de 25°C et à un éclairage de 1000 W/m<sup>2</sup>. Puissance Le panneau photovoltaïque peut alors être connecté à 250 W. Après l'étape de modélisation, nous nous sommes concentrés sur le problème de maximisation de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Pour ce faire, nous avons testé et comparé plusieurs méthodes MPPT à savoir la méthode « P&O », la méthode « INC » et la commande par logique floue. Les résultats montrent que toutes les méthodes.

Il a été testé avec succès dans des conditions météorologiques standard jusqu'au point MPP. Cependant, nous avons constaté que les méthodes « P&O » et « INC » affichent des oscillations autour du MPP, tandis que le contrôle flou donne la meilleure réponse en termes de précision. Nos simulations ne se limitaient pas aux conditions météorologiques standard.

De cette façon

Étude on peut dire:

- ✓ Le convertisseur booster DC-DC est un convertisseur idéal pour le système. Il permet d'obtenir une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le GPV.
- ✓ L'utilisation du contrôle MPPT améliore l'efficacité des installations photovoltaïques.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

- ✓ Le contrôle flou est efficace, mais il nécessite un agent expert pour construire des fonctions d'appartenance et des règles d'inférence

- [1] Beauvais A, Chevillard N, Paredes MG, Heisz M, Rossi R, Schmela M. Global Market Outlook For Solar Power / 2019 - 2023: Power FS. Mobilising Investments in Emerging Markets. Sol Power Eur 2019 2019.
- [2] Petibon S. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. Thèse de doctorat. Université de Toulouse III T-Paul Sabatier, 2010.
- [3] Bun L. Détection et localisation de défauts pour un système PV. Thèse de doctorat. Université de Grenoble, 2011.
- [4] Bessemoulin P, Oliviéri J. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. *Physique Atmosphérique La Météorologie* 8ème Série - N° 31 - Sept 2000:42–59.
- [5] Cottier J-M, Mermoud A, Viloz M, Graf J. Centrales photovoltaïques Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs. Programme d'action PACER – Energies renouvelables. Office fédéral des questions conjoncturelles; 1996.
- [6] Mambrini T. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Thèse de Doctorat. Université ParisSud École doctorale : STITS, 2014.
- [7] Poulain G. Procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement. Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2014.
- [8] Aouchiche N, Ait Cheikh MS, Becherif M, A EM, Hadjarab A. Fuzzy Logic Approach Based Mppt for the Dynamic Performance Improvement for PV Systems. *Solar Power Europe*; 2019. <https://doi.org/10.1109/ICEE-B.2017.8191986>.
- [9] Villalva MG, Gazoli JR, Ruppert Filho E. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. *2009 Brazilian Power Electron Conf COBEP2009* 2009:1244–54. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2009.5347680>.
- [10] Bouilouta A, Mellit A, Kalogirou SA. New MPPT method for stand-alone photovoltaic systems operating under partially shaded conditions. *Energy* 2013;55:1172–85. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.038>.
- [11] Boukenoui R, Salhi H, Bradai R, Mellit A. A new intelligent MPPT method for stand-alone photovoltaic systems operating under fast transient variations of shading patterns. *Sol Energy* 2016;124:124–42. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.11.023>.
- [12] Aouchiche N, Becherif M, HadjArab A, Aitcheikh MS, Ramadan HS, Cheknane A. Dynamic Performance Comparison for MPPT-PV Systems using Hybrid

- Pspice/Matlab Simulation. Int J Emerg Electr Power Syst 2016;17:529–39.  
<https://doi.org/10.1515/ijeeps-2016-0074>.
- generation system. Energies 2015;8:6841–58. <https://doi.org/10.3390/en8076841>.
- [13] Mohammadnejad S, Khalafi A, Ahmadi SM. ScienceDirect Mathematical analysis of totalcross-tied photovoltaic array under partial shading condition and its comparison with other configurations. Sol Energy 2016;133:501–11.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.058>.
- [14] Kumar A, Gupta N, Gupta V. A Comprehensive Review on Grid-Tied Solar Photovoltaic System 2017;7:213–54. <https://doi.org/10.13052/jge1904-4720.71210>.
- [15] Wang Y, Hsu P. An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells. Energy 2011;36:3069–78.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.052>
- [16] Minh TC. Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau , aspects contrôle / commande et rejet de perturbations. Thèse de doctorat. Université de Grenoble, 2012.
- [17] E. Lorenzo, ‘*Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic System*’, Progensa, Sevilla, 1994.
- [18] W. De Soto, S.A. Klein and W.A. Beckman, ‘*Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance*’, Solar Energy, Vol. 80, N°1, pp.78 - 88, 2006.
- [19] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed « Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models »7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, Août 2002.
- [20] C. ROMBAUT, G SEGUIER. R. BAUSIERE Les convertisseurs de l’Électronique de Puissance. Tome 2 : La conversion alternatif-alternatif. 2ème édition. TEC-DOC LAVOISIER)
- [21] A. Courteix, Y. Cheron, H. Foch, M. Metz. Application à un convertisseur continu-alternatif complexe d’une méthode systématique de synthèse. Revue de Physique Appliquée, 1986, 21 (6), pp.357-364.
- [22] S. M. Ait-Cheikh, «*Etude, Investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*», Thèse de Doctorat d’état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [23] BENSACI Wafa, Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, Master, Univ Kasdi Merbah–Ouargla,2012.

- [24] HANANOU.F. ROUABAH.A, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque, Master, Univ Kasdi Merbah–Ouargla,2014
- [25] Hussein KH, Muta I, Hoshino T, Osakada M (1995) Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. IEE Proc Gener Trans Distrib 142 (1):59
- [26] S.Lhlah ‘ ’ Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incrémental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C)’ ’ Mémoire Magister université El hadj Lakhdar Batna 2007.
- [27] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, and Yong Kang. A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 7, JULY 2008.
- [28] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, «*Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque* », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [29] T. Esumi, P.L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439- 449, June 2007.
- [30] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, "Improved MPPT Algorithms for Rapidly Changing Environmental Conditions," in Proc. 12th International Conference on Power Electronics and Motion Control, 2006, pp. 1614-1619.
- [31] J. Li, H. Wang, "Maximum power point tracking of photovoltaic generation based on the fuzzy control method," in Proc. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009, pp. 1-6.
- [32] S. Yuvarajan, S. Xu, "Photo-voltaic power converter with a simple maximum-powerpoint-tracker," in Proc. International Symposium on Circuits and Systems, 2003, vol. 3, pp. 399-402.
- [33] M. Bodur, M. Ermis, "Maximum power point tracking for low power photovoltaic solar panels," in Proc. 7th Mediterranean Electrotechnical Conference, 1994, vol. 2, pp. 758- 761.
- [34] C. Zhang, D. Zhao, J. Wang, G. Chen, "A modified MPPT method with variable perturbation step for photovoltaic system," in Power Electronics and Motion Control Conference, 2009, pp. 2096-2099.

[35] Nedjma Aouchiche. Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque.. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, 2020. Français. NNT: 2020UBFCA001. tel-02902953