

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Echahid Hamma *Lakhdar el oued***  
**Faculté Des Sciences et de Technologies**  
**Département Des Sciences et Technologie**



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQU

**Domaine :** Science e Technologie

**Spécialité :** Electromécanique

**THEME**

**ETUDE DE COMMONDE MPPT D'UN  
SYSTÈME PHOTOVOLTAIQUE A  
L'AIDE D'UN CONTROLE FLOU**

**PRESNTER PAR :**

-BEGGAS hamza elabbas

-ZAROUANA ilyas

-Tlipa mohamed yazid

-Allag mosbah

**Encadreur :**

Dr. BENAMOR AFAF

**Année universitaire 2023/2024**

# Remerciement

Louanges et remerciements soient rendus au Dieu Unique, sans aucun associé. C'est à Lui que reviennent toutes les louanges et la gratitude. En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers mes vénérables parents, que Dieu les protège, ainsi qu'envers tous ceux qui m'ont apporté leur soutien dans cette vie, notamment mon père et mes frères. Et mes sœurs... Je remercie également nos professeurs et éminents collègues. J'adresse aussi mes sincères remerciements au professeur LAOUAMER mosbah pour son aide scientifique et moral précieux, ainsi qu'à Madame BENAMOR afaf et à l'ensemble des enseignants qui nous ont aidé à mener à bien cette remarque.

# Sommaire

Liste des figure	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Liste des abréviations	
Introduction générale .....	1

## *Chapitre I: Généralité sur le système de Photovoltaïque*

I.1. Introduction .....	2
I.2. Historique .....	2
I.3. Panneau Photovoltaïque .....	3
I.4. Système photovoltaïque .....	4
I.4.1. Système photovoltaïque autonome .....	4
I.4.2. Système photovoltaïque raccorde au réseau .....	5
I.4.3. Système photovoltaïque hybride .....	5
I.5. L'effet photovoltaïque .....	6
I.6. Cellule solaire .....	6
I.6.1.Principe travail La cellule Photovoltaïque .....	6
I.6.1.1. le mariaux demi-conducteur .....	7
I.6.1.2. les demi-conducteur intrinsèques .....	8
I.6.1.3. les demi-conducteur extrinsèques .....	8
I.6.2. Types de cellule PV .....	10
I.6.2.1. les cellules mono-cristalline .....	10
I.6.2.2. les cellules poly-cristallines .....	10
I.6.2.3. les cellules amorphes .....	10
I.6.3.Caractéristique électriques de cellule PV .....	11
I.6.3.1. Paramètres dun cellules PV .....	12
I.7. Effet des paramètres externes sur un module photovoltaïque .....	14
I.7.1. Effet de le radiation .....	14
I.7.2. Effet de la température .....	14
I.8. Avantage et inconvénients d'énergie PV .....	15
I.9.Conclusion .....	16

## ***Chapitre II: Modélisation sur le système Photovoltaïque***

II.1. Introduction .....	17
II.2. Modélisation des modules photovoltaïque .....	17
II.2.1. Modélisation de Différent paradigme d'une cellule photovoltaïque.....	17
II.2.1.1. Paradigme parfa.....	17
II.2.1.2. Paradigme à 1 diode sans Rsh .....	19
II.2.1.3. Paradigme à 2 diodes sans Rsh .....	19
II.2.1.4. Paradigme a 2 diodes avec Rsh .....	20
II.3. Modélisation de panneau PV .....	21
II.4. Convertisseur DC/DC .....	22
II.4.1. Définition .....	22
II.4.2. Type de hacheur .....	23
II.4.2.1. Hacheur dévolteur (Buck) .....	23
II.4.2.2. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost).....	23
II.4.2.3. Hacheur survolteur (Boost) .....	24
II.4.3. Modélisation d'un hacheur boost .....	24
II.5. Avantages de convertisseur BOOST .....	25
II.6. Conclusion .....	25

## ***Chapitre III: Techniques de maximation de la puissance***

III.1 Introduction .....	26
III.2. les fonctionnement de Conversion sur les Systèmes PV.....	26
III.2.1. Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.....	26
III.2.2. Convertisseur dC-dC .....	27
III.2.3. Etage d'adaptation de type boost .....	28
III.2.4. Paradigme mathématique .....	29
III.3. Ordres pour la Recherche du PPM MPPT .....	29
III.3.1. Fonctionnement de la MPPT.....	29
III.4. Assortiment de l'ordre MPPT .....	31
III.4.1. Assortiment des ordres MPPT selon les paramètres d'entrée.....	31
III.4.2. Assortiment de l'ordre MPPT conformément le type de recherche.....	32
III.5. les Algorithmes MPPT .....	32
III.5.1. Approche de la tension constant.....	33
III.5.2 Approche du courant constant .....	34
III.5.3 Perturbation Et observation (P&O.).....	36

III.5.4. Conductance incrémentale .....	41
III.5.5 L'ordre MPPT floue .....	44
III.5.6 Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels.....	46
III.6. Critères d'évaluation d'une ordre MPPT .....	48
III.6.1. Simplicité et cout .....	48
III.6.2. Repense dynamique .....	49
III.6.3. Flexibilité .....	49
III.6.4 Compétitive sur une large gamme de puissance .....	49
III.7. Conclusion.....	49

### *Chapitre IV : Simulation, résultats et discussions*

IV.1. Introduction .....	51
IV.2. Simulation .....	51
IV.2.1. Simulation d'un PV .....	51
IV.2.1.1 Caractéristiques de Module PV .....	53
IV.2.2. Simulation du convertisseur Boost .....	54
IV.2.2.1. Caractéristiques de convertisseur .....	54
IV.2.3. Simulation du MPPT flou .....	55
IV.3. Simulation du PV avec MPPT et un convertisseur BOOST .....	58
IV.4. Résultats et discussions .....	58
IV.4.1. Comportement du système face à un changement de température .....	59
IV.4.1.1. Discussion de Résultats .....	59
IV.4.2. Comportement du système face à un changement de l'éclairement .....	60
IV.4.2.1. Discussion de Résultats .....	60
IV.5. Conclusion .....	61
Conclusion générale .....	62

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralité sur le système de Photovoltaïque

Figure I.1 image correspondante à un panneau photovoltaïque .....	3
Figure I.2. Schéma représentatif d'une association série/parallèle .....	3
Figure I.3. Système photovoltaïque autonome .....	4
Figure I.4. Système photovoltaïque raccordé au réseau .....	5
Figure I.5. Système hybride PV-Eolien .....	5
Figure I.6. Exemplification modèle d'une cellule pv .....	7
Figure I.7. l'alliage est de type n .....	8
Figure I.8. l'alliage est de type p .....	9
Figure I.9. jonction p-n.....	9
Figure I.10. Les images des différents types de cellule photovoltaïque .....	11
Figure I.11. modèle électrique équivalent permettant de représenter le comportement d'une cellule photovoltaïque .....	11
Figure I.12. l'effet de la radiation sur les caractéristiques I-V pour une température constante .....	14
Figure I.13. l'effet de la température sur les caractéristiques I-V pour une température constante .....	15

### Chapitre II : Modélisation sur le système PV

Figure II.1. Modèle électrique équivalent représenter Paradigme parfait d'une cellule pv .....	18
Figure II.2. Modèle électrique équivalent représenter Paradigme 1 diode sans Rsh.....	19
Figure II.3. Modèle électrique équivalent représenter Paradigme 2 diode sans Rsh .....	20
Figure II.4. Modèle électrique équivalent représenter Paradigme 2 diode sans Rsh .....	21
Figure II.5. Schéma électrique d'une cellule solaire à 2 diodes avec Rsh .....	21
Figure II.6. convertisseurs dc-dc .....	22
Figure II.7. Schéma électrique du convertisseur Buck .....	23
Figure II.8. paradigme du convertisseur dévolteur-survolteur .....	24
Figure II.9. Schéma électrique du convertisseur Boost .....	24

### Chapitre III : Techniques de maximation de la puissance

Figure.III.1. Etage d'adaptation entre un GPV et une charge .....	27
Figure.III.2. Étage d'Adaptation de Type BOOST .....	28

Figure.III.3 Chaîne de conversion d'énergie solaire .....	30
Figure.III.4 Principe de la commande MPPT .....	30
Figure.III.5 Algorithme de la Tension constant .....	33
Figure.III.6 Algorithme du constant courant .....	35
Figure.III.7 Recherche du PPM par la méthode .....	36
Figure.III.8 L'algorithme de P&O classique .....	37
Figure.III.9 Divergence de la méthode P&O .....	38
Figure.III.10 algorithme du poids d'un troisième point .....	39
Figure.III.11 Positionnement du point de fonctionnement ( $G=1kW/m^2$ , $T=25C^\circ$ ).....	41
Figure.III.12 Algorithme MPPT Incrément de Conductance (Inc.CoN) .....	42
Figure.III.13 Structure de base de la commande floue .....	44
Figure.III.14 Exemple d'un réseau de neurones .....	46

### *Chapitre IV: Simulation, résultats et discussions*

Figure IV.1 Schéma bloc sous Simulink du PV Array .....	51
Figure IV.2 Caractéristiques Puissance (V) et courant (V) de PV sous constant.....	53
Figure IV.3 Schéma bloc sous Simulink du convertisseur Boost .....	54
Figure IV.4 Schéma de block de la commande MPPT flou.....	55
Figure IV.5 Fonction d'appartenance pour les entrées CE. ....	56
Figure IV.6 Fonction d'appartenance pour la sortie dD(K) .....	56
Figure. IV.7 Schéma MATLAB-SIMULINK avec une commande MPPT .....	58
Figure IV.8 Puissance du panneau avec la commande MPPT floue .....	58
Figure IV.9 Puissance du panneau avec la commande MPPT floue Pour $T = 25/50^\circ C$ et $E = 1000W/m^2$ .....	59
Figure IV.10 Puissance du panneau avec la commande MPPT floue Pour $T = 25^\circ C$ et $E = 500 - 1000 W/m^2$ . ....	60

## *Liste de tableau*

Tab.III.1. Examinons l'exemple d'une table de vérités correspondant à un raisonnement logique flou.....	45
Tab.IV.1. Caractéristiques de panneau pv Array 230W-M6-G .....	53
Tab.IV .3. Table à quatre class .....	57

## *Liste des symbols*

- V<sub>pv</sub>** : Tension de sortie de la cellule (V).
- I<sub>pv</sub>** : Courant de sortie de la cellule, (A).
- I<sub>ph</sub>** : Courant photo-généré ou photo-courant (A).
- I<sub>sat</sub>** : Courant de saturation de la diode (A).
- K** : Constant de Boltzmann ( $k= 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/k).
- T** : Température absolue de fonctionnement de la jonction (k°).
- n** : Facteur d'idéalité de la diode ( $n \in [1, 3]$ ).
- R<sub>s</sub>** : Résistance série, ( $\Omega$ ).
- R<sub>p</sub>** : Résistance parallèle ( $\Omega$ ).
- D** : diode.
- I<sub>D</sub>** : Courant de diode (A).
- I<sub>P</sub>** : Le courant dérive par la résistance parallèle
- ICC** : Le courant de court-circuit de reference (A).
- VCO** : La tension de circuit ouvert. (V).
- $\eta$**  : Rendement.
- N<sub>s</sub>** : Nombres solaires en série
- V<sub>mpp</sub>** : Tension d'un module PV au point de puissance maximale (V).
- S** : Surface du module photovoltaïque (m<sup>2</sup>).
- P** : puissance active (W).
- Q** : puissance reactive (W).
- A** : facteur de qualité de la diode. ( $KT/q$ ) représente le potentiel thermique.
- P<sub>max</sub>** : puissance maximum (w).
- I<sub>mpp</sub>** : Courant d'un module PV au point de puissance maximale (A).
- N<sub>p</sub>** : Nombres solaires en parallèle.
- V<sub>g</sub>** : la tension de seuil de la diode (1.12 eV)
- A** : Est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1.
- N** : Facture de non idéalité de la jonction.
- Q** : Charge d'électron  $q= 1.6 \cdot 10^{-19}$ (c).

## *Liste des abréviations*

<b>DC</b>	courant continu.
<b>AC</b>	courant alternatif
<b>FF</b>	Facteur de forme
<b>PV</b>	photovoltaïque.
<b>GPV</b>	Générateur Photovoltaïque.
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking.
<b>MPP</b>	Maximum Power Point.
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et Observation
<b>INC</b>	Conductance Incrémentale.
<b>FLC</b>	Contrôle Logique Floue
<b>PI</b>	Régulateur Proportionnel Intégral.
<b>STC</b>	Conditions standards

## Résumé :

Les performances des générateurs photovoltaïques (GPV) sont étroitement liées aux facteurs climatiques tels que l'intensité lumineuse et la température. Afin d'améliorer les performances de ce système, il est nécessaire de surveiller le point de puissance maximale (MPP). En temps réel, ou ce qu'on appelle le point de fonctionnement idéal. Ce travail porte sur l'étude et la simulation, à l'aide de MATLAB-SIMULINK, d'un contrôle basé sur la logique floue pour surveiller le point de puissance maximale d'un système photovoltaïque, sous les constantes de rayons lumineux et de température. Les résultats de simulation sont présentés pour l'hélicoptère Boost et le système d'hélicoptère Boost PV, avec le cycle de service de contrôle maintenu constant. Enfin, les performances du contrôle MPPT basé sur la logique floue sont évaluées pour différentes configurations de fonctions d'appartenance.

## مُلَخَّصٌ

يرتبط أداء المولدات الكهروضوئية (GPV) ارتباطاً وثيقاً بالعوامل المناخية مثل شدة الضوء ودرجة الحرارة. و من أجل تحسين أداء هذا النظام، من الضروري مراقبة نقطة الطاقة القصوى (MPP). في الوقت الفعلي، أو ما تسمى بنقطة التشغيل المثالية. يركز هذا العمل على الدراسة والمحاكاة، باستخدام MATLAB-SIMULINK، للتحكم المعتمد على المنطق الضبابي لمراقبة نقطة الطاقة القصوى للنظام الكهروضوئي، في ظل ثوابت اشعة الضوء ودرجة الحرارة. يتم عرض نتائج المحاكاة لمروحية Boost ونظام المروحية Boost PV، مع تثبيت دورة عمل التحكم. وأخيراً، يتم تقييم أداء التحكم MPPT القائم على المنطق الغامض لتكوينات مختلفة من وظائف العضوية.

## Abstract

The performance of photovoltaic generators (GPV) is closely related to climatic factors such as light intensity and temperature. In order to improve the performance of this system, it is necessary to monitor the maximum power point (MPP). In real time, or the so-called ideal operating point. This work focuses on the study and simulation, using MATLAB-SIMULINK, of a fuzzy logic-based control to monitor the maximum power point of a photovoltaic system, under the constants of light rays and temperature. Simulation results are shown for the Boost helicopter and the Boost PV helicopter system, with the control duty cycle held constant. Finally, the performance of fuzzy logic-based MPPT control is evaluated for different configurations of membership functions,

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

La demande mondiale d'énergie continue de croître, tirée par la croissance démographique et le développement économique à l'échelle mondiale. Cependant, cette demande croissante conduit à l'épuisement des réserves de combustibles fossiles, exacerbant les problèmes environnementaux et contribuant au réchauffement climatique. Face à ces énormes défis, les scientifiques du monde entier s'efforcent de trouver des solutions viables.

Parmi ces solutions figurent les énergies renouvelables comme l'énergie solaire. De nombreux pays investissent massivement dans ce domaine, cherchant à concilier production d'énergie et préservation de l'environnement, l'énergie solaire, qu'elle soit directe ou indirecte, apparaissant comme la plus prometteuse, soutenue par des progrès technologiques qui permettent d'imaginer une grande partie du mix énergétique dans le avenir.

L'Algérie a adopté un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables, visant à produire une capacité allant jusqu'à 22 mille mégawatts d'ici 2030, principalement à partir de l'énergie solaire photovoltaïque et de l'énergie éolienne.

Bien que le solaire photovoltaïque soit largement utilisé en raison de son potentiel, son efficacité de conversion reste relativement faible. Pour améliorer cette technologie, l'utilisation de la logique floue dans les systèmes photovoltaïques s'est avérée efficace, entraînant une amélioration des performances, de l'efficacité énergétique et une réduction des coûts d'exploitation.

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier en détail le système photovoltaïque afin de maximiser la production et la qualité de l'énergie fournie. Il est divisé en quatre chapitres, chacun se concentrant sur un sujet spécifique, en commençant par une définition générale de l'énergie photovoltaïque et les dernières découvertes en matière d'énergie solaire. Dans le deuxième chapitre, il sera consacré à la modélisation du système photovoltaïque intégrant le GPV et le solaire. Le transformateur statistique boost, qui sera piloté par la commande mppt. Quant au troisième chapitre présentera le principe de la recherche, le point maximum, les techniques de contrôle MPPT, et l'étude théorique de certaines de ces méthodes. Enfin, le quatrième chapitre. Présentera les détails des simulations du système photovoltaïque et donnera les principaux résultats de ces simulations. La conclusion générale résumera les résultats des simulations auxquelles nous sommes parvenus au cours de cette étude.

# **Chapitre I**

**Généralité sur le système de photovoltaïque**

## I.1 introduction

Le soleil constitue une source d'énergie quasi inépuisable, dont le potentiel colossal excède de plusieurs milliers de fois les besoins énergétiques mondiaux.

À ses débuts, la technologie photovoltaïque était principalement destinée à alimenter des installations isolées comme les habitations éloignées des réseaux électriques ou certains équipements de télécommunications [1]. Aujourd'hui, elle a pris une place prépondérante dans de nombreux secteurs de notre société.

Dans ce chapitre d'introduction, nous avons présenté les notions de base concernant les systèmes photovoltaïques et décrit leurs trois grandes catégories. Nous avons ensuite examiné le principe fondamental de fonctionnement des cellules solaires photovoltaïques. Enfin, nous avons abordé les propriétés des matériaux semi-conducteurs qui constituent les composants élémentaires de ces cellules converties d'énergie lumineuse.

Ce première partie visait à poser les bases théoriques et techniques indispensables à la compréhension du photovoltaïque, une filière énergétique appelée à jouer un rôle majeur dans les années à venir.[2]

## I.2. Historique

Le phénomène photoélectrique, base du fonctionnement des cellules solaires, fut découvert au 19ème siècle. En 1839, le physicien François Becquerel [3] observa la production d'un faible courant électrique par Certains matériaux sous l'effet de la lumière, ouvrant la voie à la conversion photovoltaïque. Cette découverte fut approfondie par de nombreux scientifiques comme Fritts, Weston, Tesla et Einstein qui démontra en 1921 la nature ondulatoire et particulaire de la lumière, composée de photons[4] [5]. L'essor de l'industrie des semi-conducteurs après 1950 permit le développement technologique des premières cellules photovoltaïques[6]. Mais ce n'est qu'à partir des années 1970 que les industriels investirent massivement dans cette filière, permettant une réduction des coûts et son utilisation à plus grande échelle. En 1973 fut construite la première habitation alimentée en énergie solaire[7]. Durant les décennies suivantes, la technologie progressa rapidement pour atteindre des centrales de production de plusieurs mégawatts[8]. Depuis, le photovoltaïque a connu un essor spectaculaire, s'intégrant dans de nombreux produits et équipements du quotidien, grâce à une baisse continue des coûts de fabrication.[9].

I.3. Panneau photovoltaïque



Figure.I.1. image correspondante à un panneau photovoltaïque.

Un panneau solaire est constitué de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin d'augmenter leur puissance sous la même température et un éclairage uniforme. Il s'agit d'un groupe imbriqué de cellules photovoltaïques, également appelées cellules solaires, qui permettent la production d'électricité. Lorsqu'ils sont exposés à la lumière, la connexion de cellules photovoltaïques entraîne respectivement une augmentation de la tension.

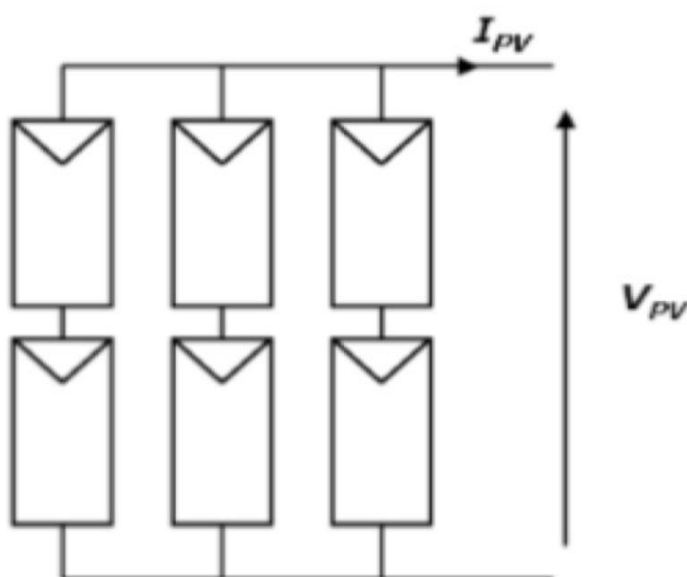


Figure.I.2. Schéma représentatif d'une association série/parallèle

## I.4. Système photovoltaïque

Aujourd'hui, grâce à leur fiabilité, les systèmes photovoltaïques (PV) occupent une place importante. Ils combinent plusieurs composants pour former un système PV complet. Les systèmes PV les plus couramment utilisés, en fonction des besoins spécifiques, se déclinent en trois types : autonome, connecté au réseau et hybride. [1]

### I.4.1. Système photovoltaïque autonome

Le système autonome illustré dans la Figure I.3 représente un site isolé qui n'est pas relié au réseau électrique. Il est conçu pour fournir de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des sites isolés. Ces systèmes requièrent l'utilisation de batteries d'accumulateurs afin de stocker l'énergie pendant les périodes où le soleil n'est pas disponible.

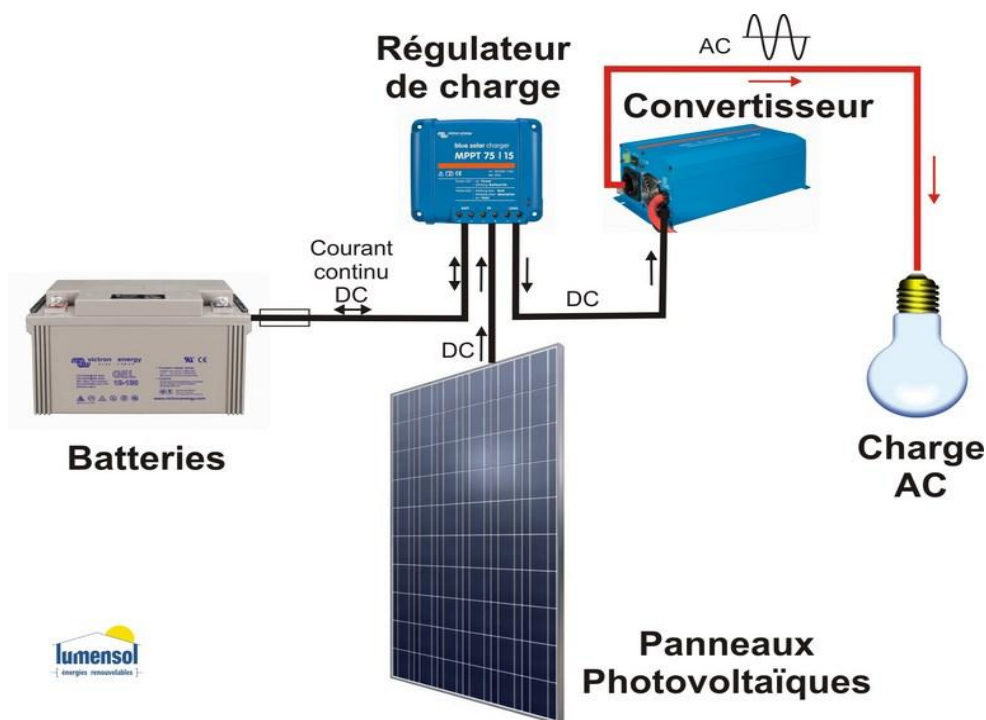


Figure.I.3. Système photovoltaïque autonome

Voici quelques exemples de systèmes autonomes :

- ✓ Balises en mer.
- ✓ Lampadaires urbains.
- ✓ Systèmes de pompage solaire.
- ✓ Habitats situés dans des sites isolés.

## I.4.2. Système photovoltaïque raccordé au réseau

Un système raccordé au réseau, également appelé non autonome, est conçu pour injecter l'excès d'énergie dans le réseau de distribution électrique. La figure suivante illustre ce type de système.

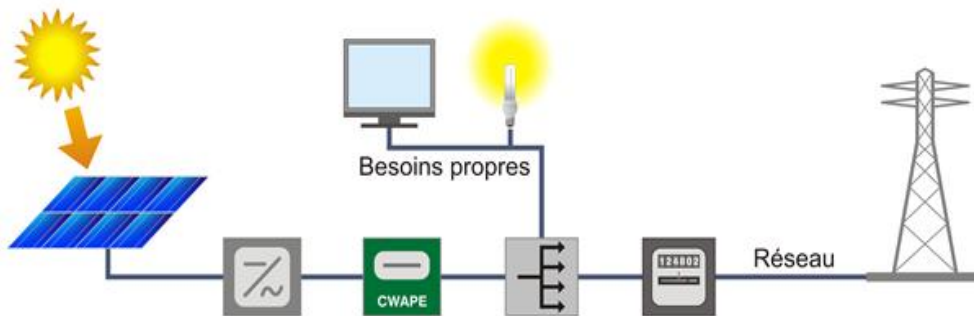


Figure. I.4. Système photovoltaïque raccordé au réseau

## I.4.3. Système photovoltaïque hybride

Il s'agit de systèmes regroupant des sources d'énergie de natures différentes telles que l'éolien, les générateurs diesel ou les centrales de cogénération. Ce type d'installation est utilisé lorsque les systèmes photovoltaïques à eux seuls ne suffisent pas à couvrir l'ensemble des besoins énergétiques. La figure suivante représente ce système.

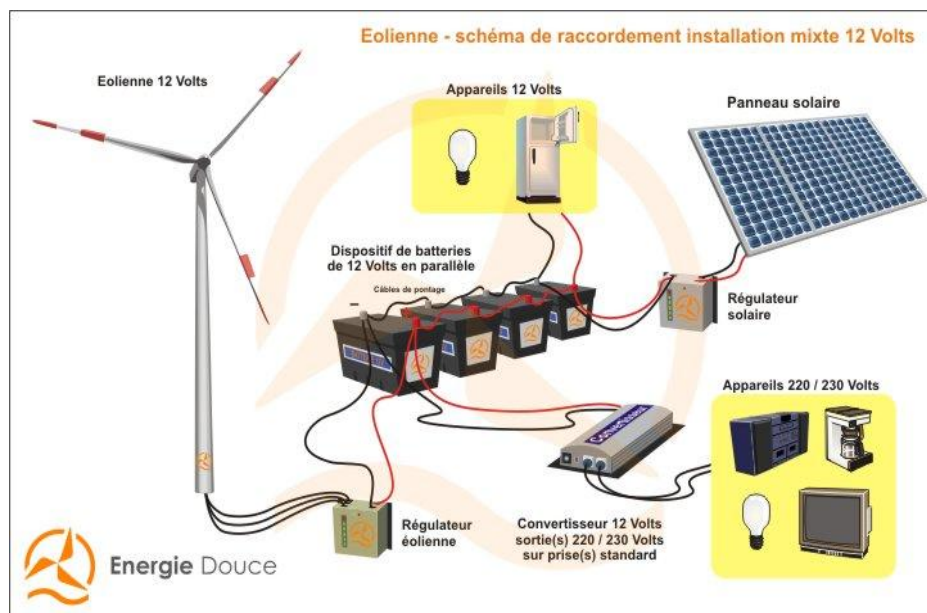


Figure.I.5. Système hybride PV-Eolien

**I.5. L'effet photovoltaïque :**

L'effet photovoltaïque, un phénomène de nature photoélectrique, est le principe physique mis en œuvre au sein des cellules solaires pour convertir le rayonnement lumineux en énergie électrique. Ce processus résulte de l'interaction entre les photons du rayonnement incident et les propriétés des matériaux demi-conducteurs constituant la cellule. Lorsqu'un photon est absorbé, il transfère son énergie à un électron de la structure cristalline, le faisant passer de la bande de valence à la bande de conduction du semi-conducteur. Ce transfert d'énergie crée alors une paire électron-trou, générant un courant électrique induit. C'est ce phénomène photovoltaïque particulier qui permet la conversion directe du rayonnement solaire en électricité au sein des cellules. Mis en œuvre à l'échelle industrielle, il constitue le fondement du principe de fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques, véritables centrales de production d'électricité exploitant l'énergie lumineuse du soleil. Cette propriété des matériaux demi-conducteur trouve également des applications dans d'autres composants optoélectroniques comme les photodiodes ou les phototransistors. [10]

**I.6. La cellule solaire**

La cellule photovoltaïque est un matériau électronique, souvent composé de semi-conducteurs, qui produit du courant électrique en continue lorsqu'il est exposé à la lumière.

**I.6.1. Principe travail la cellule photovoltaïque**

Le principe travail des cellules photovoltaïques repose sur un phénomène physique particulier au sein du silicium, un matériau demi-conducteur. En incorporant volontairement dans sa structure cristalline des atomes étrangers, appelés impuretés dopantes, sur modifier ses propriétés électroniques. Ce procédé est désigné sous le terme de dopage .La nature des atomes dopants introduits va déterminer si le silicium dopé présente un excès ou un déficit en charges électriques mobiles (électrons).

Lorsque les atomes dopants possèdent plus d'électrons de valence que le silicium, comme c'est le cas du phosphore, le matériau dopé de type n obtenu est riche en électrons libres. En revanche, un dopage avec des atomes déficitaires en électrons périphériques comme le bore va engendrer un silicium de type P, présentant une carence en électrons. Pour fabriquer les composants pv, on utilise des lingots de silicium que l'on découpe en fines tranches. Certaines d'entre elles sont dopées n par diffusion de p, tandis que d'autres sont rendues de type p par diffusion de B .

La cellule solaire résulte alors de l'assemblage d'une zone de silicium dopé n et d'une zone dopée p de polarités opposées, formant une jonction p-n. À l'interface de ces deux régions

semi-conductrices complémentaires s'établit un champ électrique qui permet la séparation des charges électriques positives et négatives sous l'effet du rayonnement solaire incident. Des électrodes métalliques grillagées sont finalement déposées de part et d'autre de la structure pour collecter le courant électrique ainsi produit.

Une cellule photovoltaïque est donc un dispositif spécialement conçu pour convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique exploitable. Cette conversion repose sur 3 principaux mécanismes. Les mécanismes suivants sont essentiels en les processus de conversion de l'énergie solaire en électricité dans une cellule photovoltaïque : tout d'abord, l'absorption des photons dont l'énergie dépasse le seuil de bande interdite du matériau constituant le dispositif ; ensuite, la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique, ce qui engendre la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur ; enfin, la collecte des particules générées dans le dispositif. Pour assurer la collecte efficace des particules produites, le matériau de la cellule photovoltaïque doit présenter 2 domaines d'énergie distincts et une conductivité suffisante pour autoriser le passage du courant. C'est pourquoi les semi-conducteurs sont privilégiés dans la fabrication pv. Un champ électrique est nécessaire pour collecter les particules générées en dissociant les paires électron-trou créées. Pour cette raison, une jonction P-N est généralement utilisée.[11]

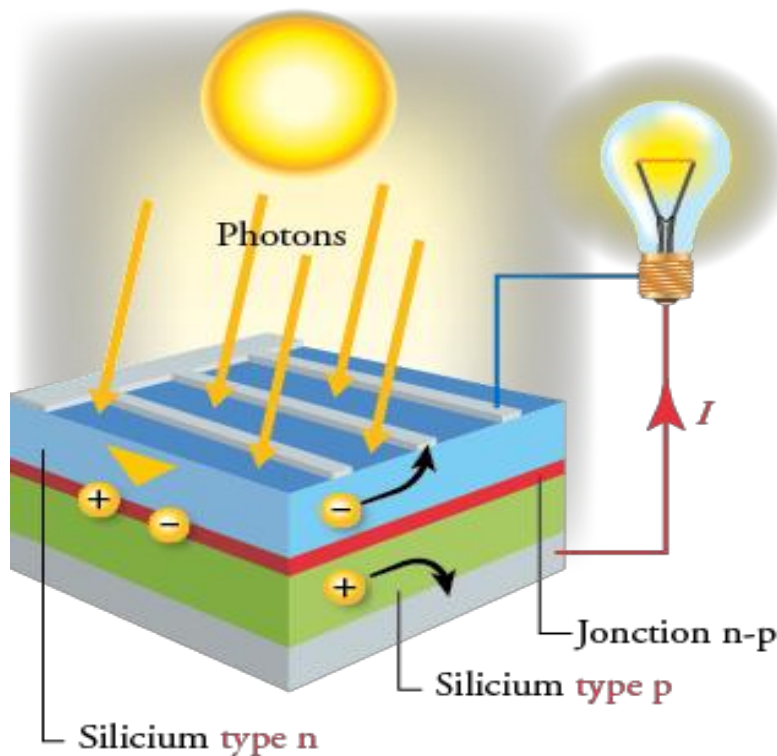


Figure.I.6. Exemple d'une cellule PV

## I.6.2. Les matériaux demi-conducteur :

Le demi-conducteur est des matériaux à conductivité électrique intermédiaire entre les conducteurs et les isolants. Le silicium cristallin pur est un demi-conducteur dans lequel tous les électrons sont engagés dans des liaisons, [12] ne permettant pas la conduction électrique. Cependant, en modifiant de façon contrôlée la structure cristalline du silicium par l'ajout d'impuretés, on peut ajuster ses propriétés de conduction et créer des semi-conducteurs aux caractéristiques électriques modulables, exploités dans les composants électroniques.

## I.6.3. Les demi-conducteur intrinsèques :

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau peuvent participer à des liaisons covalentes et, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir des porteurs de charge. Dans un matériau demi-conducteur intrinsèque, le diagramme énergétique présente deux bandes distinctes : la bande de conduction et la bande de valence, séparées par une bande interdite. Pour qu'un électron puisse passer de la bande de valence à la bande de conduction, il doit acquérir de l'énergie, que ce soit par le biais de l'énergie thermique ou d'un photon, par exemple. Cependant, le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste généralement très faible. Dans ce cas, le nombre de trous (lacunes d'électrons dans la bande de valence) est égal au nombre d'électrons. [11]

## I.6.4.demi-conducteur extrinsèques

Pour améliorer la conductivité du demi-conducteur, on y introduit délibérément des impuretés. Ce processus est connu sous le nom de dopage.

### I.6.4.1. l'alliage est de type n

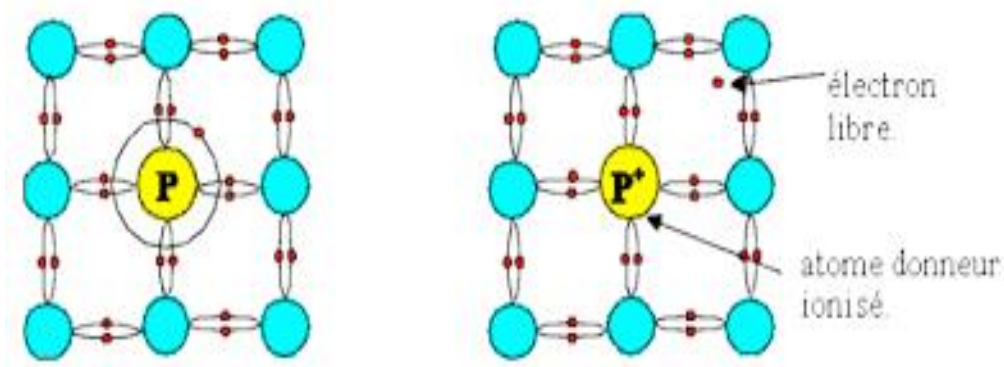


Figure.I.7. l'alliage est de type n [29]

En remplaçant un atome de silicium par un atome pentavalent, quatre liaisons sont formées avec les atomes de silicium environnants, laissant ainsi un électron libre. Ce dernier est facilement excité vers la bande de conduction en raison de l'agitation thermique, ce qui entraîne une augmentation significative du nombre d'électrons libres. Par conséquent, le nombre de trous reste considérablement inférieur au nombre d'électrons libres, conduisant à la formation d'un cristal dopé de type N (négatif). [13]

**I.6.4.2. L'alliage est de type p**

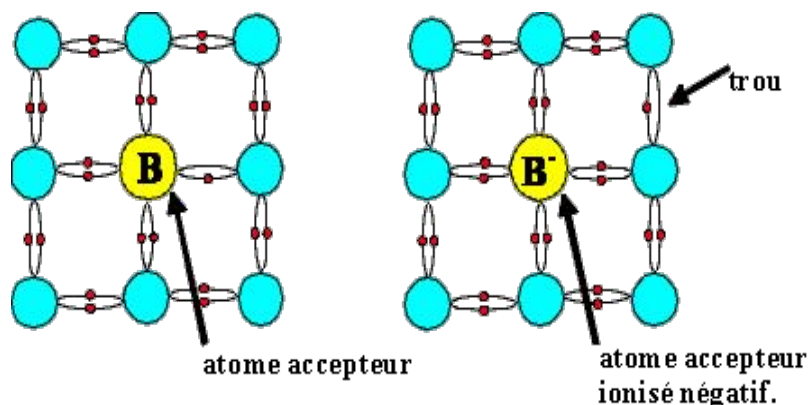


Figure.I.8. l'alliage est de type p [29]

De la identique manière, l'introduction d'atomes trivalents crée des liens covalentes avec 3 atomes voisins, laissant ainsi perforation disponible. Cette perforation peut se déplacer à travers le cristal, créant flux de courant. Dans ce cas, le nombre de trous dépasse largement le nombre d'électrons libres présents dans le cristal intrinsèque, résultant en un cristal alliage de type P (positif). Les alliages couramment utilisées dans ce processus sont souvent du B. [13]

**I.6.4.3. Jonction p-n**

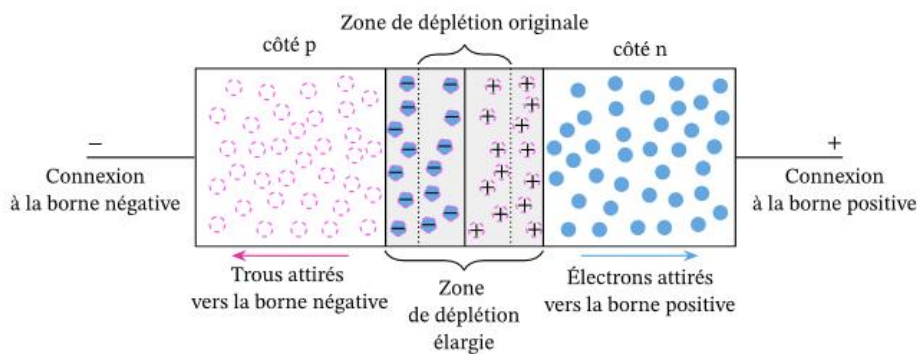


Figure.I.9. jonction p-n [29]

Une jonction p-n résulte de la juxtaposition d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cette union, les porteurs de charges libres sont attirés et se recombinent dans la zone de jonction, où ils finissent par disparaître. Cette zone devient ainsi une zone de transition, ne contenant que des ions, créant un champ électrique interne au niveau de la jonction. Ce champ électrique empêche les charges libres restantes dans chaque région de traverser la jonction et de se recombiner. [13]

### **I.6.5. Types de cellules photovoltaïques**

La fabrication de cellules photovoltaïques repose principalement sur deux facteurs clés : leur efficacité énergétique et leur coût. En conséquence, la majeure partie de la recherche dans ce domaine se concentre sur l'amélioration de ces aspects. Les technologies des cellules solaires ont connu un développement varié, mais on peut généralement les classer en deux catégories principales : les cellules cristallines et les cellules à couches minces.

#### **I.6.5.1. les cellules monocristallines**

Les cellules photovoltaïques de première génération, telles que les cellules monocristallines, sont constituées d'un seul cristal divisé en deux couches [14].

- Elles offrent des rendements élevés, pouvant atteindre jusqu'à 12-16% sur le marché commercial et jusqu'à 23% en laboratoire.
- Cependant, leur processus de fabrication est complexe et exigeant, ce qui les rend très coûteuses à produire.
- De plus, la purification du cristal nécessite une importante quantité d'énergie.

#### **I.6.5.2. Les cellules poly-cristallines**

Les cellules photovoltaïques à base de silicium poly-cristallin sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé contenant plusieurs cristaux. Elles présentent généralement une forme rectangulaire. [15]

Les panneaux solaires équipés de ces cellules ont un rendement légèrement inférieur à ceux utilisant des cellules monocristallines, variant généralement entre 11 et 15%. Toutefois, leur coût de production étant moins élevé, ils offrent un rapport qualité-prix plus avantageux.

## I.6.5.3 Cellules à couches minces

Elles sont communément désignées comme des cellules de deuxième génération en raison de leur succession historique aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses, et sont considérées comme l'une des technologies les moins coûteuses en raison de leur fabrication via un processus de revêtement sur de grandes surfaces. Elles peuvent même être intégrées sur des supports flexibles. Divers matériaux semi-conducteurs sont utilisés dans cette technologie, tels que le silicium amorphe et microcristallin, le Cadet (tellure de cadmium), le CIS (sélénure de cuivre et d'indium), et parfois le CIGS (sélénure de cuivre, indium et gallium). [16]

Voici quelques avantages et inconvénients :

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



Figure.I.10. Les images des différents types de cellule photovoltaïque

## I.6.6. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Le modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque sous le radiation est représenté sur la figure (I.11). On y voit une source de courant  $I_{ph}$  connectée en parallèle avec une diode 2 résistances parasites sont également incluses, ayant un impact sur la caractéristique courant - tension  $I(\text{courant}) = f(V)(\text{tension})$  de la cellule:

La résistance  $R_s$  symbolise la résistance interne globale de la cellule. Elle dépend essentiellement de la résistivité du matériau semi-conducteur utilisé, de la résistance des contacts métalliques collecteurs ainsi que de la résistivité de ces collecteurs.

La résistance  $R_p$  traduit l'effet des courants de fuite au niveau de la jonction p-n. Sa valeur est conditionnée par le procédé de fabrication mis en œuvre pour réaliser cette jonction p-n.

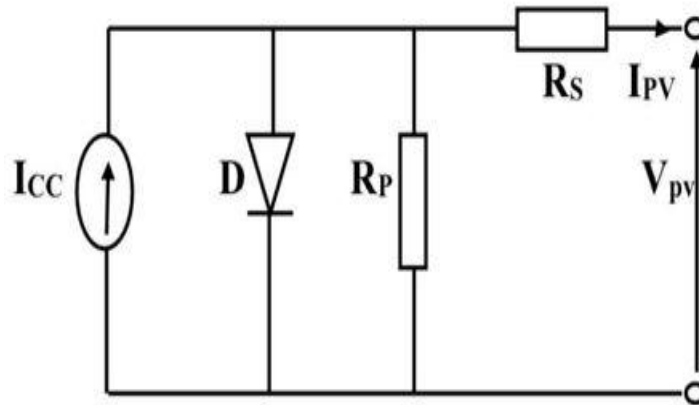


Figure. I.11. Modèle électrique équivalent permettant de représenter le comportement d'une cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique ;

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} [\exp(((V_{pv} + (I_{pv} * R_s)) / (n * K * T)) - 1)] - V_{pv} + (I_{pv} * R_s) / R_p \quad (I.1)$$

Où :

$V_{pv}$  : Tension de sortie de la cellule(V),

$I_{pv}$ : Courant de sortie de la cellule(A),

$I_{ph}$ : Courant photo-générer ou photo-courant (A),

$I_{sat}$ : Courant de saturation de la diode (A),

$q$ : Charge d'électron  $q = 1.6 \cdot 10^{-19}(c)$ ,

$k$ : Constant de Boltzmann ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23} J/k$ ),

$R_s$ : Résistance série( $\Omega$ ),

$R_p$ : Résistance parallèle( $\Omega$ )

### I.6.6.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être obtenus soit à partir des courbes courant-tension, soit à partir de l'équation caractéristique.

#### I.6.6.1.1. Courant de ( $I_{cc}$ ) :

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  représente le courant maximal qui peut être débité par une cellule ou un générateur photovoltaïque lorsque ses bornes sont court-circuitées, c'est-à-dire lorsque la tension à ses bornes est nulle.

Dans le cas idéal d'une cellule exempte de résistances parasites (résistance série nulle et résistance shunt infinie), ce courant de court-circuit est égal au photocourant  $I_{ph}$  généré par l'effet photovoltaïque. Cependant, en conditions réelles, la présence de ces résistances parasites induit un écart entre  $I_{cc}$  et  $I_{ph}$ . En effet, en posant  $V = 0$  dans l'équation caractéristique du modèle électrique équivalent, on obtient une expression reliant  $I_{cc}$  aux différents paramètres du modèle

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{I_{cc} R_s}{n K T} \right) - 1 \right] - \frac{I_{cc} R_s}{R_p} \quad (I.2)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{I_{cc} R_s}{n} \right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

Devant  $I_{ph}$  l'expression approchée du courant de

Court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx I_{ph} / (1 + R) \quad (I.4)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement  $I_{CC} = I_{ph}$ ).

#### **I.6.6.1.2. Tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ )**

C'est la tension  $V_{co}$  à laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul, représentant ainsi la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque.

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q V_{pv}}{n K} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (I.5)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{CO} = V_T \ln [ I_{ph} I_{sat} + 1 ] \quad (I.6)$$

#### **I.6.6.1.3. La puissance maximale :**

On désigne par là la puissance électrique maximum que peut produire le module pv, puissance obtenue pour une tension maximum  $v_{max}$  et une intensité maximum  $i_{max}$ , dans des conditions de radiation solaire de référence normalisées (STC), généralement fixées à 20-25 degré pour la température et 800-1000 Watt / m<sup>2</sup> pour le radiation. Cette valeur de puissance maximum est qualifiée de puissance de crête, et s'exprime en w

**I.6.6.1.4. Facteur de forme FF :**

Il s'agit du ratio entre la puissance maximale pouvant être fournie à la charge et le produit de ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ).

$$FF = P_{max} / I_{cc}.V_{co} = I_{mpp}.V_{mpp} / I_{cc}.V_{co} \quad (I.7)$$

Pour les cellules ayant moyen rendement, le FF des valeurs d'ordre 0.7 à 0.85. Le facteur de forme FF diminue si la température augmente.

**I.6.6.1.5. L'efficacité (rendement) de la conversion :**

C'est la fraction qui représente l'énergie électrique maximum exploitable, divisée par la puissance de la radiation reçue à la surface de la cellule

$$X.\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp}.V_{mpp} - V_{co}.I_{cc}.FF}{S.Ga} \quad (I.8)$$

Avec  $P_{inc}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

**I.7. Effet des paramètres externes sur un module photovoltaïque**

La performance d'une cellule photovoltaïque est influencée par le niveau de radiation lumière et la température ambiante. Sur cette section, examinerons comment les variations des conditions météorologiques impactent  $I$  et  $V$  produits par le panneau photovoltaïque.

**I.7.1. Effet de la radiation**

La figure (I-9) illustre l'impact de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension pour une température constante, avec différentes valeurs d'éclairement (200 W/m<sup>2</sup>, 400 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup>, 1000 W/m<sup>2</sup>). Les courbes caractéristiques  $I(V)$  montrent cinq tendances distinctes en fonction de l'éclairement. Comme le montre le graphique, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) augmente proportionnellement à l'éclairement, tandis que la tension à vide ( $V_{co}$ ) varie peu (environ 0,5 V). Par conséquent, une couverture nuageuse plus importante se traduit par une intensité de courant générée plus élevée

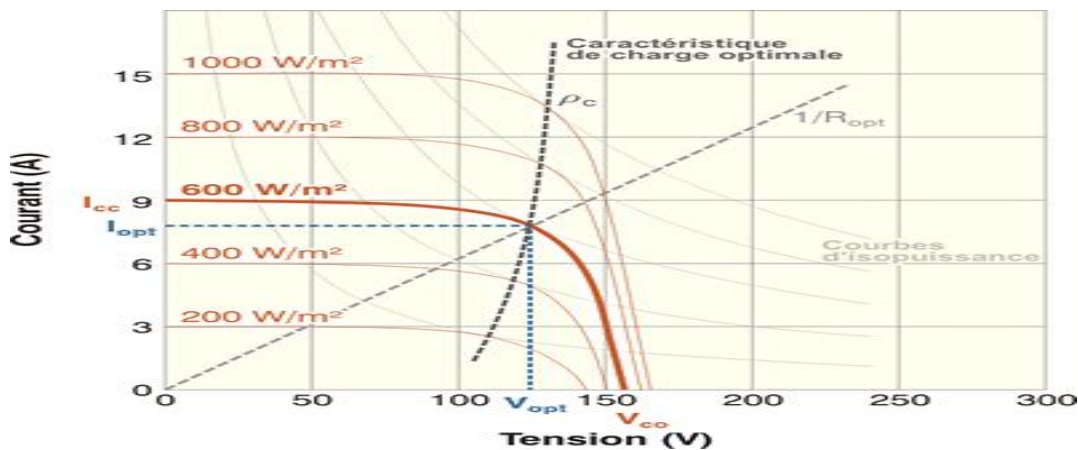


Figure.I.12. l'effet de la radiation dans les caractéristiques I-V pour une température constante [18]

I.7.2. Effet de la température

La figure (I-9-2) illustre l'effet du changement de température (-75°C, 0°C, 25°C, 50°C, 75°C) sur la caractéristique courant-tension et puissance-tension à un niveau d'éclairement constant. On observe que lorsque la température augmente, la tension du module diminue, tandis que lorsqu'elle diminue, la tension augmente. De plus, la relation entre la température et la tension d'un module est inversement proportionnelle. En revanche, la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de module.

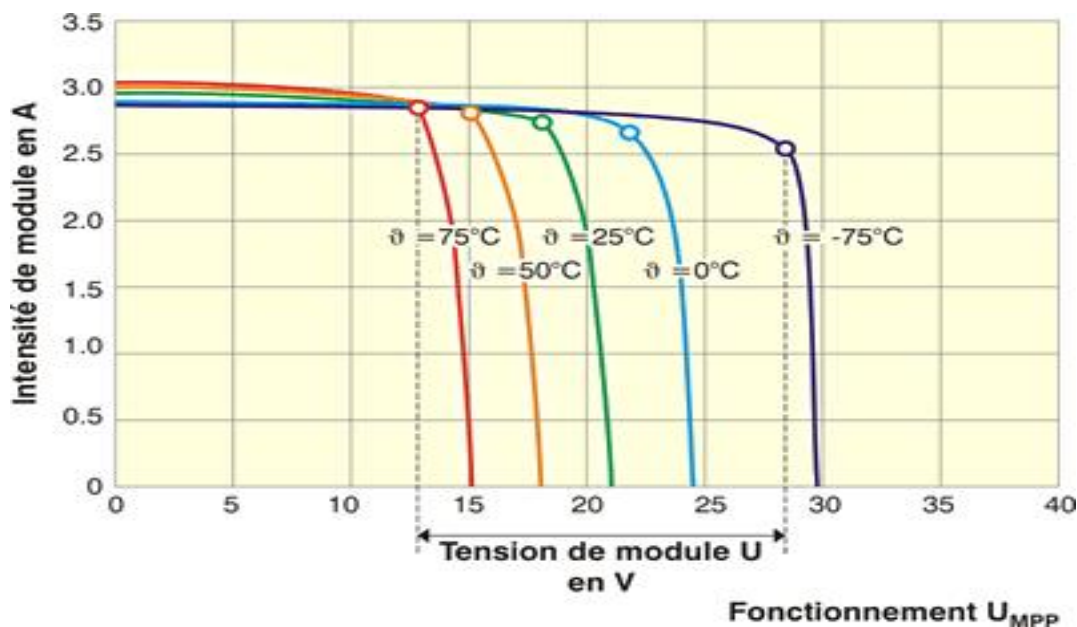


Figure .I.13. l'effet de la température dans les caractéristiques I-V pour une température constante [18]

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

L'énergie photovoltaïque offre de nombreux avantages notables. Tout d'abord, son caractère non polluant et respectueux de l'environnement représente un atout majeur face aux problématiques de transition énergétique. De plus, la robustesse et la longévité des installations solaires leur confèrent une grande fiabilité et des coûts de maintenance très réduits sur leur cycle de vie.

Leur conception modulaire et fixe facilite grandement leur dimensionnement et permet une mise en œuvre flexible, des petits systèmes individuels aux grandes centrales de production. Leur fonctionnement silencieux constitue également un avantage appréciable. Surtout, le gisement solaire représente une source d'énergie inépuisable, comme l'illustre le potentiel considérable des zones désertiques pour alimenter l'ensemble des besoins énergétiques mondiaux.

Cependant, cette filière rencontre certaines limites. Les coûts d'investissement initial pour les infrastructures demeurent encore relativement élevés. De plus, les rendements de conversion photovoltaïque restent modestes comparés à d'autres technologies. Enfin, la production varie de façon intermittente selon l'ensoleillement, avec des baisses

### **I.9. Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons dressé un panorama des différents systèmes photovoltaïques existants en décrivant leurs caractéristiques. Nous avons également examiné le principe de travail des cellules solaires et analysé l'effet des paramètres environnementaux externes sur leur performance et leur rendement. Enfin, nous avons exposé les avantages majeurs mais aussi les inconvénients actuels de la filière photovoltaïque pour la production d'électricité.

Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation théorique et mathématique permettant de représenter le comportement et le fonctionnement d'un système photovoltaïque. Cette étape de modélisation est essentielle pour comprendre, analyser et optimiser les caractéristiques de ce type d'installation de production d'énergie.

# **Chapitre II**

## **Modélisation de système photovoltaïque**

**II.1. Introduction**

La modélisation mathématique d'un système est une étape essentielle dans toute étude de son fonctionnement, son optimisation ou son diagnostic. Elle revêt une importance capitale dans la simulation des systèmes.

En effet, pour concevoir une structure de production d'électricité à partir d'une source photovoltaïque, il est impératif de disposer d'un modèle mathématique qui reflète fidèlement les caractéristiques du système.

Ce modèle ne doit pas être trop simplifié au risque de s'éloigner de la réalité physique, mais il ne doit pas non plus être trop complexe afin de faciliter l'analyse et la synthèse des composants du système.

Ce chapitre se concentre sur la modélisation du panneau pv et du hacheur boost. Sur la première partie, nous présenterons la représentation mathématique d'un panneau solaire ainsi que ses propriétés. Dans la seconde partie, nous aborderons la modélisation d'un hacheur boost.

**II.2. Modélisation des modules photovoltaïques :**

La littérature regorge de travaux portant sur la modélisation des systèmes photovoltaïques, soulignant ainsi l'importance d'avoir un modèle précis. On distingue quatre principaux cas de modélisation du générateur photovoltaïque, allant du plus simple au plus complexe.

**II.2.1. Modélisation de Différent modèles d'une cellule PV [19]**

Le Paradigme parfait Model idéal

Le Paradigme 1 diode sans  $R_{sh}$

Le Paradigme à 2 diode sans  $R_{sh}$ .

Le Paradigme à deux diodes avec  $R_{sh}$

**II.2.1.1. Paradigme parfait :**

Une façon simple de décrire une cellule photovoltaïque est de la considérer comme une source parfaite de courant produisant un courant  $I_{ph}$  proportionnel à l'éclairement incident.

Elle est en parallèle avec une diode, qui représente la jonction p-n de la cellule PV.

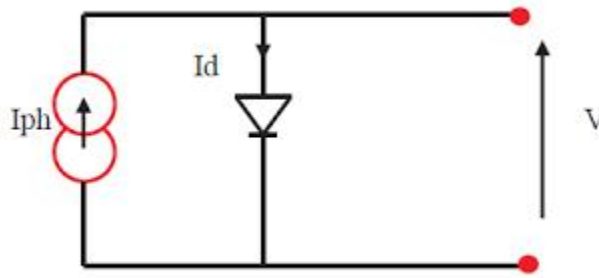


Figure .II.1 . Modèle électriqueéquivalent représenter Paradigme parfait d'une cellule PV

Après la loi de nœuds en obtient:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{II.1}$$

Pour un générateur photovoltaïque idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.

$$V_{pv} = V_d \tag{II.2}$$

V<sub>d</sub> : la tension aux bornes de diode.

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique est donnée par la relation :

$$I_{pv} = I_0 \times \left[ e^{\frac{qv}{AKT}} - 1 \right] \tag{II.3}$$

Type equation here.: Est le courant de saturation de la diode, qui est exprime comme suit :

$$I_0 = I_0(T1) \times \left( \frac{T}{T1} \right)^3 \times e^{\frac{-q \times v}{A \times K \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T1} \right)}} \tag{II.4}$$

Et :

$$I_0 = (T1) = \frac{I_{sc}(T1)}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}(T1)}{A \cdot K \cdot T1} - 1}} \tag{II.5}$$

Avec:

V<sub>g</sub> : la tension de seuil de la diode (1.12 eV)

I<sub>sc</sub> : le courant de court circuit

V<sub>oc</sub> : tension de circuit ouvert.

K : constante de Boltzmann (K=1.3854 × 10<sup>-23</sup> J/K).

q : est la charge électrique qui est égale  $1.6 \times 10^{-19}$  C.

A : facteur de qualité de la diode.  $(KT/q)$  représente le potentiel thermique.

$I_{ph}$  : courant photonique de la diode qui est donnée par la relation suivante :

$$I_{ph} = I_{ph}(T_1) \times [1 + K_0 \times (T - T_1)] \tag{II.6}$$

$$K_0 = \frac{I_{SC}(T_2) - I_{SC}(T_1)}{T_2 - T_1} \tag{II.7}$$

D'après les relations (II.1) et (II.3) on obtient :

$$I_{ph} = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{q \times (v - R_s)}{AKT}} - 1 \right] \tag{II.8}$$

Se qui implique :

$$I_{ph} = I_{ph}(T_1) \times [1 + K_0 \times (T - T_1) - I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (v - R_s)}{AKT}} - 1 \right]] \tag{II.9}$$

**II. 2.1.2. Paradigme à 1 diode sans Rsh**

Un Paradigme électrique empirique simple, largement utilisé en raison de ses résultats de qualité, est le Paradigme à 1 diode, qui se rapproche le plus du générateur pv.

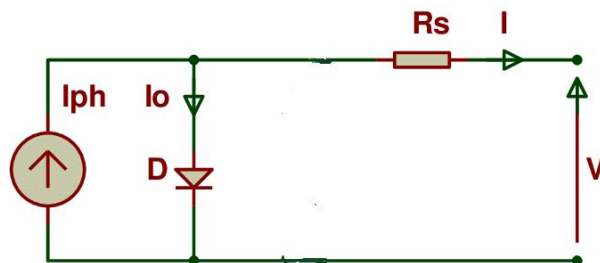


Figure. II.2. Modèle électrique équivalent représentant Paradigme 1 diode sans résistance shunt

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles suivantes :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{II.9}$$

$$I_{ph} = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{q \times (v - R_s \times i)}{AKT}} - 1 \right] \tag{II.10}$$

**II.2.1.3. Paradigme à 2 diodes sans Rsh :**

Le comportement électrique d'une cellule pv peut être modélisé par un circuit équivalent composé des éléments suivants : une source de courant représentant le flux lumineux incident

(la radiation), 2 diodes permettant d'établir la polarisation de la cellule, ainsi qu'une résistance série modélisant les pertes résistives impliquées.

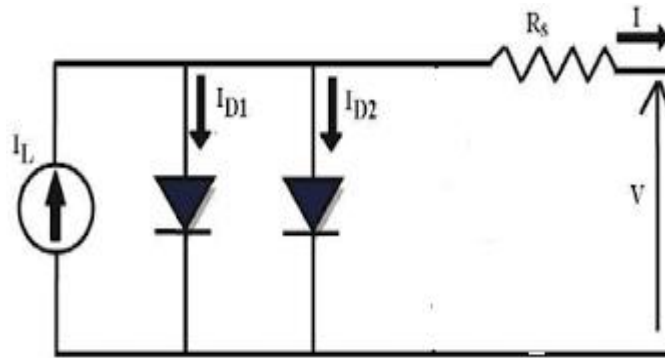


Figure .II.3. Modèle électriqueéquivalent représenter Paradigme à 2 diodes sans résistance shunt d'une cellule PV

Le courant généré par la cellule solaire est donné par la loi du network:

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) \tag{II.11}$$

Le courant de la diode est donné comme suit :

$$I_{d1} = I_{01} \times \left[ e^{\frac{q \times (v - R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] \tag{II.12}$$

$$I_{d2} = I_{02} \times \left[ e^{\frac{q \times (v - R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] \tag{II.13}$$

$I_{01}$  Et  $I_{02}$  représente le courant de saturation des diodes D1, D2 respectivement :

Donc on aura :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \times \left[ e^{\frac{q \times (v - R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] - I_{02} \times \left[ e^{\frac{q \times (v - R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] \tag{II.14}$$

**II.2.1.4. Paradigme à 2 diode avec Rsh**

Le Paradigme électrique équivalent de la cellule sépalaire, tel qu'illustré dans la figure, comprend une source de courant représentant le flux lumineux incident, 2 diodes pour modéliser le comportement des jonctions semi-conductrices. Le circuit comprend également une résistance Rsh parallèle et une résistance série, permettant de prendre en compte les défauts et pertes parasites dans la cellule.

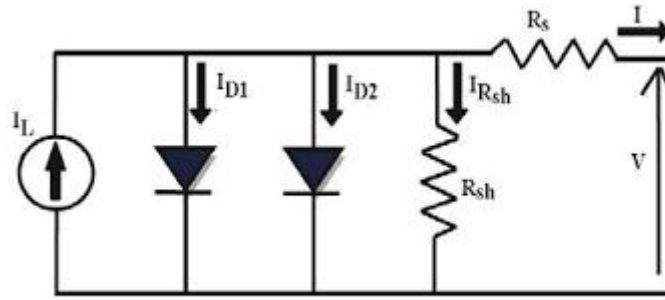


Figure .II.4. Modèle électriqueéquivalent représenter Paradigme à 2 diodes avec résistance shunt de la cellule PV

Après la loi des mailles en trouve :

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sc} \tag{II.15}$$

De ou:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \times \left[ e^{\frac{q \times (v - R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] - I_{02} \times \left[ e^{\frac{q \times (v - R_s \times I)}{AKT}} - 1 \right] - \left[ \frac{v + (R_s \cdot I)}{R_{sh}} \right] \tag{II.16}$$

### II.3. Modélisation de panneau photovoltaïque:

Dans notre étude, nous nous sommes concentrés sur le modèle à deux diodes avec résistance shunt, qui représente de manière précise le comportement d'une cellule photovoltaïque. Ce module photovoltaïque est représenté par son schéma électrique équivalent (figure II.5), comprenant une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes étant représentées par 2 résistances : une \$R\_{sh}\$, ainsi que 2 diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de recombinaison des porteurs minoritaires. Le courant généré par ce paradigme est décrit par l'équation suivante:

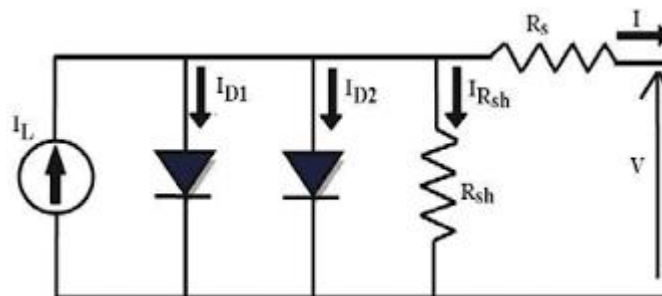


Figure. II.05. Paradigme électrique équivalent d'une cellule pv à 2 diodes avec résistance shunt.

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - \frac{v + IR_s}{R_p} \tag{II.17}$$

Et par multiplication par le nombre des cellules en série et en parallèle, nous aurons l'équation suivante qui représentait le modèle d'un panneau solaire:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_{s1} \left( \frac{q(v-I_{RS})}{eA_1 K T_c} - 1 \right) - N_p I_{s2} \left( \frac{q(v-I_{RS})}{eA_2 K T_c} - 1 \right) - \frac{N_p v + I_{RS}}{R_p} \quad (II.18)$$

Une cellule pv comporte effectivement une résistance série et une résistance en dérivation ou shunt (Rsh). Ces résistances ont un certain effet dans la caractéristique IV de la cellule :

La résistance série RS représente la résistance interne de la cellule, principalement déterminée par la résistance des contacts des grilles collectrices et la résistivité de ces grilles.

La résistance shunt Rsh est attribuée à un courant de fuite au niveau de la jonction et dépend de la méthode de fabrication de la cellule.

**II.4. Convertisseur DC/DC (Hacheurs):**

**II.4.1. Définition :**

Un hacheur est un dispositif de conversion continu-continu utilisé pour transformer une énergie électrique à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie électrique à un autre niveau de tension (ou de courant) de manière continue. Son utilisation est essentielle pour stocker l'énergie produite par des panneaux photovoltaïques dans des batteries ou pour alimenter des charges nécessitant un courant continu. Typiquement composé de condensateurs, d'inductances et de commutateurs, dans des conditions idéales, ces composants fonctionnent avec un rendement élevé, ne consommant pas de puissance active. [20]

Les hacheurs, en tant que convertisseurs de courant continu, opèrent en découpant une grandeur d'entrée continue, soit la tension soit le courant, pour obtenir en sortie une grandeur également continue ou présentant une faible ondulation. [20]

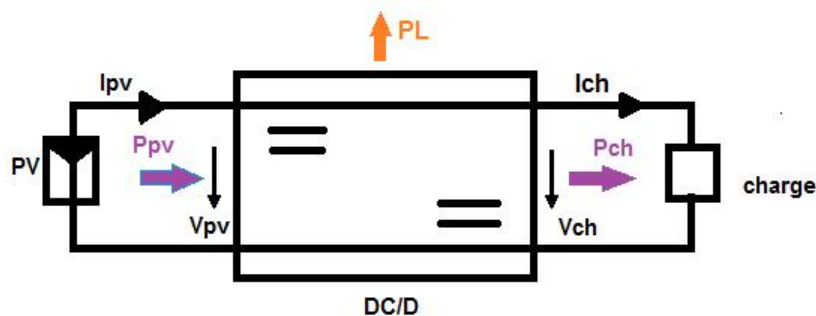


Figure .II.6. Convertisseurs dc/dc.

### II.4.2. Type des hacheurs :

Dans la prochaine section, nous mentionnerons quelques types de hacheurs qui sont pertinents pour notre étude :

- ❖ Le hacheur abaisseur de tension, également connu sous le nom de "Buck" ou hacheur dévolteur.
- ❖ Le hacheur élévateur de tension, souvent désigné comme "BOOST" ou hacheur survolteur.
- ❖ Le hacheur abaisseur/élévateur de tension, appelé "BUCK-BOOST".

#### II.4.2.1. Hacheur dévolteur (Buck) :

La figure représente le modèle d'un convertisseur Buck (dévolteur). Ce circuit est composé d'un résistor, d'une diode et d'un filtre LC. Son principe travail consiste à abaisser la tension d'entrée continue  $E$  en la multipliant par un rapport cyclique inférieur à 1. Il permet ainsi d'obtenir en sortie une tension continue régulée, plus faible que la tension d'alimentation

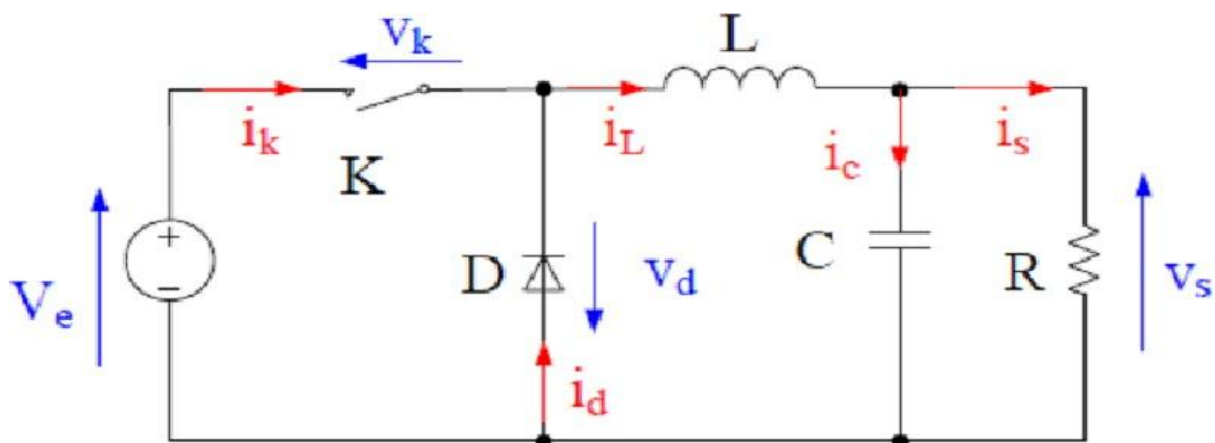


Figure. II.7. Schéma électrique du hacheur Buck [21].

#### II.4.2.2. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) :

Il existe un convertisseur dc/ds dit "Buck-boost" ou "dévolteur-survolteur" obtenu en inversant la position de la diode et de l'inductance par rapport à un convertisseur dévolteur classique. Son gain statique peut être supérieur ou inférieur à 1, lui permettant d'augmenter ou de diminuer la tension d'alimentation. Mais surtout, sa particularité est d'inverser la polarité de la tension de sortie par rapport à la source d'entrée. Ce montage flexible pour régler le niveau et la polarité de tension convient à certaines applications spécifiques

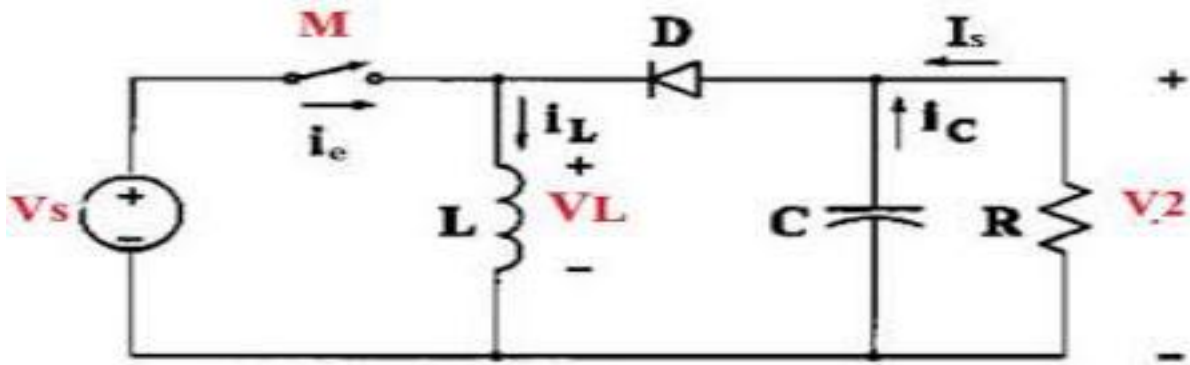


Figure. II.8. Paradigme du convertisseur dévolteur-survolteur [21].

**II.4.2.3. Hacheur Survolteur (Boost) :**

Un convertisseur Boost, aussi nommé convertisseur dévolteur parallèle, est un dispositif qui permet de transformer une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure. Ce type de convertisseur est fréquemment employé en tant qu'adaptateur source-charge lorsque le point de fonctionnement en couplage direct se trouve au-delà du point de puissance maximale ppm. Le schéma suivant présente la configuration la plus élémentaire d'un hacheur Boost.

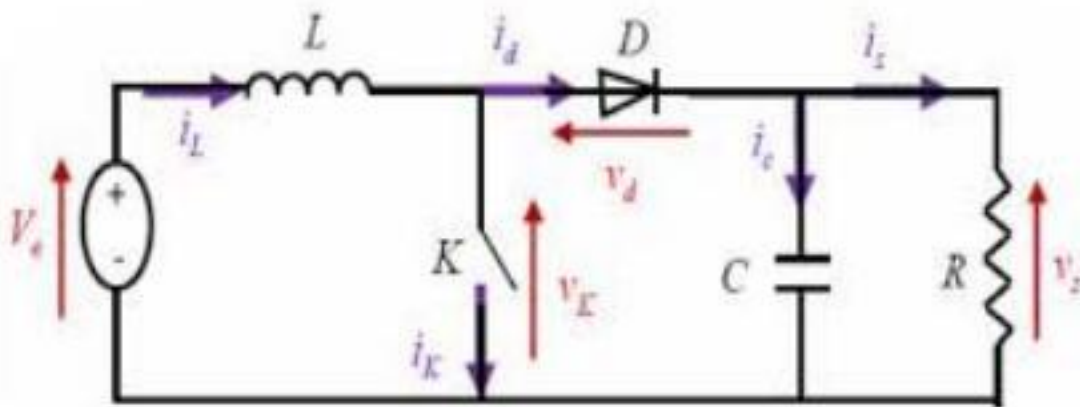


Figure .II.9. Schéma électrique du convertisseur Boost [21].

**II.4.3. Modélisation d'un hacheur boost :**

$$v_{pv} - R_L * I_L - L \frac{dI_L}{dt} - \alpha v_{pv} = 0 \tag{II.19}$$

$$(1 - \alpha) I_L = C \frac{dv_{ch}}{dt} + \frac{V_{ch}}{R_{ch}} \tag{II.20}$$

$$L \frac{dI_L}{dt} = v_{pv} - \alpha v_{ch} - R_L * I_L \quad (II.21)$$

$$C \frac{dv}{dt} = (1 - \alpha) I_L - \frac{V_{ch}}{R_{ch}} \quad (II.22)$$

$$I_L = \int \frac{1}{L} - (v_{pv} - \alpha v_{ch} - R_L * I_L) \quad (II.23)$$

$$v_{pv} = \frac{1}{C} \int ((1 - \alpha) I_L - \frac{V_{ch}}{R_{ch}}) \quad (II.24)$$

### II.5. Avantages de convertisseur Boost :

Les convertisseurs élévateurs de tension, communément appelés hacheurs Boost, représentent un choix judicieux pour les installations photovoltaïques dotées de systèmes de recherche du point de puissance maximale mppt. Leur attrait réside dans plusieurs aspects avantageux. Premièrement, leur fonctionnement en mode courant continu leur confère la capacité d'extraire le maximum de puissance disponible du générateur photovoltaïque. Deuxièmement, la présence d'une inductance L permet de limiter les ondulations du courant d'entrée, un atout non négligeable. Troisièmement, même en conditions d'ensoleillement réduit, ces convertisseurs peuvent opérer avec une tension d'entrée stable, assurant ainsi une récupération optimale de l'énergie disponible.

De manière générale, les convertisseurs Boost trouvent leur utilité lorsqu'il s'agit d'augmenter la tension de sortie, tandis que les convertisseurs abaisseurs de tension (Buck) sont privilégiés pour réduire cette dernière.

### II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre on a modélisé les différents éléments de la chaîne de production d'énergie solaire et pour valider nos modèles on a testé le panneau et le convertisseur boost dans des différentes conditions. À partir des résultats obtenus, on a un problème des pertes d'énergie ou le rendement de l'étage de conversion n'est pas toujours au point maximal.

Donc nécessite d'une procédure pour maintenir le système photovoltaïque fonctionné à sa puissance maximale, donc on a proposé dans le chapitre suivant des méthodes de commande pour extraire le maximum de puissance.

# **Chapitre III**

## **Techniques de maximisation de la puissance**

**III.1. Introduction**

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT), une technique essentielle pour exploiter pleinement la puissance d'un système photovoltaïque, repose sur un algorithme ou un dispositif point de fonctionnement optimal des panneaux solaires. Le but est d'adapter le système aux variations de luminosité, en chargeant les panneaux solaires à leur rendement maximal malgré les changements environnementaux. Cela permet de tirer le meilleur parti de l'énergie solaire disponible à tout moment, optimisant ainsi le rendement du système. Grâce à cette approche, les systèmes photovoltaïques peuvent considérablement améliorer leur efficacité énergétique et leur production d'électricité. Ce mémoire vise à étudier et maximiser la puissance d'un système photovoltaïque dans ce contexte.

**III.2. Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV**

Le générateur photovoltaïque (PV) forme le cœur d'un système PV. Cependant, pour une utilisation pratique, d'autres éléments s'avèrent indispensables. Parmi eux, on compte les dispositifs de stockage d'énergie, les régulateurs de flux d'énergie et les équipements d'interconnexion au réseau électrique alternatif. Ces composants supplémentaires représentent une part significative des coûts, affectent l'efficacité globale et ont un impact majeur dans le comportement et les performances de l'ensemble du système.

Un générateur photovoltaïque (GPV) présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des points de puissance maximale (PPM) qui varient en fonction de l'éclairement et de la température de la cellule. De plus, en fonction des caractéristiques de la charge connectée au GPV, il peut exister un écart important entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

**III.2.1. Etage d'adaptation entre UN GPV et une charge**

Afin d'exploiter de manière optimale l'énergie produite par un générateur photovoltaïque et de la transférer efficacement vers une charge électrique, il est fréquent d'intercaler un étage d'adaptation joue un rôle d'interface. Celui-ci permet, à l'aide d'un processus de régulation, d'extraire la puissance maximale disponible aux bornes du générateur solaire pour l'acheminer vers la charge.

En effet, la caractéristique électrique d'un panneau photovoltaïque varie en fonction des conditions d'ensoleillement et de température. Pour un état donné, il existe un point de

fonctionnement idéal correspondant à la puissance de sortie maximale. L'étage d'adaptation a pour rôle d'ajuster en permanence le transfert d'énergie afin de se rapprocher au plus près de cette puissance de crête optimale.

Cette fonction d'extraction de la puissance maximale est généralement assurée par un convertisseur à découpage piloté par une commande électronique adaptée. Celui-ci fait [22]

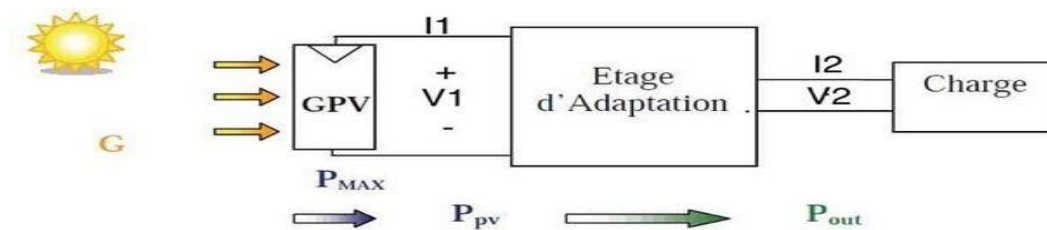


Figure.III.1.Etage d’adaptation entre un GPV et une charge

**III.2.2. Convertisseur dc-dc**

Il y a différents types de convertisseurs dc/dc. L'étude suivante présente des informations sur la complexité de tout type de transformateur.

Type : Buck .... Fonction : abaisseur....interrupteur : 1...diode : 1...transformateur : non

Type : boost ....fonction : Elévateur....interrupteur : 1...diode : 1...transformateur : non

Type ; Buck-boost ...fonction : abai/elev....interupteur : 1...diode : 1...transformateur : non

Type : fly Buck ....fonction : abai/elev....interupteur : 1...diode : 1...transformateur : oui

Type : push pull ....fonction : abai/elev....interupteur : 2...diode : 2...transformateur : oui

Type : hall bridge ...fonction : abai/elev....interupteur : 1...diode : 1...transformateur : oui

Type : Halfforward ....fonction : abai/elev....interupteur : 2...diode : 2...transformateur : oui

Type : full bridge ....fonction : abai/elev....interupteur : 4...diode : 4...transformateur :oui

Complexité ...Buck ; faible - boost : faible - Buck boost : faible [23].

Dans étude expose le fonctionnement d'un convertisseur dc-dc de type poste, largement utilisé sur les systèmes PV pour produire les I et v nécessaires. Ce convertisseur, composé

uniquement d'éléments réactifs tels que des selfs et des capacités, ne consomme idéalement aucune énergie. C'est pourquoi il est réputé pour son haut rendement [24].

**III.2.3. Étage d'Adaptation de Type BOOST**

Prenons l'exemple illustré dans la figure III.2, qui représente un convertisseur DC-DC élévateur, aussi appelé boost. Ce type de convertisseur peut servir d'adaptateur entre la source et la charge lorsque cette dernière requiert une tension supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque."[24]

**Etage d'adaptation**

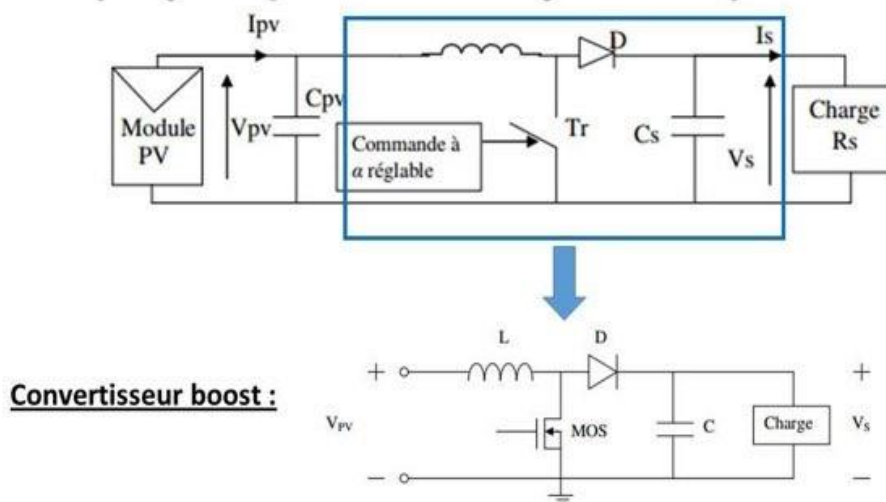


Figure.III.2. Étage d'Adaptation de Type BOOST

Durant la première phase ( $\alpha T$ ), le transistor (S) est en mode de conduction, permettant au courant de s'accroître progressivement dans l'inductance. Pendant cette période, l'inductance stocke de l'énergie. Ensuite, lorsque le transistor (S) se ferme, l'inductance (L), s'opposant à toute diminution de courant (IL), génère une tension qui s'ajoute à la tension de la source, et cette somme est appliquée à la charge (R) via la diode (D). [25]

**III.2.4. Modèle mathématique équivalent:**

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

Pour le premier intervalle  $\alpha T_s$  :

$$I_{c1} = C1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{pv} - I_L \quad (III.1)$$

$$I_{c2} = C2 \frac{dV_O}{dt} = -I_O \quad (III.2)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - R_L I_L \quad (III.3)$$

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

$$I_{c1} = C1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{pv} - I_L \quad (III.4)$$

$$I_{c2} = C2 \frac{dV_O}{dt} = I_L - I_O \quad (III.5)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - V_O - R_L I_L \quad (III.6)$$

### III.3. Ordre pour la Recherche du Ppm (MPPT)

Pour assurer un transfert optimal de puissance entre une source d'alimentation et une charge, il est primordial d'ajuster de manière appropriée le rapport cyclique du convertisseur à découpage.

Cet ajustement permet de maximiser la puissance effectivement délivrée à la charge. Parmi les techniques employées à cette fin, on trouve notamment la méthode de recherche du point de puissance maximale MPPT dont les principes seront abordés dans la section suivante.

#### III.3.1. Principe De L'ordre MPPT

En termes simples, un contrôle MPPT, combiné à un étage intermédiaire d'adaptation, assure le fonctionnement optimal d'un générateur photovoltaïque (GPV) afin de produire en permanence sa puissance maximale. Quelles que soient les conditions météorologiques, telles que la température et l'irradiation solaire, le contrôleur du convertisseur positionne le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM).

Cette optimisation de la chaîne de conversion photovoltaïque est réalisée via un convertisseur statique (CS) piloté par un MPPT. [23]

Cette configuration peut être visualisée dans le schéma de la Figure.III .3.

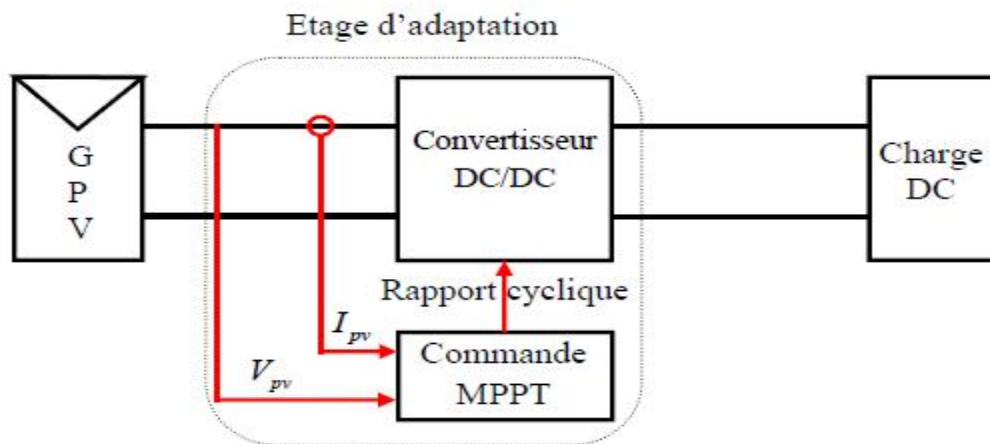


Figure .III.3. Chaîne de conversion d’énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge

La commande MPPT ajuste le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) à l'aide d'un signal électrique approprié afin d'exploiter au mieux la puissance fournie par le générateur photovoltaïque (GPV). L'algorithme MPPT peut être plus ou moins complexe pour rechercher le Point de Puissance Maximale (MPP). En général, il se base sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction des changements des paramètres d'entrée (courant et tension), et donc de la puissance du GPV, jusqu'à atteindre le MPP. [24]

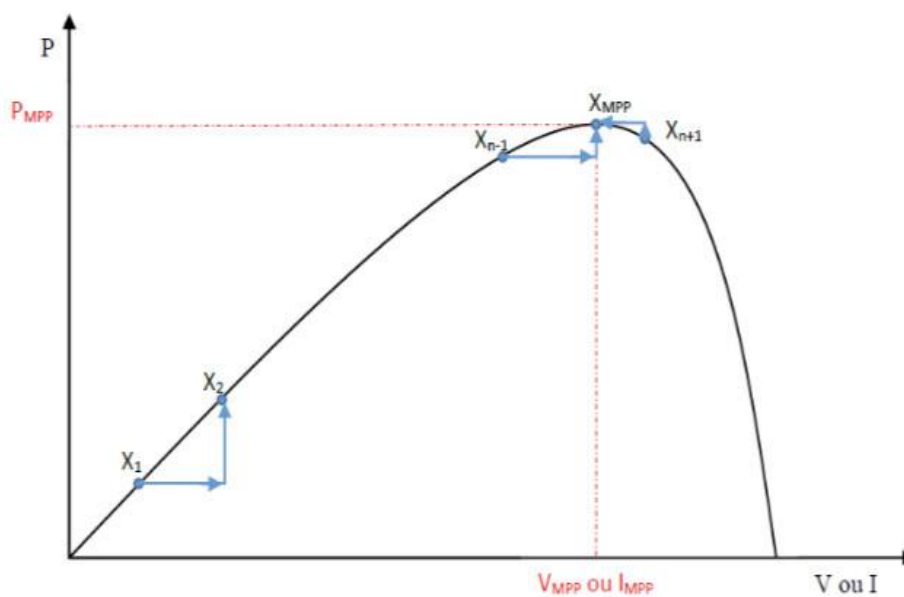


Figure.III.4. Principe de la ordre MPPT

**III.4. Assortiment des ordre MPPT**

Il existe diverses approches pour implémenter les commandes de poursuite du point de puissance maximum  $M_{ppt}$ . Une première classification peut être établie en fonction de la nature de l'implémentation électronique, à savoir analogique, numérique ou hybride. Cependant, un critère de catégorisation plus judicieux réside dans le type de recherche effectuée par ces commandes ainsi que les paramètres d'entrée sur lesquels elles se basent. Cette dernière classification, davantage pertinente, permettra une meilleure compréhension des différentes techniques  $M_{ppt}$ . [25].

**III.4.1. Assortiment des ordres MPPT selon les paramètres d'entrée.****A. Ordres MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS**

La recherche du point de puissance maximale (PPM) dans les systèmes photovoltaïques peut être réalisée par différentes Méthodes de commande MPPT qui analysent l'évolution de la puissance fournie par le Générateur PV. Parmi ces méthodes, on peut citer l'approche  $P_o$  et Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui ajustent le contrôle en fonction de la puissance délivrée pour atteindre le PPM, ainsi que les Commandes basées sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimum (tension et courant) au PPM et les caractéristiques du module PV (tension de circuit ouvert et courant de court-circuit). D'autres techniques s'inspirent des réseaux de neurones, avec des Systèmes à grande capacité de stockage courante tous les cas possible ou des approximations. Chacune de ces approches présente des Avantages propres en termes de précision et de rapidité de réponse pour le suivi du point de puissance maximale. [25].

**B. Ordres MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur**

Certains algorithmes MPPT se basent sur les paramètres de sortie des convertisseurs statiques au lieu des paramètres du générateur photovoltaïque. Par exemple, maximiser le courant de sortie est une technique utilisée lorsque la charge est une batterie.

Dans ces systèmes, une estimation de la puissance maximale est réalisée en tenant compte du rendement du convertisseur.

Plus ce rendement est élevé, plus l'estimation sera précise. Cependant, les systèmes n'utilisant qu'un seul capteur sont généralement moins précis pour le suivi du PPM.

Initialement, la plupart d'entre eux ont été conçus pour des applications spatiales. [25].

### **III.4.2. Assortiment des ordres MPPT selon le type de recherche**

#### **A. MPPT Indirect**

Ce type d'Ordre MPPT exploite la corrélation entre les variables mesurées ( $I_{sc}$  ou  $V_{oc}$ ), qui peuvent être aisément obtenues, et la position approximative du point de puissance maximale (MPP).

Il inclut également des commandes basées sur une estimation du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque (GPV), dérivée d'un modèle paramétrique préalablement établi.

De plus, certaines commandes ajustent la tension optimale en se fondant uniquement sur les variations de température des cellules, relevées par un capteur. Ces stratégies de commande offrent l'avantage d'être simples à mettre en œuvre.

Elles conviennent principalement aux systèmes peu coûteux et moins précis destinés à des zones géographiques caractérisées par une stabilité climatique [11-25].

#### **B. MPPT Direct**

L'objectif des ordres MPPT est d'identifier le point de fonctionnement optimal en analysant les mesures de courant, tension ou puissance du système photovoltaïque. Cela leur permet de s'adapter aux éventuelles fluctuations de fonctionnement du générateur PV.

Généralement, ces méthodes reposent sur des algorithmes de recherche itérative qui tendent à atteindre l'extremum de la courbe de puissance sans perturber le fonctionnement en régime permanent.

Le principe consiste à appliquer des incréments réguliers de tension et à observer l'impact sur la puissance de sortie pour ajuster la direction de recherche en conséquence. Afin d'éviter les erreurs d'interprétation, certains algorithmes corrigent les effets des variations rapides d'ensoleillement.

La détermination du point de puissance maximale nécessite la mesure de la tension et du courant pour en déduire la puissance du générateur PV.

D'autres techniques introduisent de légères perturbations sinusoïdales sur la fréquence de découpage, permettant d'analyser les composantes alternatives et continues de la tension pour se rapprocher au plus près du MPP, offrant ainsi une grande précision et réactivité [11-25].

### **III.5. Les Algorithmes MPPT**

Les différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale reposent sur des principes de fonctionnements variés, certains offrant de meilleures performances que d'autres, en fonction des caractéristiques du générateur photovoltaïque considéré.

L'analyse détaillée des principales méthodologies de recherche du PPM présentées dans ce chapitre nous a permis de dresser un état des lieux clair des approches actuelles, tout en mettant en évidence les axes sur lesquels des améliorations restent à apporter.

#### **III.5.1. Approche de la Tension constant**

Une des techniques de poursuite du point de puissance maximale est la méthode dite de tension constante, également connue sous l'appellation de méthode de la tension de circuit ouvert. Son principe repose sur la mesure en temps réel de la tension à vide  $V_{oc}$  du générateur photovoltaïque et sur l'approximation linéaire, généralement admise, liant cette tension à la tension  $V_{mpp}$  au point de puissance maximale. Cette relation s'exprime sous la forme [26-27]

$$V_{mpp} = K1 * V_{oc} \quad (III.7)$$

représente un facteur de proportionnalité dont la valeur typique se situe dans l'intervalle [0,72 - 0,87].

Une fois ce coefficient  $K1$  déterminé, il est possible de calculer la tension  $V_{mpp}$  désirée en utilisant l'expression ci-dessus et la valeur de  $V_{oc}$  mesurée périodiquement lors d'une ouverture momentanée du convertisseur (circuit ouvert).

La tension  $V_{mpp}$  ainsi obtenue sert alors de consigne de référence. Le fonctionnement de cette méthode repose sur la comparaison entre la tension réelle  $V_{PV}$  aux bornes du panneau et la tension de référence  $V_{ref}$  ( $= V_{mpp}$ ).

Le signal d'erreur résultant est traité de manière à asservir la tension  $V_{PV}$  à la consigne  $V_{ref}$ .

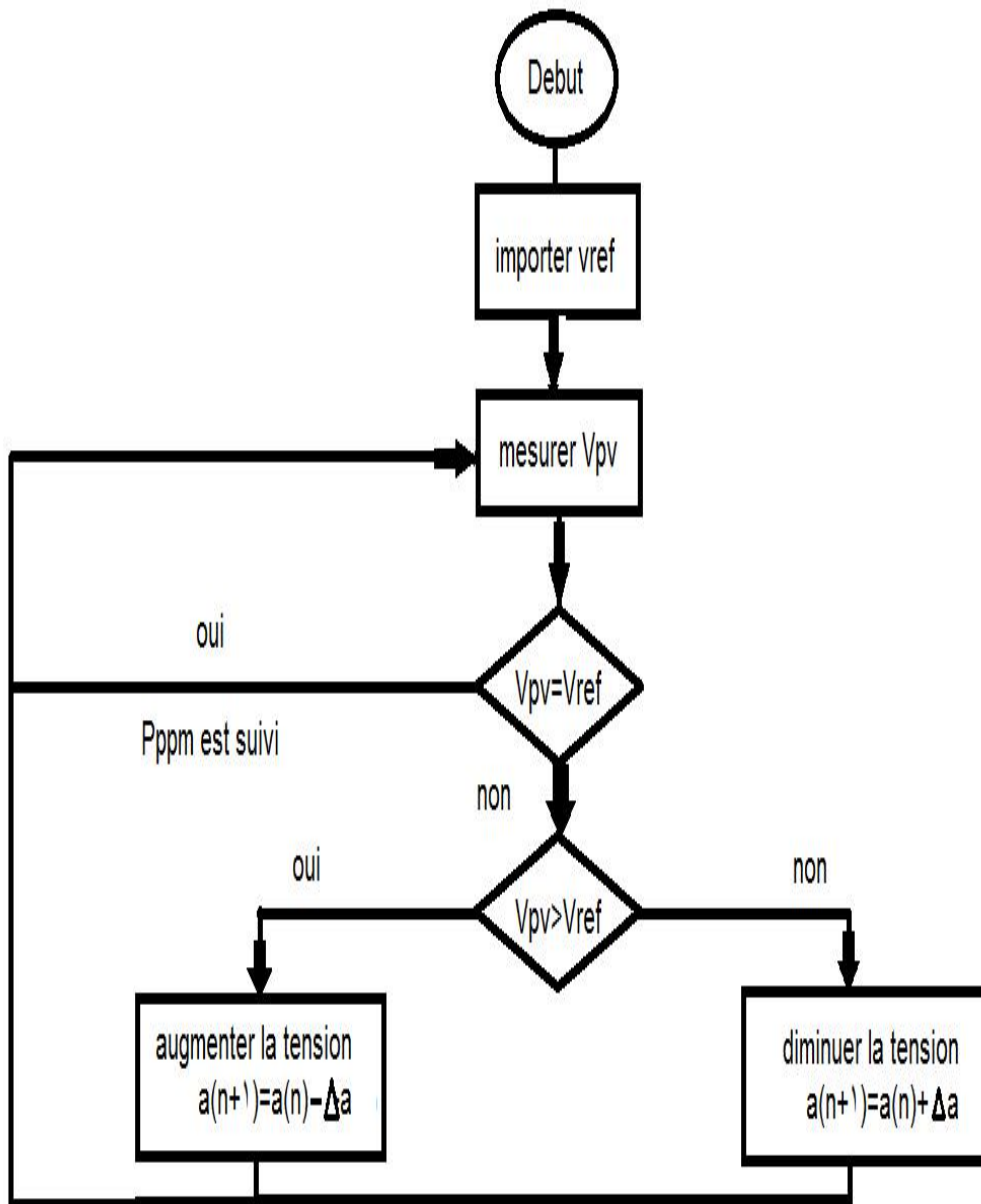


Figure. III.5. Algorithme de la Tension constant

Bien que cette approche bénéficie d'une réponse rapide face aux variations des conditions opérationnelles et d'une absence de fluctuations à l'état stationnaire, des inconvénients notables subsistent.

En effet, la tension correspondant au point de puissance maximale n'est pas une valeur fixe mais dépend des conditions d'ensoleillement et de température ambiante.

Par conséquent, la tension de référence utilisée comme consigne doit être ajustée en permanence pour s'adapter aux variations météorologiques au fil des saisons.

De plus, l'approximation couramment admise situant le MPP entre 72% et 77% de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  n'est pas toujours vérifiée. Un autre point négatif réside dans la perte de la puissance disponible induite par les phases de déconnexion périodique de la charge nécessaires pour mesurer  $V_{oc}$ . [28]

### **III.5.2. Approche Du Courant Constant**

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit  $I_{sc}$  (short-circuit current) et la relation linéaire approximative (II.8) liant cette courant avec le courant de point maximal  $I_{MPP}$  du GPV [23] :

$$I_{MPP} = k_2 * I_{sc} \quad (III.8)$$

Une autre méthode de poursuite du MPP consiste à mesurer le courant de court-circuit  $I_{sc}$  du générateur photovoltaïque, duquel on déduit la valeur du courant optimal  $I_{mpp}$  grâce à la relation approximative  $I_{mpp} = k_2 * I_{sc}$ , où  $k_2$  représente un coefficient de proportionnalité typiquement compris entre 0,77 et 0,91 pour un module PV donné.

Cependant, la mesure de  $I_{sc}$  en fonctionnement pose certaines difficultés pratiques.

Pour y remédier, un commutateur est généralement ajouté au convertisseur afin de pouvoir court-circuiter ponctuellement le panneau solaire et ainsi permettre la mesure du courant  $I_{sc}$  à l'aide d'un capteur dédié.

A partir de cette valeur de  $I_{sc}$ , on calcule la puissance délivrée pour différents niveaux de tension.

Si l'écart entre la puissance calculée et la puissance maximale théorique excède un seuil de tolérance prédéfini.

la tension est alors ajustée à la hausse ou à la baisse en fonction du signe de cet écart, dans le but de minimiser la différence.

Ce processus itératif se poursuit jusqu'à ce que le couple tension-courant converge vers le point de puissance maximale avec une erreur contenue dans la plage de tolérance spécifiée.

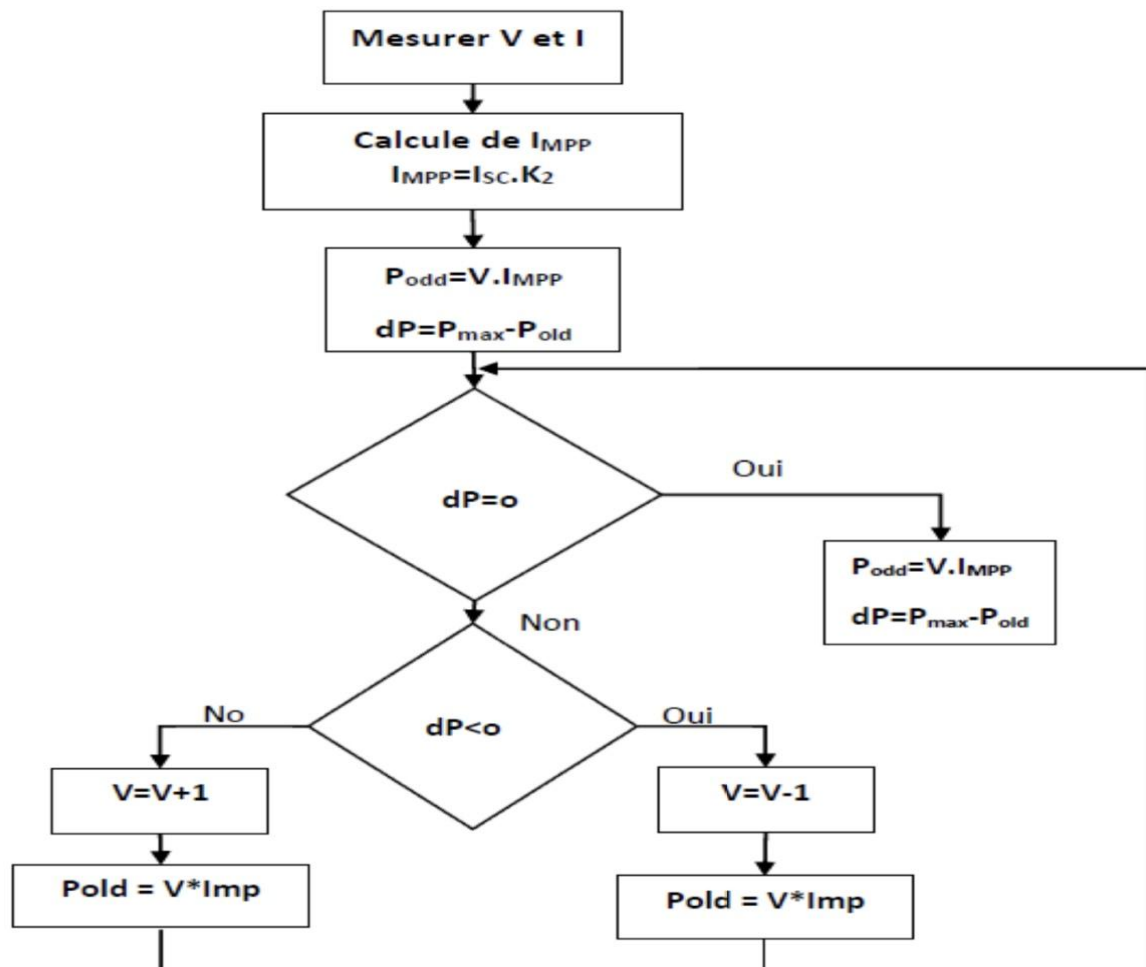


Figure.III.6. Algorithme du constant courant

### III.5.3. Perturbation Et Observation P&O

L'algorithme de Perturbation et Observation est couramment privilégié pour la recherche du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques en raison de sa simplicité conceptuelle et de sa facilité de mise en œuvre. Conformément à son appellation, cette technique itérative consiste à appliquer des perturbations successives, à la hausse ou à la baisse, sur la consigne de tension ou de courant de référence, puis à analyser les variations de puissance résultantes. Cependant, lors de l'implémentation de cette méthode, le choix judicieux de la variable à perturber revêt une importance capitale pour optimiser le rendement énergétique du système. En effet, il convient de sélectionner la grandeur qui présente la moindre sensibilité aux fluctuations météorologiques afin de garantir un suivi précis du point de puissance maximale quelles que soient les conditions climatiques.

En général, le courant photovoltaïque est plus sensible aux changements de rayonnement, tandis que la tension photovoltaïque réagit davantage aux fluctuations de température. Étant donné que les variations de température sont généralement lentes et limitées, il est recommandé de contrôler la tension photovoltaïque GPV. [31]. La méthode P&O implique de provoquer de légères perturbations sur la tension photovoltaïque afin de suivre les variations de puissance [32]. Si une augmentation de la tension  $V_{pv}$  entraîne une augmentation de la puissance  $P_{pv}$ , cela indique que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point de puissance maximale (PPM). En revanche, si la puissance diminue, cela signifie que le système est au-delà du PPM. Une logique similaire s'applique lorsque la tension diminue. En analysant les effets des variations de tension sur la courbe de puissance  $P(V)$ , il est possible de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de l'optimiser en ajustant les paramètres de commande en conséquence

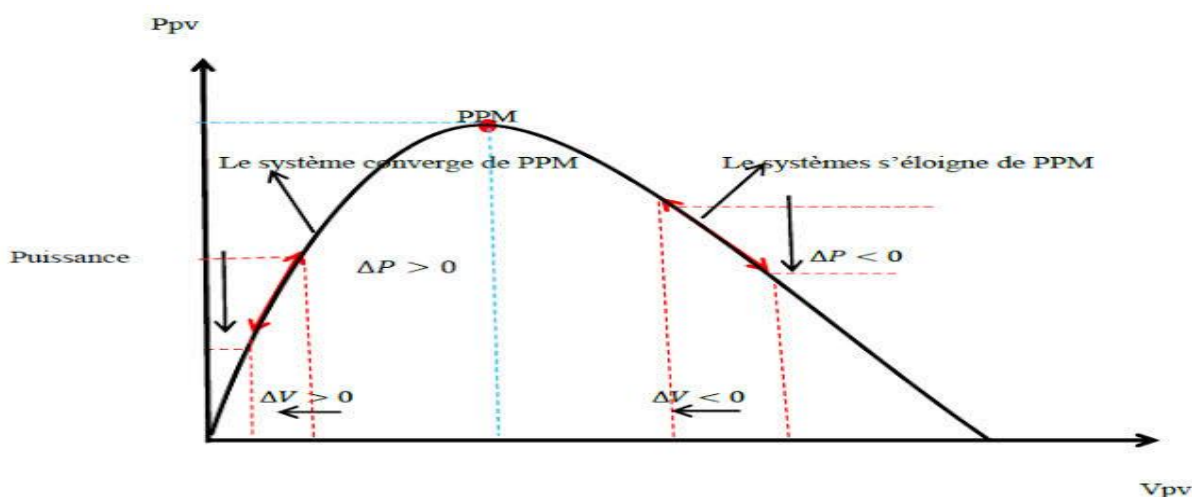


Figure.III.7. Recherche du PPM par la méthode (P&O)

À partir de ces analyses sur les répercussions des variations de tension sur la courbe de caractéristique  $P(V)$ , il devient aisé de localiser le point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale (PPM) et de le guider vers son maximum en utilisant une commande adéquate. Ce type de contrôle nécessite deux capteurs, à savoir le courant et la tension du générateur photovoltaïque (GPV), pour évaluer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est souvent privilégiée pour implémenter la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent également être employés. [29]

La Figure III.8 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

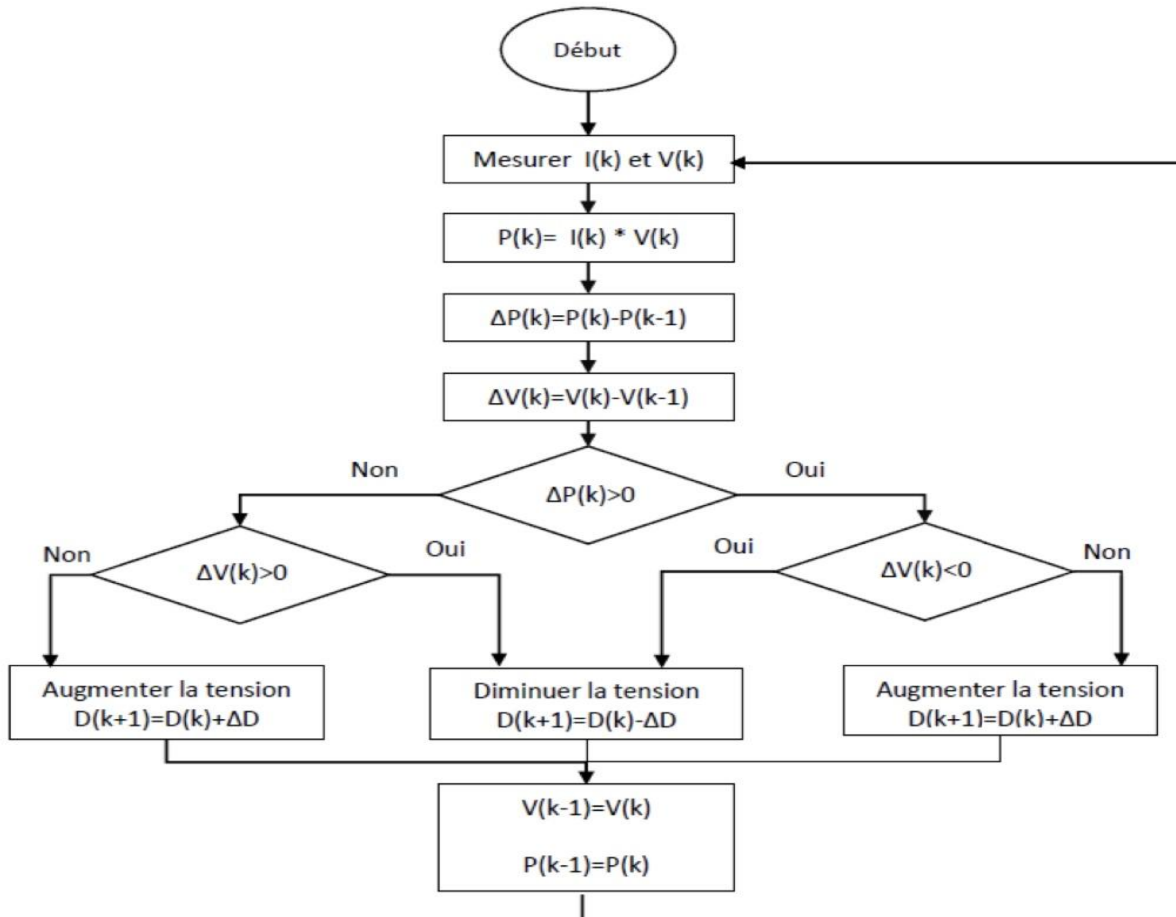


Figure .III.8. l'algorithme de P&O classique

Bien que sa mise en œuvre aisée contribue à sa large diffusion, l'algorithme de Perturbation et Observation souffre d'une limitation intrinsèque. Une fois le point de puissance maximale atteint, le fonctionnement s'accompagne inévitablement d'oscillations autour de ce point optimal. Ce phénomène d'oscillations résulte de la nécessité de réitérer cycliquement la procédure de recherche du MPP, même lorsque le régime permanent est établi. L'amplitude de ces oscillations est directement liée à l'importance de la perturbation appliquée. Plus cette dernière sera élevée, plus les oscillations seront prononcées autour du point de fonctionnement idéal, engendrant ainsi des pertes énergétiques superflues. [33]

Lorsque la largeur de pas est grande, l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) réagira rapidement aux variations brusques des conditions de fonctionnement.

Cependant, cela entraînera une augmentation des pertes lors des périodes de conditions stables ou de changements lents.

En revanche, une largeur de pas très petite réduira les pertes dans les périodes de conditions stables ou de changements lents. Cependant, le système ne pourra plus suivre efficacement les variations rapides de la température ou de l'insolation.

L'obtention d'un compromis satisfaisant entre précision et rapidité de réponse représente un défi majeur lors de l'optimisation d'une commande de type Perturbation et Observation (P&O). Ce critère crucial rend complexe le réglage optimal de ce type d'algorithme. Un autre inconvénient de cette méthode réside dans son comportement lors de variations brusques des conditions météorologiques. Comme illustré, en cas de changement rapide de l'éclairement par exemple, le point de fonctionnement peut se retrouver éloigné du nouveau point de puissance maximale. L'algorithme P&O, en se basant uniquement sur la variation de puissance induite par sa propre perturbation, poursuit alors son déplacement dans une direction erronée, s'écartant davantage du MPP réel. Ce processus se perpétue jusqu'à ce que les conditions se stabilisent, engendrant un délai de réponse et des pertes de production. Ce phénomène trouve son origine dans l'incapacité de la méthode à distinguer les fluctuations induites par sa propre perturbation des variations spontanées résultant des changements météorologiques.[29]

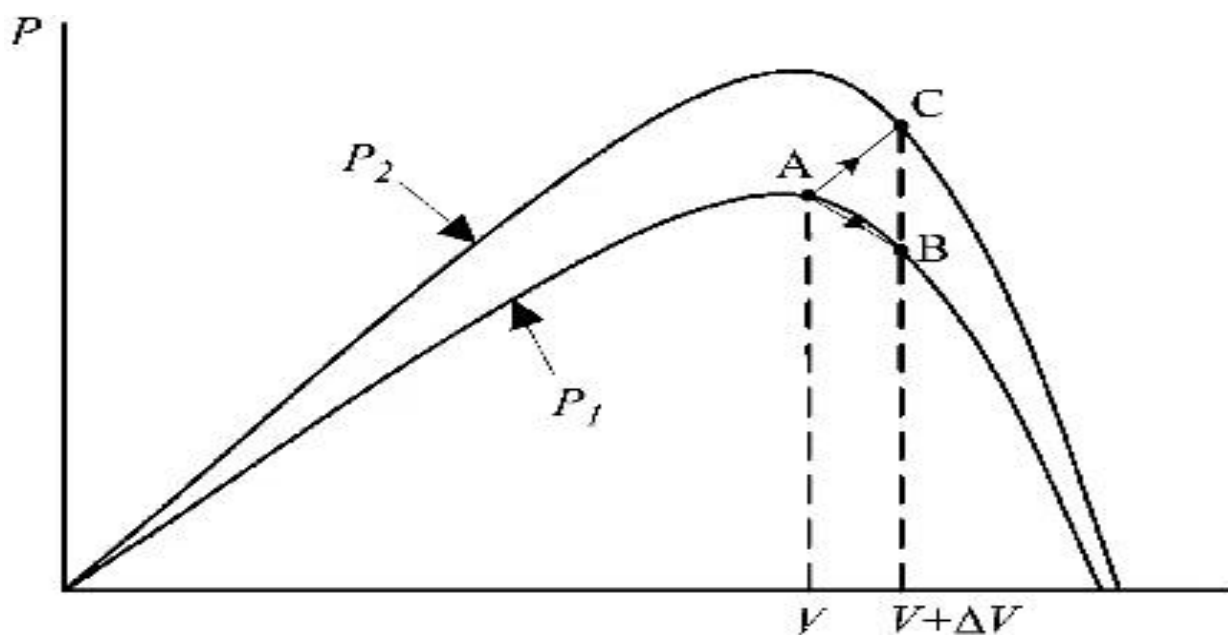


Figure III .9. Divergence de la méthode P&O

Afin de pallier les limitations de la méthode P&O classique, des variantes améliorées de cet algorithme ont été proposées. Une des approches consiste à introduire un troisième point de fonctionnement dans le processus décisionnel, en plus des deux points utilisés habituellement. La comparaison des mesures de puissance sur ces trois points distincts permet de déterminer plus judicieusement le sens de la prochaine perturbation à appliquer. Cette technique, dénommée "méthode de comparaison pondérée à trois points", considère le point de fonctionnement actuel A, un premier point B obtenu après une perturbation à partir de A, ainsi qu'un troisième point C résultant d'une double perturbation dans le sens opposé à celui qui a conduit à B [25].

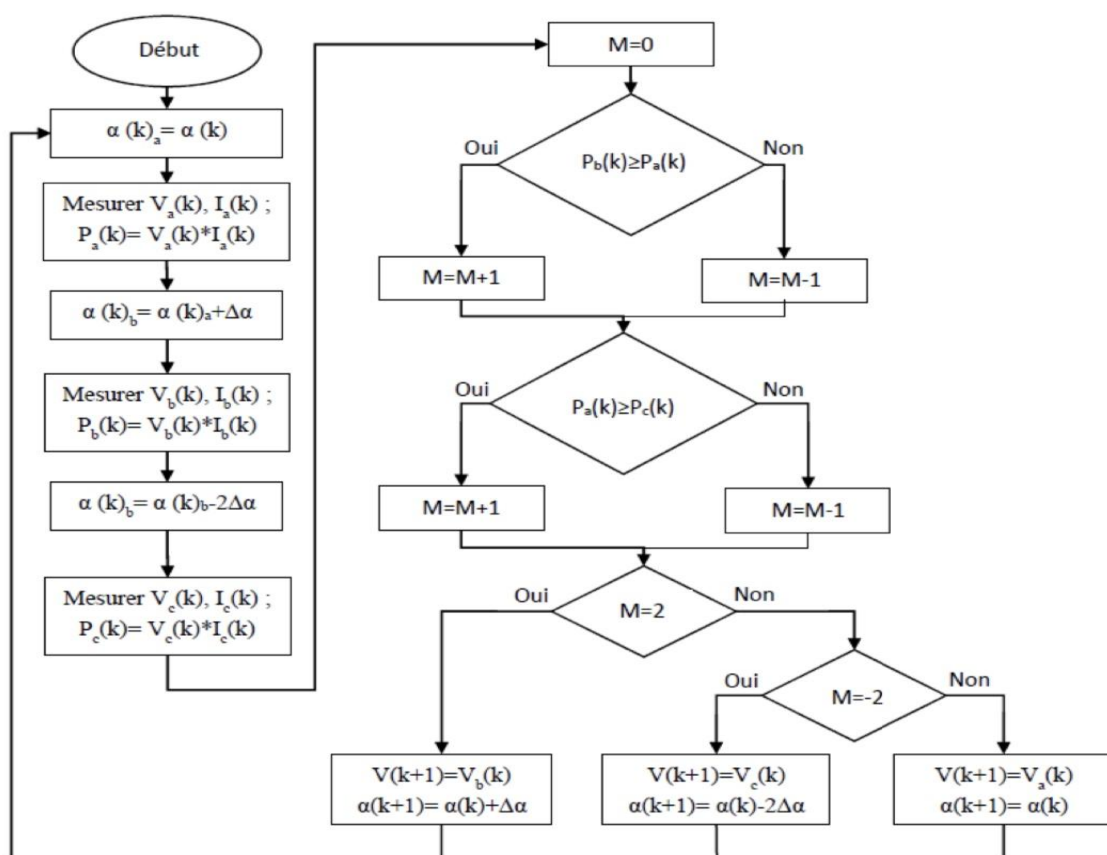


Figure III.10 algorithme du poids d'un troisième point

Une alternative serait de conserver l'algorithme de la méthode P&O classique tout en rendant le pas de perturbation variable. Dans cette approche, plusieurs échantillons de puissance  $P_{pv}$  sont utilisés pour ajuster dynamiquement l'amplitude de la perturbation de manière à ce qu'elle soit réduite lorsque le système se rapproche du point de puissance maximale.

Certaines études [23] suggèrent que le pas devrait être:

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \right| \quad (\text{III.10})$$

La recherche dans ce domaine est toujours en cours.

**III.5.4. Conductance Incrémentale**

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous

$$\mathbf{G} = \frac{\mathbf{I}_{pv}}{\mathbf{V}_{pv}} \quad (\text{III.11})$$

Et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par

$$\Delta \mathbf{G} = \frac{\Delta \mathbf{I}_{pv}}{\Delta \mathbf{V}_{pv}} \quad (\text{III.12})$$

En outre, l'évolution de la puissance du module (PPV) en fonction de la tension (VPV) fournit des indications sur la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale (PPM). Lorsque la dérivée de la puissance est nulle, cela indique que le système se trouve sur le PPM. Si la dérivée est positive, le point de fonctionnement se situe à gauche du maximum, tandis que si elle est négative, il se trouve à droite. [26]

La (Figure. III. 12) permet d'écrire les conditions suivantes :

Si  $\frac{dp_{pv}}{dv_{pv}} > 0$  le point de fonctionnement est à gauche du PPM,

Si  $\frac{dp_{pv}}{dv_{pv}} = 0$  le point de fonctionnement est sur le PPM,

Si  $\frac{dp_{pv}}{dv_{pv}} < 0$  le point de fonctionnement est sur la droite du PPM

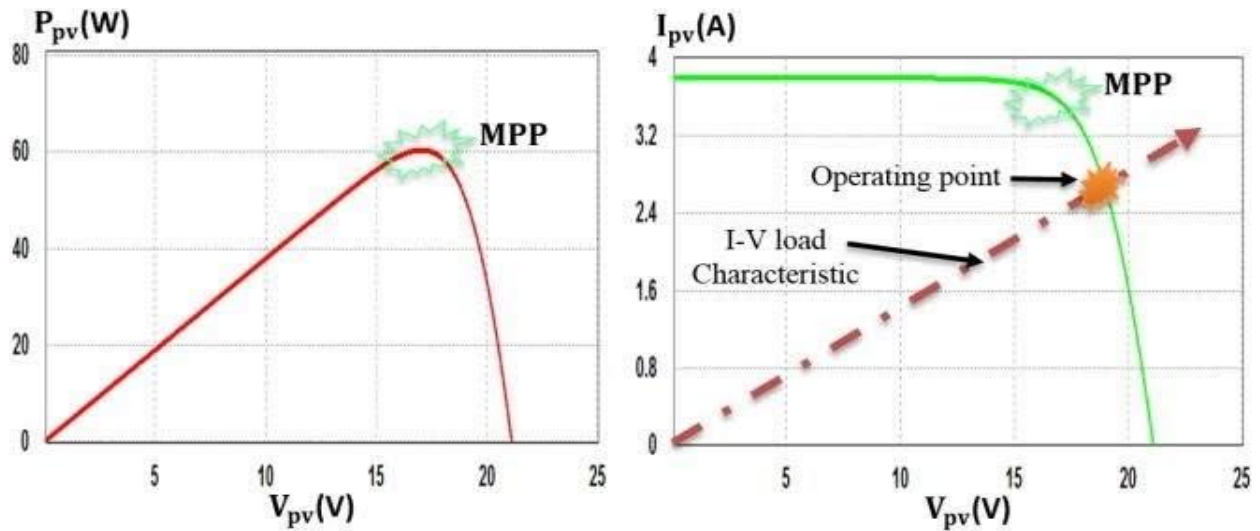


Figure .III.11 Positionnement du point de fonctionnement (1kWatt/m2, T= 25C°)

$$\frac{dp_{pv}}{dv_{pv}} = \frac{d[I_{pv} * V_{pv}]}{dv_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} * \frac{dI_{pv}}{dv_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} * \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta v_{pv}} \tag{III.13}$$

On peut donc écrire une nouvelle condition sur la différence de connexion, comme indiqué en

(III.11) sur la dérivée de puissance

$$\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta v_{pv}} > - \frac{I_{pv}}{v_{pv}} \quad \text{le point de fonctionnement est à gauche du PPM,}$$

$$\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta v_{pv}} = - \frac{I_{pv}}{v_{pv}} \quad \text{le point de fonctionnement est sur le PPM,}$$

$$\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta v_{pv}} < - \frac{I_{pv}}{v_{pv}} \quad \text{le point de fonctionnement est sur la droite du PPM}$$

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance  $\frac{I_{pv}}{v_{pv}}$  avec celle de l'incrément de conductance  $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta v_{pv}}$  comme l'illustre l'algorithme de la (figure.III.12). Vr correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur.

Lorsque la tension de référence Vr est égale à la tension optimale Vopt correspondant au point de puissance maximale, l'algorithme maintient ce point de fonctionnement jusqu'à la détection d'une variation significative Δ. Cette variation est le signe d'un changement des

conditions climatiques nécessitant la recherche d'un nouveau PPM. Afin d'atteindre ce nouveau point optimal, l'algorithme procède par incréments ou décréments successifs de la valeur de  $V_r$ . Ce processus itératif d'ajustement de la tension de référence se poursuit jusqu'à ce que le nouveau PPM soit atteint. Un schéma explicatif illustre le principe de fonctionnement de cette méthode basée sur la variation de la consigne de tension  $V_r$ . [34][22]

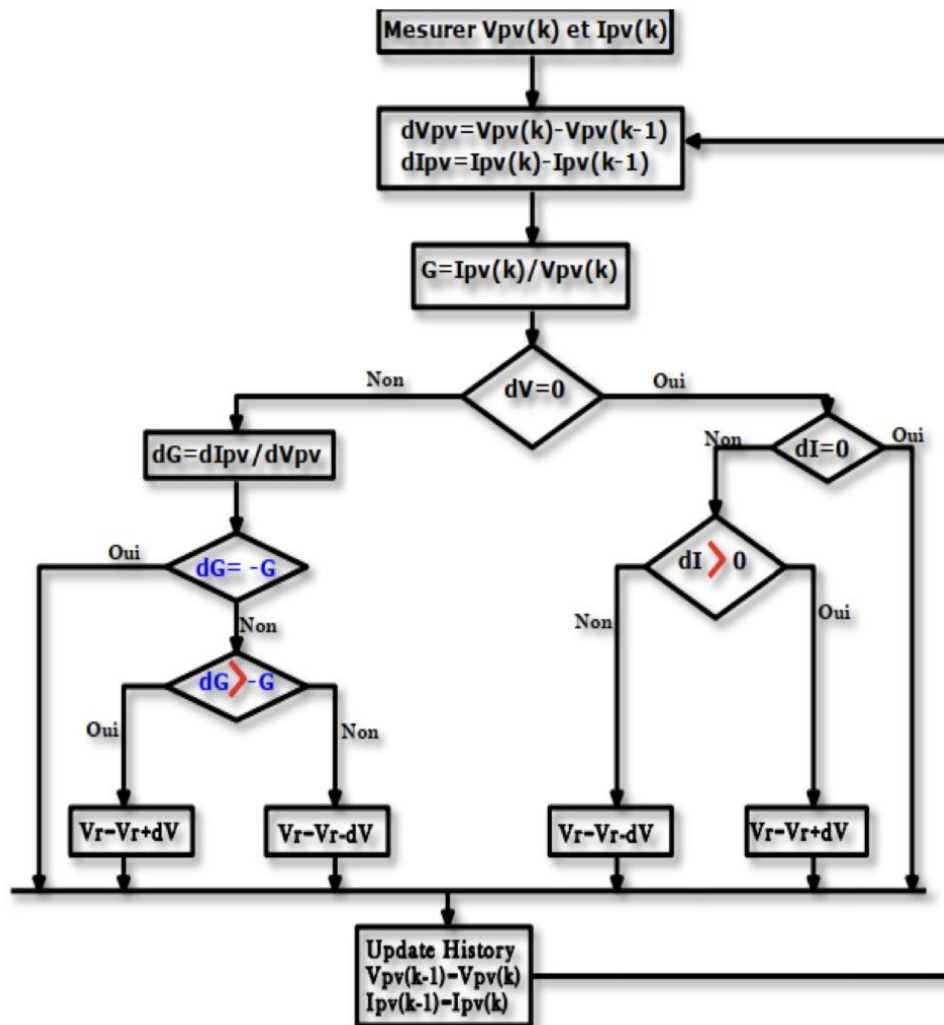


Figure.III.12. Algorithme MPPT Incrément de Conductance (Inc.CoN)

### III.5.5. l'ordre MPPT floue

Grâce aux progrès réalisés dans le domaine des microcontrôleurs, les techniques de commande floue, connues sous l'appellation "Fuzzy Logic Control", gagnent en popularité. [35-36] L'attrait de cette approche réside dans sa capacité à fonctionner avec des données d'entrée imprécises, sans nécessiter de modèle mathématique extrêmement précis. De plus, elle permet de traiter efficacement les non-linéarités. Le principe de la commande floue repose sur deux

variables d'entrée : l'erreur  $E$  et la variation de cette erreur  $\Delta E$ . À partir de ces deux paramètres d'entrée, une variable de sortie  $\Delta\alpha$ , représentant la variation du rapport cyclique, est déterminée. La valeur de cette variable de sortie, utilisée pour ajuster le convertisseur statique afin d'atteindre le point de puissance maximale, est calculée au moyen d'une table de vérité prenant en compte l'évolution des variables d'entrée  $E$  et  $\Delta E$ . D'une manière générale, la mise en œuvre d'une commande par logique floue implique trois étapes fondamentales, communément désignées dans la littérature sous les termes suivants:

La fuzzification (fuzzification)

La consultation de la base de règles (rule base procession)

La défuzzification (défuzzification)

Lors de l'étape de fuzzification, les valeurs numériques des variables d'entrée sont converties en variables linguistiques pouvant prendre cinq qualificatifs différents:

NB : Négative Grande

NS : Négative Petite

ZE : Zéro

PS : Positive Petite

PB : Positive Grande

Comme l'illustre la structure de base décrite dans la littérature, cette représentation linguistique.

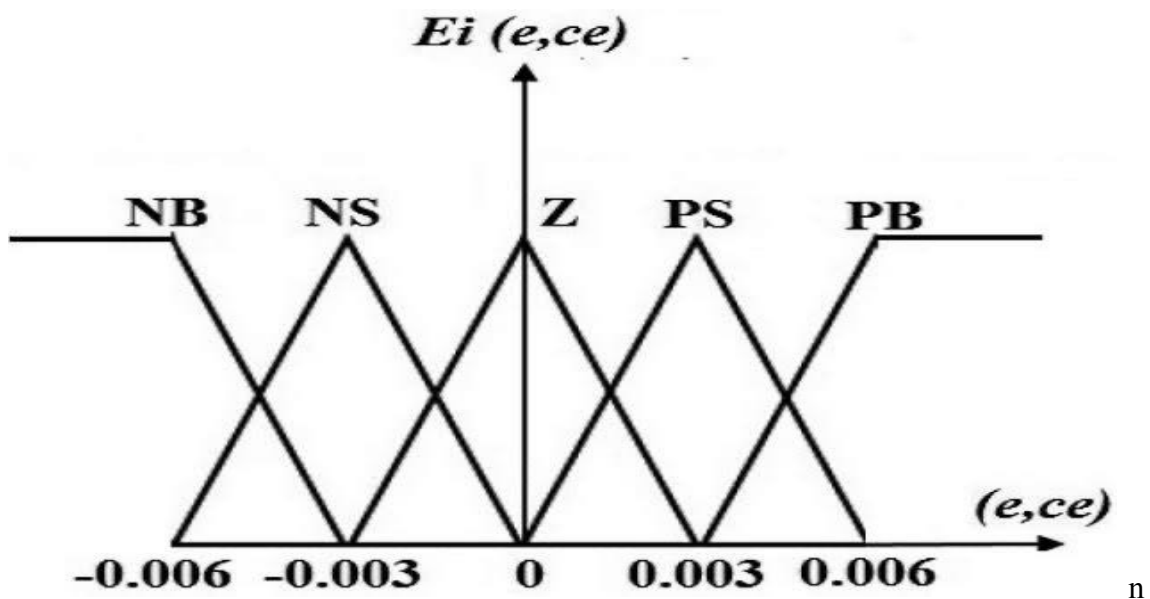


Figure.III.13. Structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes.

$$\frac{P(n)-P(n-1)}{V(n)-V(n-1)} \tag{III.14}$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \tag{III.15}$$

Une expression mathématique pour les développements et également un tableau variationnel présenté dans le tableau .III.2, où ce point correspond au paramètre de sortie delta d

Tab.III.1. Examinons l'exemple d'une table de vérités correspondant à un raisonnement logique flou.

	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

Le qualificatif linguistique associé à la variable de sortie ΔD dépend des différentes combinaisons possibles entre les valeurs des variables d'entrée E et ΔE. À titre d'exemple, si E prend la valeur PB (Positive Grande) et ΔE la valeur ZE (Zéro), cela indique que le point de fonctionnement actuel est très éloigné du point de puissance maximale (PPM). Dans ce cas, en consultant la base de règles, la valeur attribuée à la variable de sortie ΔD sera PB, impliquant ainsi une forte augmentation du rapport cyclique afin de se rapprocher du PPM.

En résumé, les ajustements apportés au rapport cyclique par la variation ΔD sont déterminés en fonction de l'écart entre le point de fonctionnement courant et le PPM. Ainsi, plus le point de fonctionnement se rapproche du PPM, plus les incréments appliqués à ΔD deviennent fins, jusqu'à atteindre le point optimal. L'étape de défuzzification consiste à convertir la variable

linguistique  $\Delta D$  en une valeur numérique, afin de piloter le convertisseur de puissance et d'atteindre le PPM.

Une étude menée par Noppadol Khaehintung en 2004 a démontré que l'utilisation d'une commande MPPT basée sur la logique floue permet d'améliorer significativement le temps de réponse, celui-ci étant réduit d'un facteur 8 par rapport à une commande conventionnelle de type Perturb & Observe (P&O). Bien que la valeur d'incrémentation ne soit pas précisée dans cet article, une analyse des résultats suggère qu'elle est relativement faible, entraînant de légères oscillations autour du point de puissance maximale (PPM) et expliquant ainsi la différence en termes de réponse dynamique observée.

Un autre aspect à prendre en compte est le temps nécessaire à la commande pour se stabiliser sur un nouveau PPM après une variation des conditions opératoires. La commande floue met 1,75 seconde pour atteindre ce régime stable, tandis que la commande P&O ne requiert que 1,25 seconde, soit dès qu'elle a atteint le PPM.

Une analyse plus approfondie reste nécessaire pour évaluer pleinement les avantages de cette nouvelle méthode par rapport à l'algorithme P&O conventionnel, déjà complexe. Une comparaison directe avec la méthode Hill Climbing montre des améliorations légères du temps de réponse mais une erreur statique relativement faible avec la commande floue. Dans ce cas, contrairement à l'exemple précédent, la valeur d'incrémentation joue un rôle crucial. Malheureusement, la qualité des relevés ne permet pas de déterminer précisément le gain en termes de temps de réponse et de rendement en raison d'une échelle de temps et de calibres de mesure trop grands. En résumé, cette méthode se révèle très performante lors de changements des conditions climatiques, mais sa précision en régime permanent est étroitement liée à sa complexité, notamment la table de règles utilisée, nécessitant un microcontrôleur puissant capable de traiter les nombreux paramètres électriques du panneau solaire. Typiquement, une telle commande peut offrir les meilleures performances en termes de précision et de rapidité d'atteinte du PPM, mais engendre inévitablement une consommation d'énergie non négligeable due au microprocesseur ainsi qu'un surcoût de mise en œuvre. [37][28]

### **III.5.6. Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels**

La technique des réseaux de neurones gagne également en popularité, offrant une alternative puissante pour résoudre des problèmes complexes. Au fil des années, son utilisation s'est étendue à divers domaines d'application en raison de sa capacité à fonctionner comme une

"boîte noire", ne nécessitant pas de connaissances détaillées sur le fonctionnement interne du système. Les réseaux de neurones établissent des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les données précédentes mémorisées. Un autre avantage réside dans leur capacité à traiter des problèmes de grande complexité en tenant compte des paramètres interdépendants.

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées, nommées :

- Couche d'entrée (Input layer),
- Couche cachée (Hidden layer),
- Couche de sortie (Output layer).

Comme le montre la (figure.III.14)

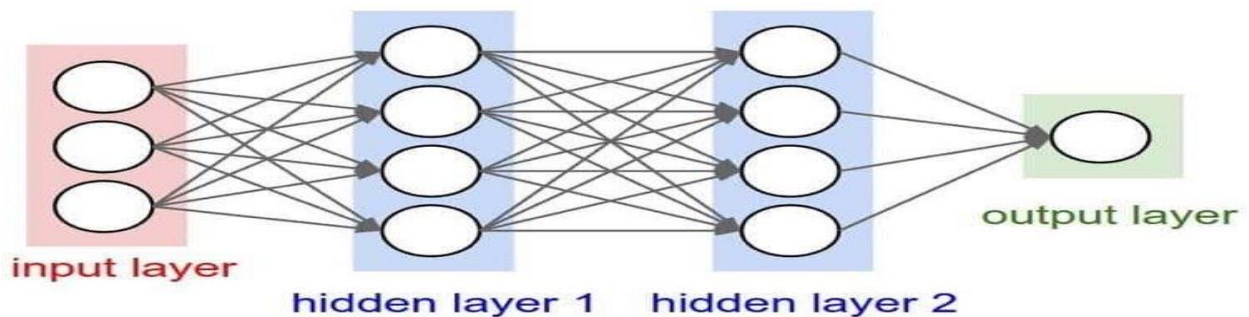


Figure.III.14. Exemple d'un réseau de neurones

La structure des réseaux de neurones artificiels, notamment le nombre de nœuds dans les différents canapés, est déterminée en fonction du niveau de précision recherché et des exigences d'apprentissage pour la commande visée.

Dans le cas d'une commande Mppt (Poursuite du Point de Puissance Maximale) pour des systèmes photovoltaïques, les variables d'entrée peuvent être constituées des paramètres caractéristiques du générateur PV (tension de circuit ouvert, courant de court-circuit), éventuellement associées à des données météorologiques telles que la température ambiante.

Il est également possible d'utiliser plusieurs signaux de référence, incluant a minima le rapport cyclique, pour commander le convertisseur statique de manière à maintenir le fonctionnement au point de puissance maximale le plus fréquemment possible.

Les performances de poursuite du Ppm dépendent principalement de l'algorithme implémenté dans la couche cachée du réseau de neurones et de l'architecture du réseau elle-même. Ainsi, l'importance relative entre deux nœuds, représentée par le poids synaptique  $W_{ij}$ , doit être

judicieusement déterminée afin d'assurer une identification précise des différents points de puissance maximale.

Les poids  $W_{ij}$  doivent être initialement déterminés avec le plus grand soin possible via des procédures d'apprentissage laborieuses et spécifiques à chaque générateur photovoltaïque, chaque emplacement d'installation et chaque type de charge.

De plus, cet apprentissage doit être régulièrement révisé (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau. Cette exigence rend cette méthode de commande fastidieuse en termes d'entretien et de maintenance.

Malgré le nombre important de ces commandes MPPT décrites dans la littérature, il n'existe pas encore d'application industrielle connue les utilisant. [37]

### **III.6. Critères d'évaluation d'une commande MPPT**

L'évaluation des performances d'une stratégie de commande visant à extraire le maximum de puissance d'un système photovoltaïque passe par l'analyse de sa capacité à positionner le point de fonctionnement du système au plus près du point théorique où la puissance délivrée est maximale. La puissance effectivement produite par le générateur solaire dépend directement de la technique de contrôle implémentée au niveau du convertisseur, qu'il s'agisse d'un algorithme MPPT, d'une régulation de tension ou encore d'une simple connexion directe. Le rapport entre la puissance réellement extraite et la puissance maximale théorique que pourrait fournir le module PV dans les conditions météorologiques données permet de quantifier le rendement de la commande utilisée pour piloter le convertisseur statique.

En d'autres termes, ce taux de rendement représente les pertes de puissance encouragées par rapport au potentiel maximal du générateur en raison de l'imperfection de la stratégie de contrôle appliquée.

$$\eta_{\text{mppt}} = \frac{P_{in}}{P_{max}} \quad (\text{III.16})$$

Les performances d'une commande MPPT ne se limitent pas uniquement à son rendement ( $\eta_{\text{MPPT}}$ ). D'autres critères, abordés dans la suite du document, comme le temps de réponse et sa capacité à fonctionner sur une large gamme de puissances, sont également essentiels pour évaluer les qualités de ce type de commande. [38]

**III.6.1. Simplicité et Coût**

Lors de la conception d'une stratégie de poursuite du point de puissance maximale, il ne faut pas seulement considérer les performances théoriques attendues, mais également veiller à la simplicité de l'algorithme retenu.

En effet, plus la méthode sera complexe, plus son implémentation sera ardue et plus le nombre élevé de calculs nécessaires risquera d'engendrer des pertes énergétiques non négligeables. Par conséquent, l'objectif doit être d'opter pour une commande MPPT relativement épurée afin de garantir une frugalité calculatoire permettant de minimiser sa consommation d'énergie et, par voie de conséquence, de contenir les coûts de développement. Cette sobriété algorithmique est indispensable pour s'assurer que les bénéfices en termes de gain de production apportés par la commande justifient le surcoût induit par sa mise en œuvre.

En effet, il est crucial de garder à l'esprit que dans un environnement énergétique hautement concurrentiel, l'ajout d'un étage d'adaptation avec une commande MPPT doit offrir un avantage énergétique qui justifie le coût supplémentaire. Sinon, cette solution ne sera jamais viable sur le plan industriel.

Dans le cas contraire, même si la commande présente des performances optimales en termes de rendement, les contraintes qu'elle impose pourraient rendre son choix peu attractif pour ce type d'application. [37]

**III.6.2. Réponse dynamique**

Un ordre MPPT doit démontrer une excellente réactivité dynamique pour pouvoir contrôler efficacement l'étage d'adaptation et garantir une recherche rapide du nouveau P<sub>pm</sub> en réponse aux variations de radiation ou de température. [37]

**III.6.3. Flexibilité**

Une commande MPPT doit offrir précision et stabilité quelles que soient ses conditions d'utilisation. En d'autres termes, elle ne devrait pas être limitée à une seule technologie de panneau solaire.

Elle doit être aussi universelle que possible, capable de fonctionner avec différents types de panneaux solaires sans nécessiter de modifications importantes, tout en maintenant un niveau élevé de précision et de robustesse. [37]

**III.6.4. Compétitive sur une large gamme de puissance**

Le rôle fondamental d'une stratégie d'ordre Mppt (Maximum Power Point Tracking) intégrée à un système photovoltaïque est d'assurer un fonctionnement permettant d'extraire le maximum de puissance du module solaire, quelles que soient les conditions d'ensoleillement. L'efficacité d'un tel algorithme de poursuite du point de puissance maximale se juge sur sa capacité à positionner le point de fonctionnement du générateur PV aussi proche que possible du point théorique où la puissance délivrée est maximisée. Un ordre MPPT performante se doit ainsi de minimiser l'erreur statique, c'est-à-dire l'écart entre le point de fonctionnement réel et le point de puissance maximale, et ce, sur une large plage de niveaux de puissance. [37]

**III.7. Conclusion**

Cette section a constitué le cœur le plus essentiel et complexe de notre étude. Nous nous sommes attachés à exposer le principe fondamental de la recherche du point de puissance maximale, tout en dressant un panorama des différentes catégories de stratégies de commande MPPT existantes. Une analyse approfondie des principales techniques répertoriées dans la littérature a été menée. La diversité des architectures de commande MPPT témoigne du caractère extrêmement dynamique et en constante évolution de ce champ de recherche. Elle souligne également la difficulté de dégager une ou plusieurs solutions universelles permettant d'atteindre une poursuite optimale du point de puissance maximale dans toutes les conditions opérationnelles

# **Chapitre IV**

## **Simulation, résultat et discussions**

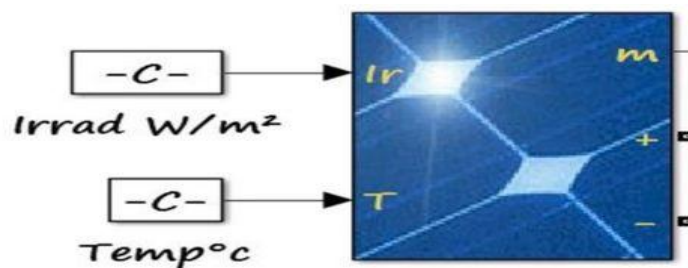
IV.1.Introduction

Les logiciels de simulation sont des outils extrêmement efficaces pour évaluer et tester la performance théorique des systèmes. Ils offrent un contrôle précis sur les conditions d'exécution du dispositif à tester. La simulation facilite le passage de la conception théorique d'un système à sa mise en œuvre pratique en fournissant une plateforme flexible où les ajustements et les modifications peuvent être effectués rapidement et facilement. Cela permet d'explorer un large éventail de scénarios et de variantes, aidant ainsi à sélectionner la solution optimale en toute confiance.

Dans ce chapitre, nous commençons par évaluer le système solaire par simulation à l'aide de l'outil de simulation inclus dans Mathworks Matlab. Ensuite, la méthode de suivi MPPT a été étudiée. Méthode de logique floue, nous ferons ensuite une comparaison entre la méthode de logique floue et d'autres méthodes.

IV.2.simulation

IV.2.1. Simulation d'un Panneau solaire 230w-m6-g



Block Parameters: PV Array1

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:

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 ...  
  
 Irradiances (W/m2)

Model parameters

Light-generated current IL (A)

Diode saturation current IO (A)

Diode ideality factor

Shunt resistance Rsh (ohms)

Series resistance Rs (ohms)

Figure.IV.1.Modèle de simulation de panneau solaire 230w-m6-G

IV.2.1.1. Caractéristiques de Module PV

Tab. IV.1. Caractéristiques de panneau PV Array 230W-M6-G

PV Modèle	pv Array 230W-M6-G
Courant de court-circuit $I_{cc}$	8 A
Tension de circuit ouvert $V_{co}$	37.14 V
Tension Max $V_{mpp}$	30.72 V
Courant Max $I_{mpp}$	7.5 A
Puissance Max $P_{mpp}$	230.4W
Nombre de Cellules $N_s$	60
Coefficient température d' $I_{cc}$	0.05535 %/°C
Coefficient température de $V_{co}$	-0.35339 %/°C
facteur d'idéalité de la diode A	0.99011
Résistance en Séries $R_s$	0.2444 $\Omega$
Résistance en shunt $R_{sh}$	280.3997 $\Omega$

Ces données montrent les caractéristiques de puissance et de courant par rapport à la tension dans des conditions environnementales standard, qui sont les suivantes : Le rayonnement est égal à 800 W/m<sup>2</sup> et la température est égale à 25 degrés Celsius.

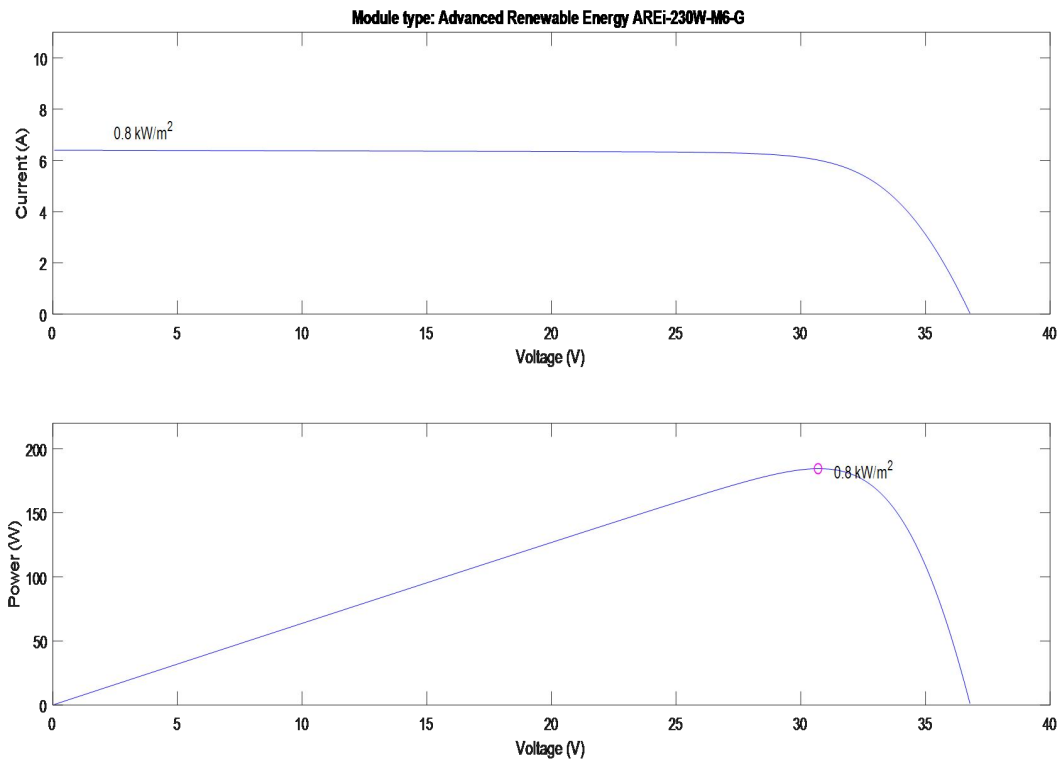


Figure. IV.2. Caractéristiques de puissance et de courant PV sous constant

IV.2.2. Simulation du dc/dc Boost

La figure ci-dessous représente une simulation de dC-dC boost sous l'environnement Matlab/Simulink.

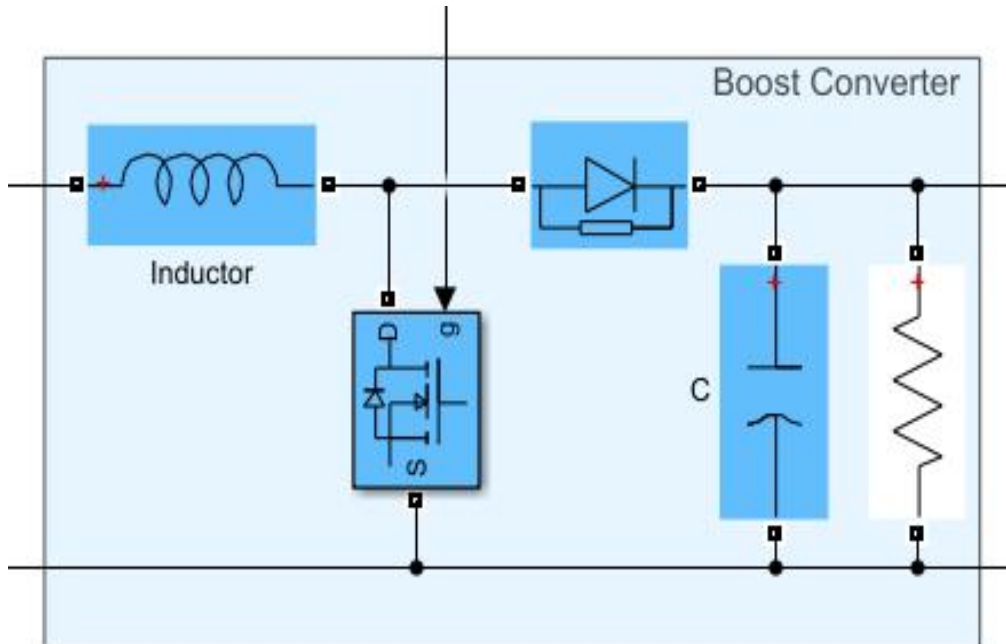


Figure.IV.3. Modèle pour simulation convertisseur dc/dc Boost

IV.2.3. Simulation du MPPT flou

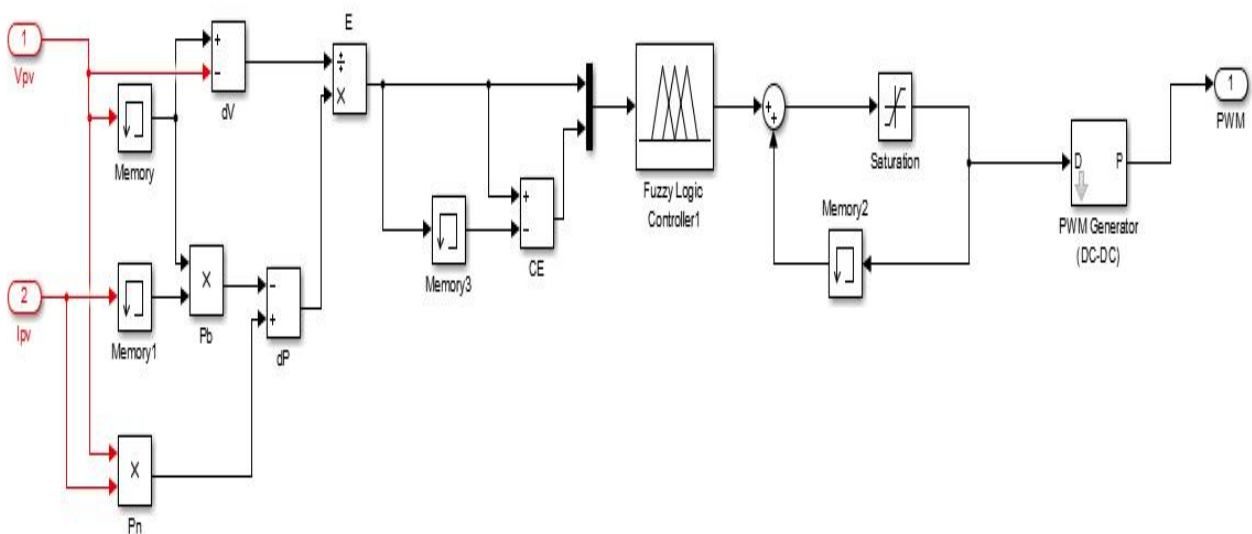


Figure.IV.4. Schéma de block de la commande MPPT flou

Nous définissons l'erreur E par :

$$E(K)=y'(k)-y(k) \quad (IV.1)$$

Avec :

$$E(K) = \frac{p(k)-p(k-1)}{v(k)-v(k-1)} \quad (IV.2)$$

$$P(K)=V(K) \times I(K) \quad (IV.3)$$

La variation de l'erreur  $\Delta E$  par :

$$\Delta E(K) = E(k) - E(k-1) \quad (IV.4)$$

Où k : est une valeur entière positive ou nulle.

Après fuzzification, les grandeurs d'entre E(k) et  $\Delta E(k)$  sont transformées en valeurs floues e et  $\Delta e$ . Ces dernières sont utilisées par le bloc des règles de contrôle flou pour obtenir la variable floue de sortie (u) de laquelle on obtient la valeur physique (du) par défuzzification. La sortie du régulateur est donc donnée par :

La sortie du régulateur est donc donnée par :

$$U'(K) = U'(k + 1) \times DU(k) \times Tech \quad (IV.5)$$

OU : Tech est le temps d'échantillonnage.

Les règles d'inférences permettent de déterminer le comportement du contrôleur flou. Il doit donc inclure des étapes intermédiaires qui lui permettent de passer des grandeurs réelles vers les grandeurs floues et vice versa ; ce sont les étapes de fuzzification et défuzzification, qui ont été déjà discutées [26].

Les entrées sont choisies de telle sorte à représenter le plus fidèlement possible la dynamique du système.

A cet effet, on choisit l'erreur de réglage E et sa variation  $\Delta E$  comme entrée et la commande U\* comme sortie.

Les fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales, Figure IV.5, IV.6 ont été optées pour les variables d'entrées et de sortie et les différents univers de discours utilisés pour l'erreur.

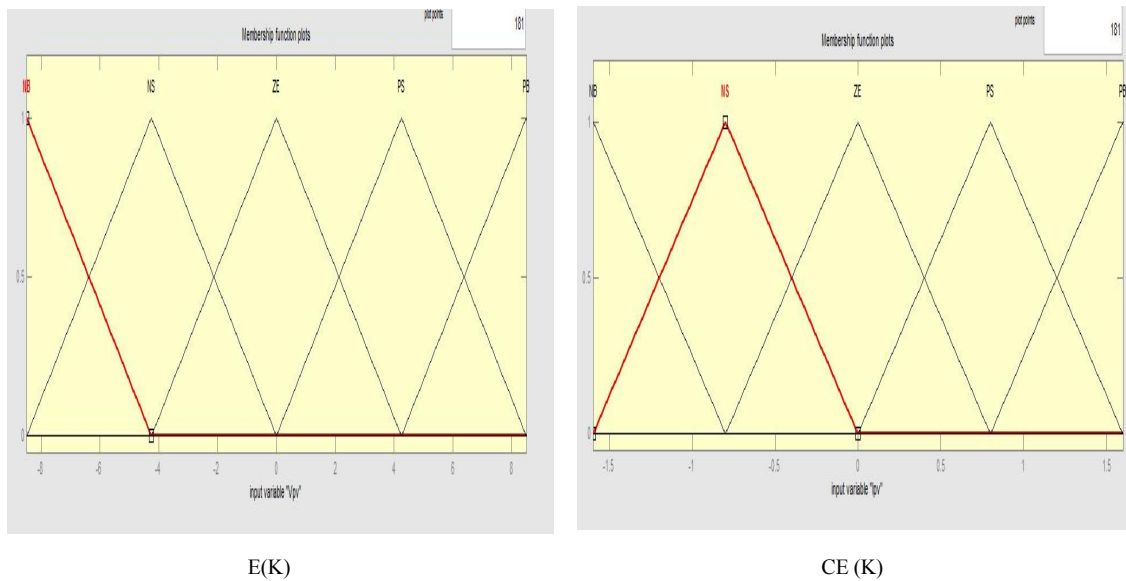


Figure .IV.5. Travail d'adhésion pour les entrées CE.

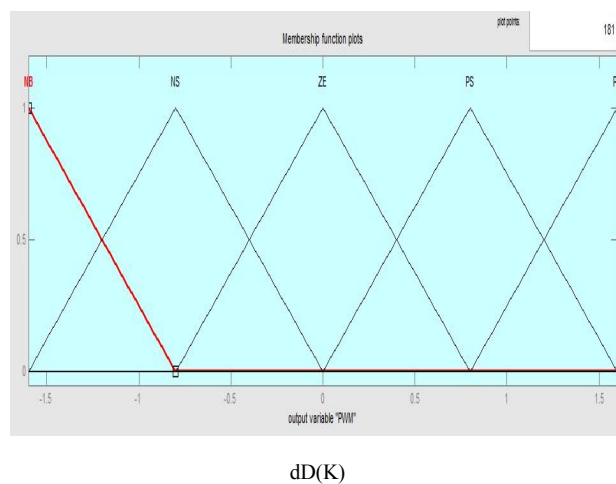


Figure .IV. 6. Travail d'adhésion pour. la sortie dD(K)

Dans l'étape d'inférence, on prend des décisions. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance. Par la suite, on dresse le tableau de règles d'inférence (tableau IV. 3).

Finalement, en défuzzification, on convertit les sous-ensembles flous de sortie en une valeur numérique.

La Table d'inférence avec quatre fonctions d'appartenance est donnée comme suite :

Tab. IV.3. Table à quatre class

<b>E</b> \ <b>CE</b>	<b>PB</b>	<b>PS</b>	<b>NB</b>	<b>PS</b>
<b>PB</b>	<b>PB</b>	<b>PS</b>	<b>NB</b>	<b>NS</b>
<b>PS</b>	<b>PB</b>	<b>PS</b>	<b>NB</b>	<b>NS</b>
<b>NB</b>	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>PB</b>	<b>PS</b>
<b>PB</b>	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>PB</b>	<b>PS</b>

**IV.3. Simulation du PV avec MPPT et un convertisseur BOOST**

Nous étudions des simulations du transformateur dc/dc et du contrôleur mppt fluo afin de trouver le point maximum auquel la puissance du générateur photoélectrique est à son maximum par MATLAB-SIMULINK R2017a.

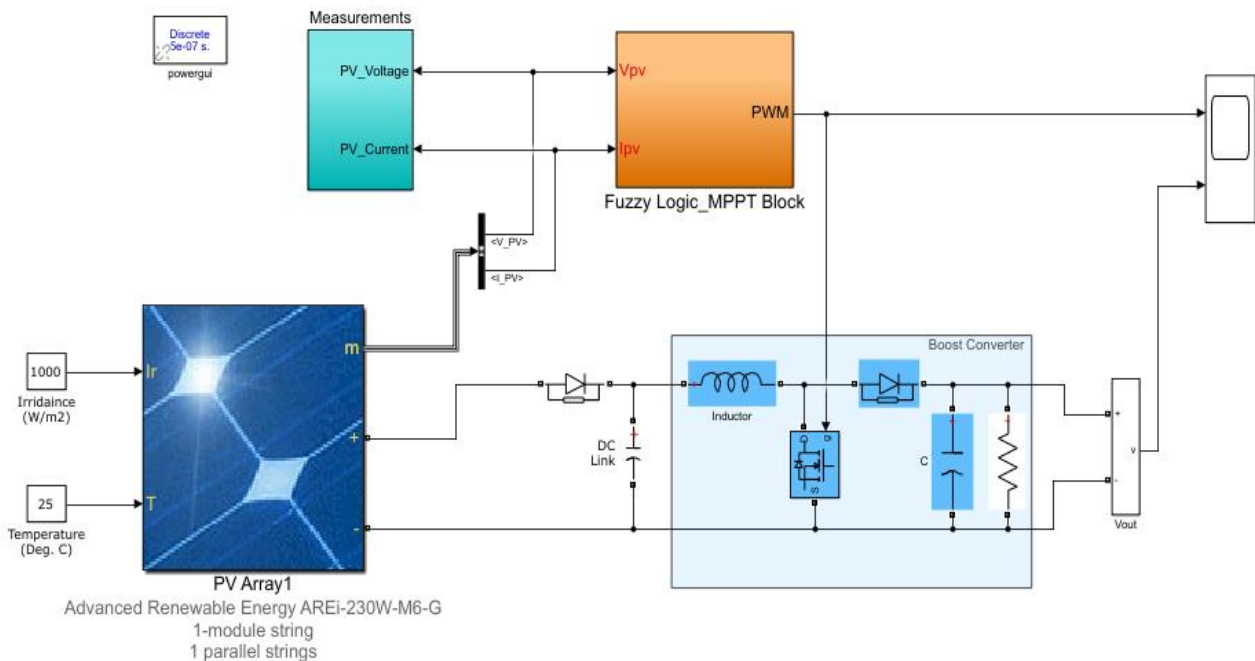


Figure.IV.7. Le modèle général de simulation d'une installation photovoltaïque avec convertisseur boost et son contrôleur mppt (logique fluo)

IV.4. Résultats et discussions

Nous allons simuler pour un radiation 1000 Watt/m<sup>2</sup> et une température de 25°C.

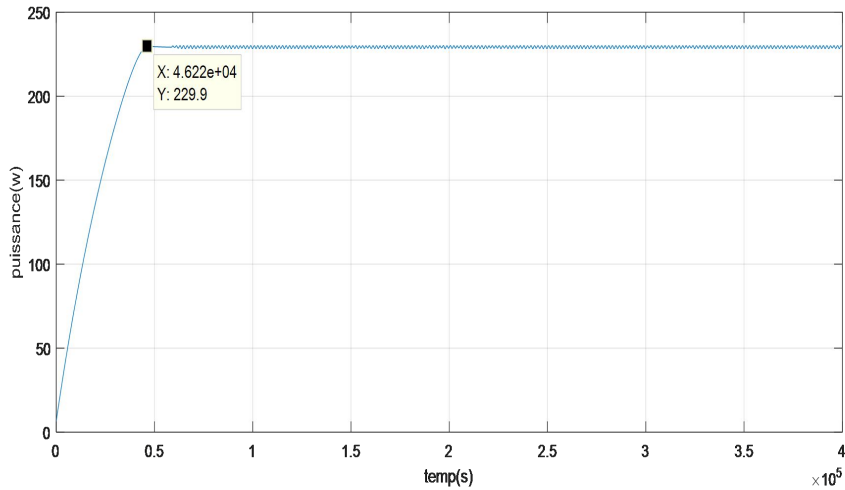
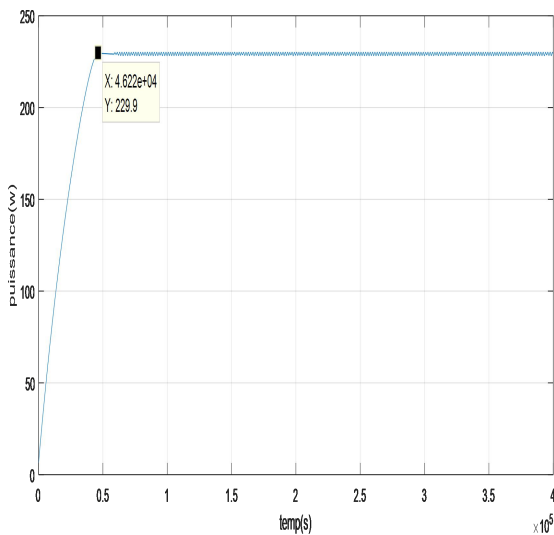


Figure. IV.08. Puissance du panneau avec la commande MPPT floue  
 Pour T = 25°C et E = 1000 W/m<sup>2</sup>

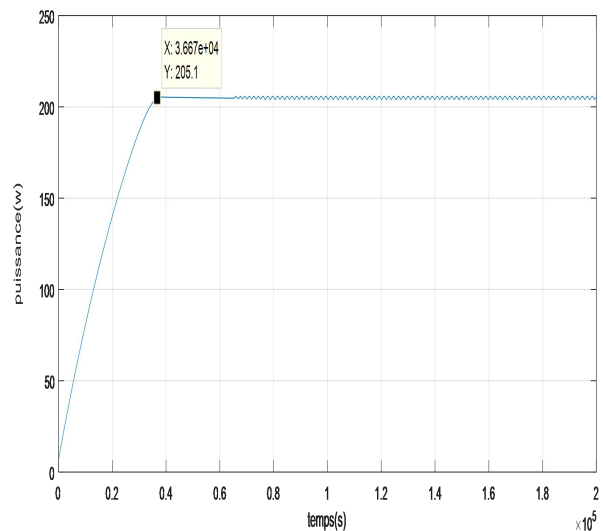
À partir de résultat obtenue de la figure (IV.08) en remarque que la puissance du générateur atteint sa valeur maximale après un temps de 0.5 s et rester plus proche de point de puissance maximal 230 w

IV.4.1. Comportement du système face à un changement de température :

Nous allons simuler pour un radiation de 1000 Watt / m<sup>2</sup> et une variation de température 25°C à 50°C :



T = 25°C



T = 50°C

Figure IV.09. Puissance du panneau avec la commande MPPT floue

Pour T = 25/50°C et E = 1000 W/m<sup>2</sup>

**IV.4.1.1. Discussion de Résultats**

Puissance du panneau avec la commande MPPT floue

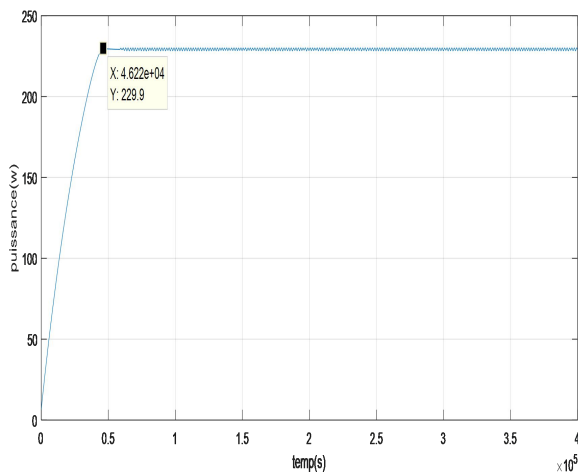
Pour  $T = 25/50^{\circ}\text{C}$  et  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ .

Les simulations effectuées en maintenant un niveau de radiation solaire constant, mais en faisant varier les températures, mettent en évidence une corrélation négative entre la température ambiante et les performances des modules photovoltaïques. En effet, plus la température augmente, plus la capacité de production électrique des panneaux solaires se voit réduite. Ce phénomène trouve son origine dans la décroissance de la tension en circuit ouvert des cellules lorsque les conditions de chaleur s'intensifient, entraînant inévitablement une baisse du rendement de conversion énergétique.

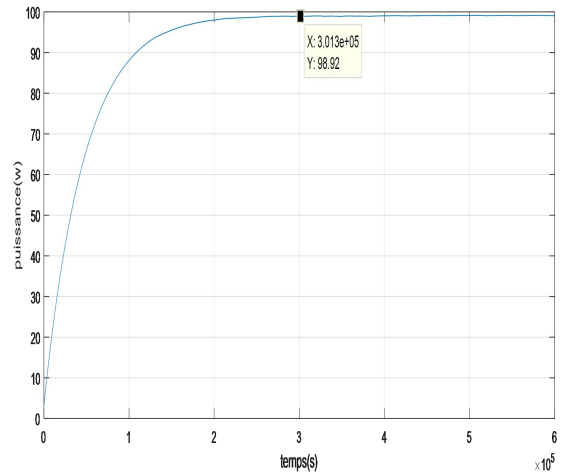
Il est important de noter qu'à haute température, la puissance produite par l'unité est relativement faible. À  $50^{\circ}\text{C}$ , la puissance est d'environ 205 watts, tandis qu'à  $25^{\circ}\text{C}$  elle passe à 230 watts.

**IV.4.2. Comportement du système face à un changement de l'éclairement :**

Nous allons simuler pour un radiation de  $500 \text{ Watt/m}^2$  et  $1000 \text{ Watt/m}^2$  et une température de  $25^{\circ}\text{C}$ .



$E = 1000 \text{ W/m}^2$ .



$E = 500 \text{ W/m}^2$ .

Figure IV.10. Puissance du panneau avec la commande MPPT floue

Pour  $T = 25^{\circ}\text{C}$  et  $E = 500 - 1000 \text{ W/m}^2$ .

**IV .4.2.1. Discussion de Résultats**

Puissance du panneau avec la commande MPPT floue

Pour  $T = 25^{\circ}\text{C}$  et  $E = 500 - 1000 \text{ W/m}^2$ .

Lorsque l'intensité du rayonnement solaire est faible, l'unité ne produit qu'une puissance relativement modeste dans ces circonstances. Sous un ensoleillement de 500 Watts par mètre carré, la puissance délivrée n'est que d'environ 98,92 Watts. Cependant, si l'irradiation solaire atteint 1000 Watts/m<sup>2</sup>, la puissance connaît alors une nette augmentation pour culminer à 230 Watts .

#### **IV.5. Conclusion**

Le rendement des cellules photovoltaïques est directement lié aux conditions météorologiques environnantes. Leur production électrique s'accroît lorsque l'intensité du rayonnement solaire incident augmente. Néanmoins, une élévation de la température des cellules a pour effet de réduire leur efficacité de conversion de l'énergie lumineuse en électricité. Ainsi, les performances d'une centrale solaire sont fortement tributaires de deux facteurs climatiques majeurs : d'une part, l'irradiation solaire qui favorise une production électrique s'accumule lorsqu'elle est élevée, et d'autre part, la température ambiante qui, lorsqu'elle grimpe, entraîne une dégradation du rendement énergétique du système photovoltaïque

## CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de ces travaux de recherche, nous nous sommes penchés sur les défis rencontrés par les systèmes de conversion photovoltaïque en cascade, notamment la problématique du transfert de puissance qui n'atteint pas systématiquement son maximum.

Notre étude s'est concentrée sur la modélisation et la simulation d'une architecture photovoltaïque adaptative, intégrant une commande numérique de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). L'objectif était d'optimiser la puissance délivrée par le générateur solaire en prenant en compte les variations aléatoires des conditions météorologiques au fil du temps.

Nos travaux ont débuté par une introduction générale au domaine de l'énergie solaire, suivie d'une explication du principe de l'effet photovoltaïque et du fonctionnement des cellules et générateurs photovoltaïques.

Nous avons ensuite abordé la modélisation du système PV en explorant dans un premier temps le modèle du générateur PV, puis en détaillant celui du convertisseur Boost assurant l'interfaçage entre le générateur et la charge.

En ce qui concerne la partie commande MPPT, nous avons étudié les techniques de commande classiques permettant d'extraire la puissance maximale dans diverses conditions météorologiques. Afin d'améliorer les performances des systèmes PV, nous avons introduit une commande MPPT à logique floue qui a démontré des résultats prometteurs en termes de rapidité de réponse et de poursuite efficace du point de puissance maximale

## Bibliographies

- [1] Boualem, Dendib, « Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2007.
- [2] S. Naoual, « Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif
- [3] M. Becquerel, "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires," Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, vol. 9, pp. 561–567, 1839.
- [4] J. Thibaud, "Les spectres gamma caractéristiques et leur effet photoélectrique," 1925.
- [5] A. Sorokin, S. Bobashev, T. Feigl, K. Tiedtke, H. Wabnitz et M. Richter, « Effet photoélectrique à ultra-hautes intensités », Lettres d'examen physique, vol. 99, non. 21, p. 213002, 2007.
- [6] D. M. Chapin, C. Fuller et G. Pearson, « Une nouvelle cellule photoélectrique à jonction p-n en silicium pour convertir le rayonnement solaire en énergie électrique », Journal of Applied Physics, vol. 25, non. 5, pages 676-677, 1954.
- [7] V. M. Puri et F. Costello, « Systèmes d'énergie solaire domestiques pour le Delaware », tech. représentant, Delaware Univ., Newark (États-Unis). Département des sciences biologiques, 1973.
- [8] J. Arnett, L. Schaffer, J. Rumberg et R. Tolbert, « Conception, installation et performances de la centrale électrique arco solaire d'un mégawatt », dans 5e Conférence sur l'énergie solaire photovoltaïque, pp. 314-320, 1984.
- [9] R. Miles, K. Hynes et I. Forbes, « Cellules solaires photovoltaïques : Un aperçu du développement de cellules de pointe et des problèmes environnementaux », Progrès dans la croissance cristalline et la caractérisation des matériaux, vol. 51, non. 1-3, p. 1-42, 2005.
- [10] <http://www.solarserver.de/?gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>.
- [11] BENSACI Wafa , «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012.
- [12] Ogbi Zoulikha, « Mesure automatisée du spectre d'absorption optique des cellules solaires », mémoire de master, Université Med khider Biskra ,2014.
- [13] M. Dietschy, «Les cellules photovoltaïques», cours classes préparatoires CPE, Institution des Chartreux Année 2004-2005
- [14]: Maouedj Rachid, "Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah", Mémoire De Magister ,2005.
- [15] M. SLAMA Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectées au réseau électrique », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas –Sétif ,2012.
- [16]: Photovoltaïque Electricité solaire, document délivré par l'association suisse des professionnels de l'énergie solaire.

- [17]: M.boukli Hacene Omar, «Conception et réalisation d'un système photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion de l'énergie électrique », mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2011.
- [18] <https://www.lepanneausolaire.net/les-differentes-technologies-contrôleurs-charge.php>
- [19] D.Boukhers «Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage» .(2007 , Mémoire de Master université Mentouri de Constantine)
- [20] R. Merah, R.Chenni, «amélioration de la commande p&o par une détection synchrone du courant de batterie». université des frères mentouri route de Ain el bey de Constantine, 201
- [21] N. Aouchiche, «M.S. Aït Cheikh, A. Malek, poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation». division énergie solaire photovoltaïque centre de développement des énergies renouvelables, Alger, 2013
- [22] M. Frederick conception et mise en œuvre d'une centrale photovoltaïque autonome à commande numérique approvisionnement », Département d'électricité. Génie énergétique, Université norvégienne des sciences et technologies s. bragstads plass 2e, 7491 Trondheim, Norvège.
- [23] Yassine LASMI. Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. Université Sétif -1 (ALGERIE)
- [24] A. Tchapo singo "système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ", Thèse de doctorat université Henri Poincaré 2010
- [25] BENADEL Faiza. Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [26] M.BEDRANE Farid. Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Université Abderrahmane MIRA de Bejaia
- [27] Anantapuram, « Enquête sur les modules d'alimentation photovoltaïques potentiels pour une production électrique plus élevée », doctorat en génie électrique, université technologique kiranmayi r-jawaharlal nehru, 201
- [28] M.S. Aït Cheikh, C. Larbes, G.F. Tchoketch Kebir et A. Zerguerras Suivi du point de puissance maximale à l'aide d'un schéma de contrôle à logique floue », Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°3 (2007) 387 – 395
- [29] d. Lee, H. Noh, D. Hyun et I. Choy, "un convertisseur mppt amélioré utilisant une méthode de compensation de courant pour les applications photovoltaïques à petite échelle", conférence IEEE sur l'électronique de puissance appliquée. Et exposé, vol. 1, pages 540-545, 2003

**Mots clés** : logique floue , générateur photovoltaïque , Commande MPPT , observation et perturbation , convertisseur DC/DC