

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



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Réseaux électriques

**Thème**

**simulation of maximum power point tracking  
mppt techniques for photovoltaic system**

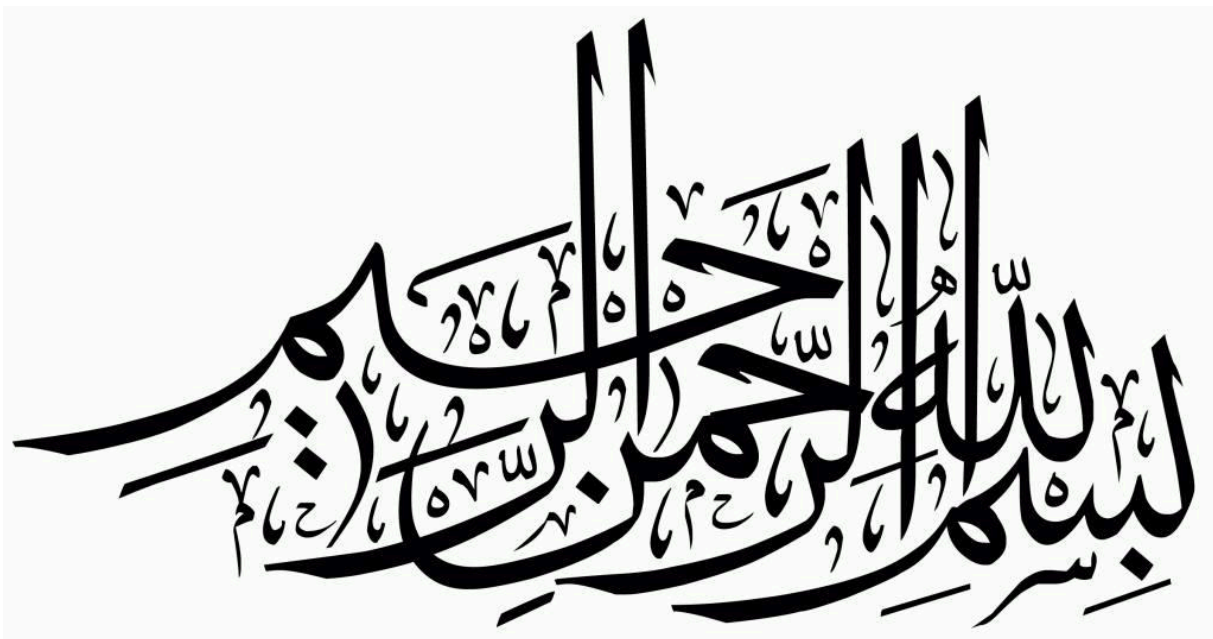
**Réalisé par :**

- Hommadi nermine
- Baci hana

**Encadré par :**

- Dr. MAMRI Ossama

**Année Universitaire 2023/2024**



# Remerciements



*Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissant*

*de m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur*

***Dr. MAMRI Ossama**, Docteur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued ,  
pour avoir dirigé ce travail.*

*Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me  
font en participant au jugement de ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser  
ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel  
tout au long de ces longues années d'études.*

# الأهداء



بعد مسيرة دراسية دامته سنوات حملت في طياتها الكثير من الصعوبات والمشقة والتعب ها انا اليوم اقف على  
عتبة تخرجي اقطع ثمار تعبتي وأرفع قبعتي بكل فخر فاللهم لك الحمد قبل ان ترضى ولك الحمد اذا رضيت ولك  
الحمد بعد الرضا لانك وفقتني على اتمام هذا العمل وتحقيق حلمي... أهدي هذا النجم  
الي الذي زين اسمي بأجمل الألقاب من دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل  
اليمن علمني ان الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة الي من حرص في روعي مكافؤ الأتلاق داعمي  
الأول في مسيرتي وسندي وقوتي وملاذي بعد الله...  
الي فخري واعتزائي ( والدي العزيز )  
الي من جعل الله الجنة تحت أقدامها واحتضنتني قلبها قبل بدنها وسملت لي الشدائد  
بدعائها الي القلب الجنون الي المرأة التي بعثتني فتاة طموحة  
والشمعة التي كانت لي في الليالي المظلمة سر قوتي  
ومصباح دربي الي ونجائي  
وهج حياتي ( والدتي الحبيبة )  
الي ضاعي الثابت وأمان أيامي ملهمي نجاحي الي من شددت  
عضدي بهم فكانوا لي بوابيع ارتوي منها  
الي خيرة أيامي وصفرتها الي قرة عيني ( أخواني الغاليين )  
وأخيرا من قال أنا لها " نالها " وأنا لها ان أبنت ونحما عنها اتبعت بها ما كنت لأفعل لولا توفيق من الله هاهو اليوم العظيم  
هنا اليوم الذي أجريته وسنوات الدراسة الشاقة حاملة فيها حتى تواليت به من كرمه لفرحة التمام الحمد لله  
الذي به خيرا وأملالا وأحرقنا سرورا وفرحا ينسيني مشقت



**الملخص**  
**résumé**  
**Abstract**

**Résumé:**

.....

**Mots clés:** .....

**Abstract:**

.....

**Keywords:** .....

الملخص:

.....

الكلمات المفتاحية: .....

# Sommaire

|                       |
|-----------------------|
| Dédicace              |
| Remerciement          |
| Résumé                |
| Table des matières    |
| Liste des figures     |
| Liste des tableaux    |
| Introduction générale |

| <b>CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque</b>             |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| I.1 Introduction                                                         | 4  |
| I.2 L'énergie renouvelable                                               | 4  |
| I.3 Les types de l'énergies renouvelables                                | 4  |
| I.3.1 L'énergie solaire                                                  | 4  |
| I.3.2 L'énergie éolienne                                                 | 4  |
| I.3.3 Energie hydraulique-hydroélectricité                               | 5  |
| I.3.4 L'énergie biomasse                                                 | 5  |
| I.3.5 L'énergie géothermie                                               | 5  |
| I.4 L'énergie photovoltaïque                                             | 5  |
| I.4.1 Description d'un système photovoltaïque                            | 5  |
| I.4.2 Energie solaire photovoltaïque                                     | 5  |
| I.5 Rayonnement solaire                                                  | 6  |
| I.5.1 Rayonnement direct                                                 | 6  |
| I.5.2 Rayonnement diffus                                                 | 6  |
| I.5.3 Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol                    | 7  |
| I.5.4 Rayonnement global                                                 | 7  |
| I.6 L'effet photovoltaïque                                               | 7  |
| I.7 Cellules photovoltaïques                                             | 8  |
| I.7.1 Types des cellules                                                 | 8  |
| I.7.2 Panneaux solaires                                                  | 9  |
| I.8 Système photovoltaïque                                               | 10 |
| I.8.1 Système autonome (Off grid)                                        | 10 |
| I.8.2 Systèmes photovoltaïques hybride                                   | 11 |
| I.8.3 Système photovoltaïque raccordé au réseau                          | 11 |
| I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques              | 12 |
| I.10 Future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie                  | 12 |
| I.11 Conclusion                                                          | 13 |
| <b>CHAPITRE II : Interface d'Electronique de Puissanc technique MPPT</b> |    |
| II.1 Fonctionnement d'un GPV a sa puissance maximale                     | 15 |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| II.2 Etage d'adaptation                                         | 15 |
| II.3 Convertisseur DC-DC                                        | 15 |
| II.3.1 Convertisseur Buck                                       | 16 |
| II.3.2 Convertisseur Boost                                      | 18 |
| II.3.3 Convertisseur Buck-Boost                                 | 19 |
| II.3.4 Convertisseur Cuk                                        | 21 |
| II.3.5 Convertisseur Sepic                                      | 23 |
| II.4 Commande MPPT                                              | 23 |
| II.4.1 Algorithme Perturber et Observer (P&O)                   | 24 |
| II.4.2 Algorithme incrémentation de la conductance (INC)        | 26 |
| II.4.3 Algorithme Hill-climbing                                 | 28 |
| II.4.4 Algorithme à base de la Logique floue                    | 28 |
| Conclusion                                                      | 30 |
| <b>CHAPITRE III : Simulation et résultat de la command MPPT</b> |    |
| III.1.introduction                                              | 32 |
| III.2 simulation d'un module photovoltaïque                     | 32 |
| III.3. Simulation du convertisseur boost                        | 33 |
| III.4. MPPT en logique floue, présentation du système           | 36 |
| III.4.1. Définition des critères d'entrées                      | 36 |
| III.4.1 Algorithme Perturber et Observer (P&O)                  | 36 |
| III.4.1.2. Variation de l'écart CE                              | 37 |
| III.4.1.2. Définition du critère de sortie                      | 38 |
| III.5 Incrément dD                                              | 38 |
| III.5.1. Fonctionnement du système floue                        | 39 |
| III.5.2. Schéma de fonctionnement                               | 39 |
| III.5.3 Schéma d'inférence                                      | 39 |
| III.5.4 Tableau des règles floue                                | 40 |
| III.5.5 Construction du courant Imppt                           | 40 |
| III.5.6Conception du contrôleur MPPT flou                       | 40 |
| Conclusion                                                      | 44 |
| <b>Conclusion générale</b>                                      | 45 |
| <b>Bibliographique</b>                                          |    |



# **LISTE DES FIGURES**

# LISTE DES FIGURES

Page

| <i>Chapitre I</i>  |                                                                         |    |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figure 1</i>    | Familles de l'énergie renouvelables                                     | 4  |
| <i>Figure 2</i>    | Réponse spectrale d'une cellule (PV).                                   | 6  |
| <i>Figure 3</i>    | L'effet photovoltaïque                                                  | 7  |
| <i>Figure 4</i>    | Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque                 | 8  |
| <i>Figure 5</i>    | Exemple de cellule et de module photovoltaïque en silicium              | 9  |
| <i>Figure 6</i>    | Schéma représentatif d'une association série/parallèle.                 | 10 |
| <i>Figure 7</i>    | Système PV autonome                                                     | 10 |
| <i>Figure 8</i>    | Système PV hybride.                                                     | 11 |
| <i>Figure 9</i>    | Système photovoltaïque raccordé au réseau.                              | 11 |
| <i>Chapitre II</i> |                                                                         |    |
| <i>Figure 1</i>    | connexion d'un GPV a une charge à travers un étage d'adaptation         | 15 |
| <i>Figure 2</i>    | Le principe de base d'un hacheur                                        | 16 |
| <i>Figure 3</i>    | Schéma de Convertisseur boost                                           | 16 |
| <i>Figure 4</i>    | Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck       | 17 |
| <i>Figure 5</i>    | Schéma de Convertisseur boost                                           | 18 |
| <i>Figure 6</i>    | Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Boost      | 19 |
| <i>Figure 7</i>    | Schéma de Convertisseur Buck-Boost                                      | 20 |
| <i>Figure 8</i>    | Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Buck-Boost | 21 |
| <i>Figure 9</i>    | Schéma de Convertisseur Cuk                                             | 21 |
| <i>Figure 10</i>   | Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Cuk        | 22 |
| <i>Figure 11</i>   | Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Sepc       | 23 |
| <i>Figure 12</i>   | Schéma de base d'une alimentation utilisant des panneaux solaires.      | 24 |
| <i>Figure 13</i>   | principe de méthode P&O                                                 | 25 |

|                     |                                                                                   |    |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 14</b>    | Organigramme de l'algorithme de P&O                                               | 25 |
| <b>Figure 15</b>    | Positionnement du point de fonctionnement                                         | 27 |
| <b>Figure 16</b>    | Organigramme de l'algorithme de l'incrément de conductance                        | 28 |
| <b>Figure 17</b>    | Structure de base du contrôleur MPPT à base logique floue                         | 29 |
| <b>Chapitre III</b> |                                                                                   |    |
| <b>Figure 1</b>     | Schéma de simulation d'un module photovoltaïque                                   | 32 |
| <b>Figure 2</b>     | Caractéristique I-V d'un module PV.                                               | 33 |
| <b>Figure 3</b>     | Caractéristique P-V d'un module PV.                                               | 33 |
| <b>Figure 4</b>     | Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC                                              | 34 |
| <b>Figure 5</b>     | Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC.                                             | 34 |
| <b>Figure 6</b>     | schématique de SIMULINK du générateur photovoltaïque avec MPPT.                   | 34 |
| <b>Figure 7</b>     | Variation de l'éclairement.                                                       | 35 |
| <b>Figure 8</b>     | Résultats de simulation des courbes de puissance                                  | 35 |
| <b>Figure 9</b>     | Résultats de simulation du courant.                                               | 35 |
| <b>Figure 10</b>    | Résultats de simulation de la tension.                                            | 36 |
| <b>Figure 11</b>    | Variation de la température                                                       | 36 |
| <b>Figure 12</b>    | Fonctions d'appartenance de la variable E (MPPT floue type I)                     | 37 |
| <b>Figure 13</b>    | Fonctions d'appartenance de la variable CE (MPPT floue type I)                    | 38 |
| <b>Figure 14</b>    | Fonctions d'appartenance de la variable dD (MPPT floue type I)                    | 39 |
| <b>Figure 15</b>    | Schéma de fonctionnement du système flou conçu via la fuzzylogictoolbox de Matlab | 39 |
| <b>Figure 16</b>    | Schéma de la command MPPT floue                                                   | 41 |
| <b>Figure 17</b>    | Résultats de simulation des courbes de puissanc.                                  | 41 |
| <b>Figure 18</b>    | Résultats de simulation du courant                                                | 42 |
| <b>Figure 19</b>    | Résultats de simulation de la tension.                                            | 42 |
| <b>Figure 20</b>    | Résultats de simulation des courbes de puissance                                  | 43 |

# **LISTE DES TABLEAUX**

# LISTE DES TABLEAUX

Page

| <i>Chapitre I</i>   |                                                                                   |    |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tableau 1</i>    | Types des cellules solaires.                                                      | 9  |
| <i>Chapitre III</i> |                                                                                   |    |
| <i>Tableau 1</i>    | Caractéristiques électriques du module PV KC200GT en condition de test standard . | 33 |
| <i>Tableau 2</i>    | Paramètres du convertisseur DC-DC boost.                                          | 34 |
| <i>Tableau 3</i>    | tableau des règles des systèmes floue (type I)                                    | 40 |

# **Notations et symboles**

## Liste des Abréviations

PV Photovoltaïque

MPPT Point de Poursuite de Puissance Maximale

GPV Générateur Photovoltaïque

CPV Cellule Photovoltaïque

I-V Courant-Tension

P-V Puissance-Tension

DC-DC Continue /Continue

Pm Puissance Maximale PPM Point de Puissance Maximale

PF Point de Fonctionnement

I<sub>pv</sub> courant photovoltaïque

V<sub>pv</sub> Tension photovoltaïque

P<sub>pv</sub> Puissance photovoltaïque

P&O Perturbation et Observation

INC Incrémentation de la Conductance

PSO Particle Swarm Optimization

# **Introduction générale**



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

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

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT). Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés dans ce travail essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation, quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairement). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O), Incrémentation (INC) et l'approche Floue (FL).

Cette dernière a reçu une attention particulière de la part d'un certain nombre de chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance. Vu ses performances, nous l'avons appliquée pour développer une technique hybride MPPT Floue.

# **Chapitre I**

**Généralité sur le système  
photovoltaïque**

**I.1 Introduction:**

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies les plus utilisées et les plus renouvelables. Car le soleil est une source d'énergie illimitée. Pour la production d'énergie électrique. Les systèmes solaires s'appuient sur le photovoltaïque qui convertit les photons de la lumière en électricité. Dans ce chapitre on va essayer de donner une idée générale sur l'énergie solaire, les différents types des systèmes photovoltaïques et quelques concepts qui vont nous aider à bien rentrer dans le thème.

**I.2 L'énergie renouvelable:**

Les énergies renouvelables sont des énergies qui peuvent être régénérées naturellement. Il y a cinq familles principales d'énergies renouvelables.



**Figure I.1 : Familles de l'énergie renouvelables**

Dans l'ordre d'importance de leur exploitation actuelle, ce sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique (hydroélectricité), la biomasse (avec le bois de chauffage, ainsi que biogaz...), la géothermie [1].

**I.3 Les types d'énergies renouvelables**

**I.3.1 L'énergie solaire :** est produite par le rayonnement du soleil, on distingue :

- L'énergie solaire photovoltaïque.
- La solaire thermique basse température.
- La solaire thermique haute température.

**I.3.2 L'énergie éolienne :** les ancêtres des éoliennes sont les moulins à vent, de l'électricité par exemple, à partir du déplacement des masses d'air.

**I.3.3 Energie hydraulique-hydroélectricité :**

est directement obtenue par l'eau, que ce soit à partir des marées et courants marins, des vagues, de la rencontre de l'eau douce et de l'eau salée, on distingue :

- Le grand hydraulique.
- La petite hydraulique.
- Les énergies marines.

**I.3.4 L'énergie biomasse :**

l'énergie biomasse comprend le bois, les biocarburants (issus de végétaux comme le biogaz). Cette énergie est produite par la combustion ou la métabolisation de matière organique.

**I.3.5 L'énergie géothermie :**

est une énergie renouvelable provenant de l'extraction de l'énergie contenue dans le sol, elle peut être utilisée pour le chauffage mais aussi pour la production d'électricité. Il s'agit de l'une des seules énergies ne dépendant pas des conditions atmosphériques [2].

**I.4 L'énergie photovoltaïque****I.4.1 Description d'un système photovoltaïque:**

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

**I.4.2 Energie solaire photovoltaïque:**

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable permettant la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire, en énergie électrique à courant continu grâce à une cellule photovoltaïque [4].

### I.5 Rayonnement solaire:

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre  $150 \times 10^6$  Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante  $180 \times 10^6$  GW. Cette énergie quittera la surface du soleil sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à  $10 \mu\text{m}$ [5] L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

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

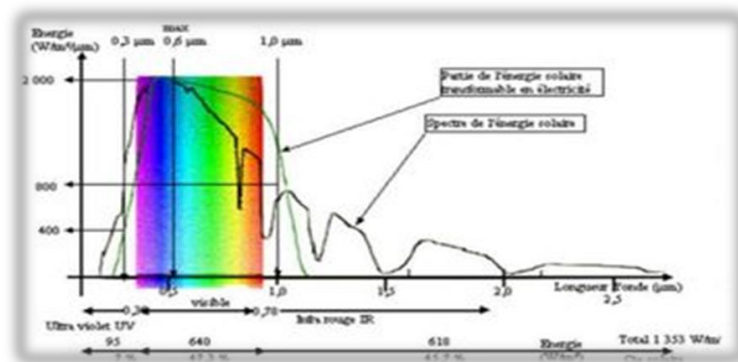


Figure I.2 : Réponse spectrale d'une cellule (PV).

#### I.5.1 Rayonnement direct :

est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux. Il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un Pyranomètre [7].

#### I.5.2 Rayonnement diffus :

est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil [8].

### I.5.3 Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol :

est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [8]

### I.5.4 Rayonnement global :

Ce rayonnement est la somme des composantes directe et diffuse. On distingue deux types de données d'ensoleillement :

- Rayonnement instantané : on considère les courbes de l'intensité du rayonnement en fonction de l'heure de la journée.
- Rayonnement cumulé : c'est le cumul du rayonnement global par jour [9].

### I.6 L'effet photovoltaïque:

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque. L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [5].

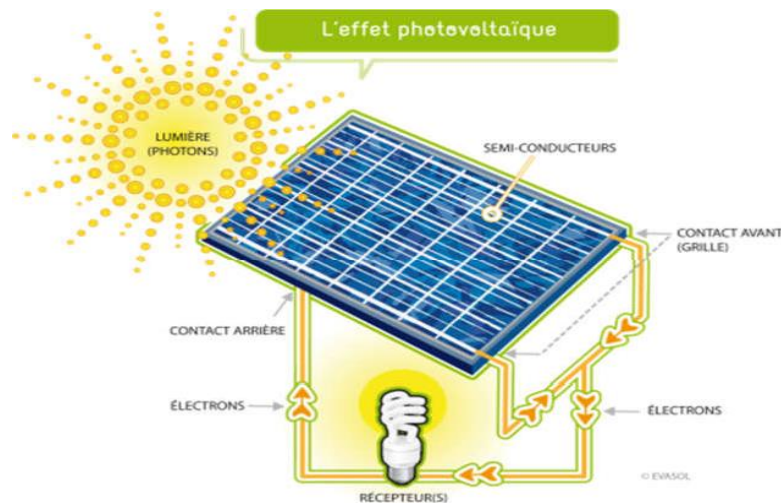
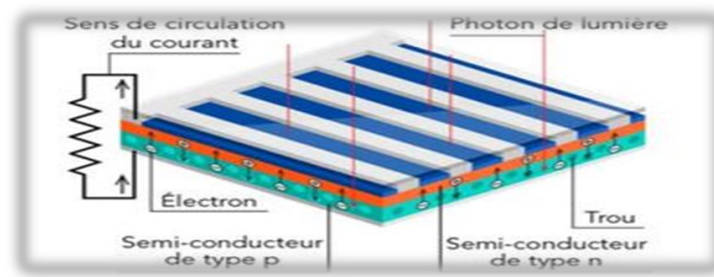


Figure I.3 : L'effet photovoltaïque

### I.7 Cellules photovoltaïques:

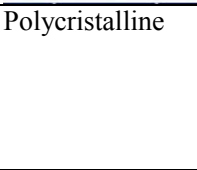
Une cellule PV est constituée de deux couches de silicium ; ces deux couches sont dopées afin d'être polarisées, pour rendre l'une des couches positive « couche P » on lui incorpore un certain nombre d'atomes de bore, et pour rendre l'autre couche négative « couche N » on lui incorpore un certain nombre d'atomes de phosphore, on crée ainsi une barrière de potentiel, lorsqu'un photon ayant suffisamment d'énergie est absorbé par ce semi-conducteur, il produit la rupture d'une liaison de valence et libère ainsi un électron, ce qui crée un « trou » positif, c'est ce que l'on appelle l'effet photovoltaïque : c'est la différence de potentiel entre ces deux couches. En reliant les deux couches on obtient un mouvement d'électrons qui passent d'une couche à l'autre, et crée ainsi un courant électrique [11].



**Figure I.4 :** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

#### I.7.1 Types des cellules

Le rendement d'un panneau solaire dépend fortement de la technologie utilisée. La grande majorité des panneaux photovoltaïques qui existent sur le marché sont à base de silicium. Nous citons dans le tableau ci-dessous les 3 types les plus répandus [3] :

| Type de cellule                                                                                        | Rendement   | avantages          | Inconvénients            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------|--------------------------|
| Monocristalline<br> | De 12 à 18% | Meilleur rendement | Cout de production élevé |
| Polycristalline<br> | De 11 à 15% | Bon rendement      | Cout de production élevé |

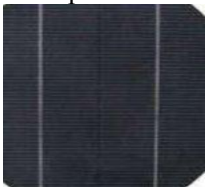
|                                                                                              |            |             |                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------|-----------------------|
|             |            |             |                       |
| Amorphe<br> | De 5 à 8 % | Faible cout | Tres faible rendement |

Tableau I.1 : Types des cellules solaires.

### I.7.2 Panneaux solaires

Le panneau se compose de plusieurs modules PV interconnectés en série et/ou en parallèle, dans le but d'augmenter la puissance. Pour la même température avec un éclairement homogène, l'association des cellules PV en série c'est de l'augmentation de la tension, ainsi que la tension résultante est la somme de tension de chaque cellule. Contrairement, le courant augmente, à l'association en parallèle

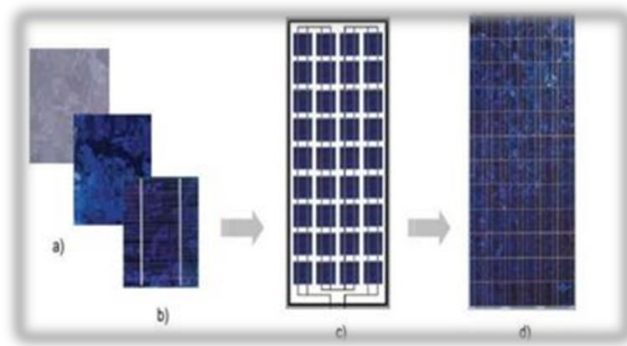
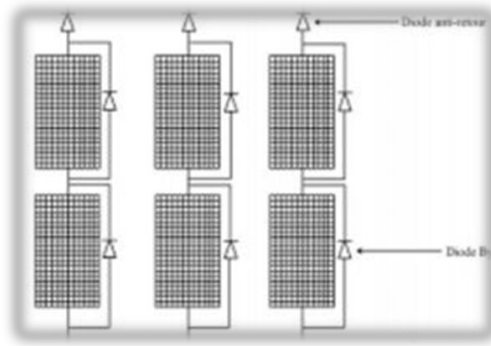


Figure I.5 : Exemple de cellule et de module photovoltaïque en silicium

- a) Plaquettes sans connectique,
- b) Cellule PV élémentaire,
- c) Générateur photovoltaïque,
- d) Photo d'un générateur PV commercial.



La figure suivante montre une association de 3 branches en parallèle ayant chacune 2 cellules en série [12] :



**Figure I.6 :** Schéma représentatif d'une association série/parallèle.

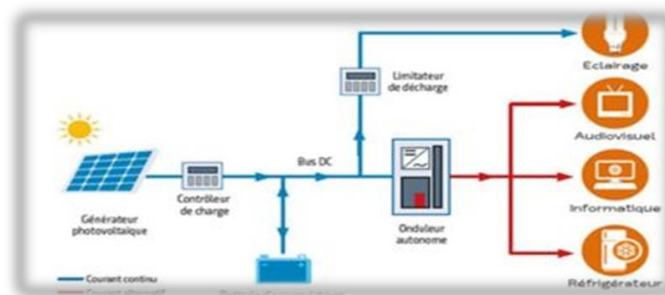
Selon son association (série/parallèle), les valeurs du courant  $I_{cc}$  et tension  $V_{co}$  sont plus ou moins importants.

### I.8 Système photovoltaïque

Au cours des années 50, les cellules PV alimentaient uniquement le système énergétique des satellites. Les premières applications terrestres ne sont apparues qu'au début des années 70. Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité, le PV prend une place prépondérante. Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés selon les exigences sont de trois types :

#### I.8.1 Système autonome:

(Off grid) Dans ce cas, l'énergie est produite et consommée au même endroit et qui n'interagit pas avec le réseau principal. Habituellement, le dispositif de (consommation / utilisation) d'électricité fait partie du système, c'est-à-dire les systèmes solaires domestiques, le système d'éclairage public solaire [13].



**Figure I.7 :** Système PV autonome

### I.8.2 Système photovoltaïques hybride:

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène. En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien. La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (pétrole, charbon, ...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours [14].

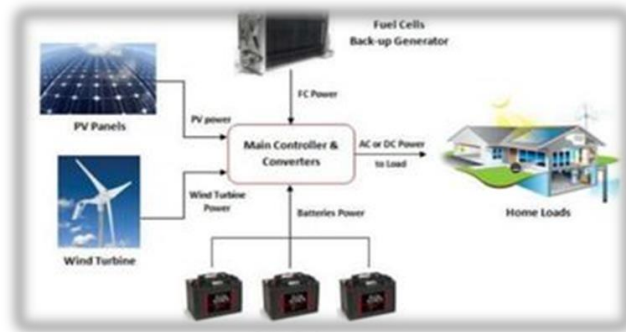


Figure I.8 : Système PV hybride.

### I.8.3 Système photovoltaïque

raccordé au réseau Le système raccordé au réseau, ou non autonome, est un système qui injecte l'excès d'énergie dans le réseau de distribution électrique. La figure suivante illustre ce type de système [7] :

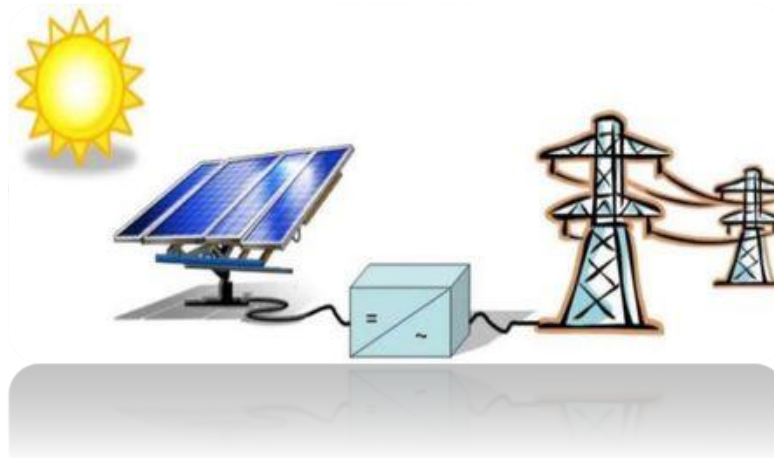


Figure I.9 : Système photovoltaïque raccordé au réseau.

**I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques****\* Les avantages :**

- L'énergie PV est renouvelable et fiable car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles.
- Le caractère modulaire des panneaux PV permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt aux centaines de mégawatts.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie PV présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Longue durée de vie des panneaux solaires et pas de risques électriques pour les usagers.

**\* Les inconvénients :**

- La fabrication du module PV relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 11-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs PV ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Occupation d'un espace important pour les installations de grandes dimensions [10].

**I.10 Future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie**

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 3 GWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 10.557GWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030. L'usine SARL 'Algérien PV Company', basée à Tlemcen, est la première entreprise d'agrégation commerciale des panneaux solaires photovoltaïques en Algérie et le deuxième en Afrique dont le premier module est sorti en juillet 2011 a été testé et caractérisé au niveau du CDER [15].

**I.11 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents éléments qui interviennent dans la constitution d'un système photovoltaïque. Nous avons abordé la cellule photovoltaïque ainsi que le module photovoltaïque, en décrivant également les différentes connexions associées. De plus, nous avons examiné les avantages et les inconvénients de ces systèmes.

Nous avons également discuté des différents types de systèmes photovoltaïques, tels que les systèmes indépendants, les systèmes connectés au réseau et les systèmes hybrides. Nous avons inclus une section supplémentaire portant sur l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque indépendante en Algérie, en soulignant son importance

# **Chapitre II**

**Command MPPT**

### Introduction:

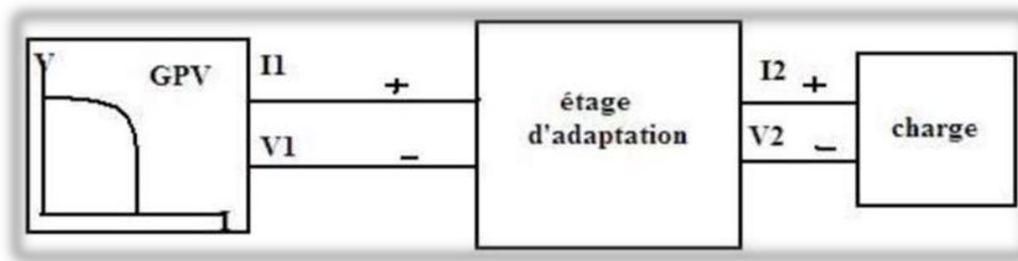
Les variations climatique d'un générateur photovoltaïque entraîne une fluctuation sur ses caractéristiques courant-tension ainsi sur sa puissance maximale, pour que ce générateur photovoltaïque travaille au maximum de puissance tout le temps, un convertisseur DC-DC nécessaire doit améliorer la tension de sortie en tension de haute qualité, et des défèrent contrôleurs de poursuite le point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking, MPPT) conçu à commander le régulateur.

### II.1 Fonctionnement d'un GPV a sa puissance maximale:

Le relevé de la caractéristique courant- tension optimal d'un GPV est une opération nécessaire, qui dépend totalement des conditions de l'éclairement et la température, noté ( $I_{opt}$ -  $V_{opt}$ ) ce point alors dite MPP de ce GPV considérée comme optimal en ce point, afin d'avoir une adaptation de son impédance et celle de la charge.

### II.2 Etage d'adaptation:

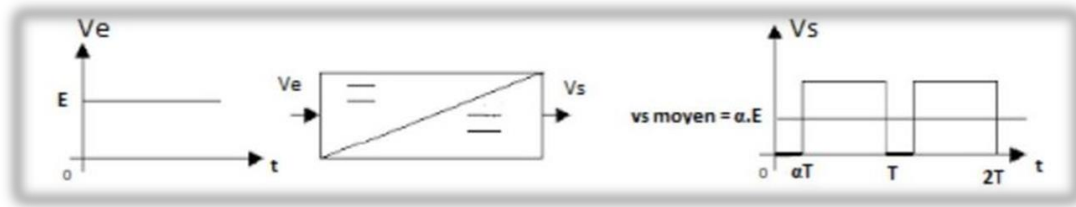
Cette étage joue un rôle d'interface entre le GPV et la charge (Figure II.1), en assurant le transfert du maximum de puissance, ces adaptateurs d'impédance sont des convertisseurs DC-DC avec les défèrent topologie.



**Figure II.1 :** connexion d'un GPV a une charge à travers un étage d'adaptation

### II.3 Convertisseur DC-DC:

Un hacheur est un convertisseur continue-continue qui permet de générer une source de tension continue variable à partir d'une autre source de tension continue, il consomme moins de puissance c'est pour cette raison que les hacheurs ont de très bon rendement. Parmi ses conceptions on trouve un interrupteur transistor K, une diode D, une inductance L et un condensateur C, leur principe de base est d'avoir une tension de sortie en fonction de  $\alpha$  telle que ce dernier est le rapport cyclique, il représente la fraction de la période T pendant laquelle l'interrupteur k conduit, ce rapport est compris entre 0 et 1.

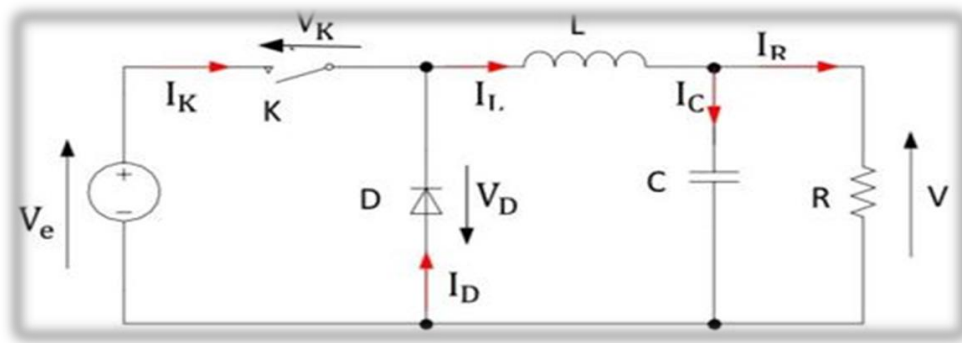


**Figure.II.2** : Le principe de base d'un hacheur

Selon la position du commutateur et d'hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés

### II.3.1 Convertisseur Buck

Convertisseur Buck ou un hacheur dévolteur il permet de convertir une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur (abaisseur de tension), il possède un fort rendement et offre la possibilité de réguler la tension de sortie.



**Figure II.3** : Schéma de Convertisseur boost

#### Analyse de circuit :

L'interrupteur K est placée en série entre la tension continue d'entrée  $V_e$  et l'inductance  $L$ , dans ce cas D fonctionne en alternance avec l'interrupteur. Sur l'intervalle  $[0 ; \alpha T]$ , k fermée et D bloquée, le courant  $I_L$  augmente linéairement et une énergie  $E$  stockée dans  $L$  donnée comme suit.

$$E = \frac{1}{2} l \times I_L^2 \quad (\text{II} - 1)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{U_l}{L} = \frac{V_e - V}{L} \quad (\text{II} - 2)$$

Sur l'intervalle  $[\alpha T ; T]$ ,  $k$  ouvert et  $D$  devient passante, dans ce cas l'inductance se décharge linéairement dans le condensateur  $C$  et la charge  $R$  à travers la diode avec une diminution du courant. Cette décharge n'est possible que si  $V < V_e$

Dans ce cas l'équation de  $U_L$  qui régit cette phase est :

$$U_L = -V \quad (\text{II} - 3)$$

La tension moyenne aux bornes de l'inductance en régime permanent est nul :

$$\langle U_L \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T U_L dt = 0 \quad (\text{II} - 4)$$

$$\frac{1}{T} \left[ \int_0^{\alpha T} (V_e - V) dt + \int_{\alpha T}^T (-V) dt \right] = \frac{1}{T} [(V_e - V)(\alpha T - 0) + (-V)(T - \alpha T)] = 0 \quad (\text{II} - 5)$$

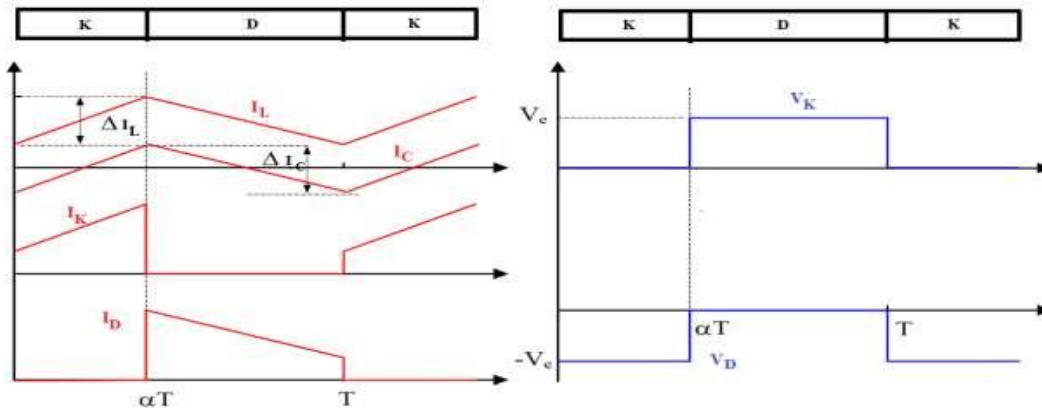
$$\langle U_L \rangle_T = V_e \alpha - V = 0 \quad (\text{II} - 6)$$

Le rapport cyclique  $M(\alpha)$  déduit de l'équation (II-6) est :

$$M(\alpha) = \frac{v}{v_e} = \alpha \quad (\text{II} - 7)$$

Comme nous avons obtenu dans cette dernière équation une tension d'entrée est toujours supérieure à celle de sortie.

Les formes d'onde des caractéristiques courants-tension représentant le fonctionnement d'hacheur dévolteur sont données par la Figure II.4.



**Figure II.4 :** Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck



### II.3.2 Convertisseur Boost:

Convertisseur Boost est un convertisseur conçu pour convertir une tension DC d'entrée en une tension DC de sortie avec un niveau beaucoup plus élevé est notamment appelée hacheur survolteur

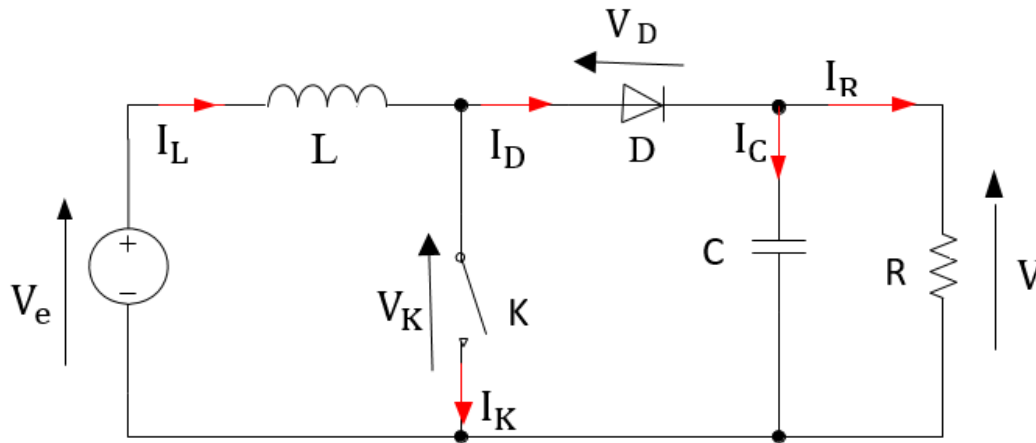


Figure II.5 : Schéma de Convertisseur boost

**Analyse de circuit :** Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur k.

La phase  $[0 ; \alpha T]$ , l'état passante ou k conduit D sera bloquée, et la charge alors est déconnectée de l'alimentation cela entraîne l'augmentation de courant dans l'inductance L donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique.

L'équation de courant de l'inductance est donnée comme suite :

$$\frac{dU_l}{dt} = \frac{U_l}{L} = \frac{V_e}{L} \quad (\text{II} - 8)$$

Dans la phase  $[\alpha T ; T]$ , état bloquée ou k ouvert D passante, dans ce cas l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur, Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

Nous étudierons, ici le mode conduction continu pour déduire le rapport entre l'entrée et la sortie en fonction du rapport cyclique :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{U_L}{L} = \frac{V_e}{L} \quad (\text{II} - 9)$$

$$\langle U_L \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T U_L dt = 0 \quad (\text{II} - 10)$$

$$\frac{1}{T} \left[ \int_0^{\alpha T} V_e dt + \int_{\alpha T}^T (V_e - V) dt \right] = \frac{1}{T} [(V_e)(\alpha T - 0) + (V_e - V)(T - \alpha T)] = 0 \quad (\text{II} - 11)$$

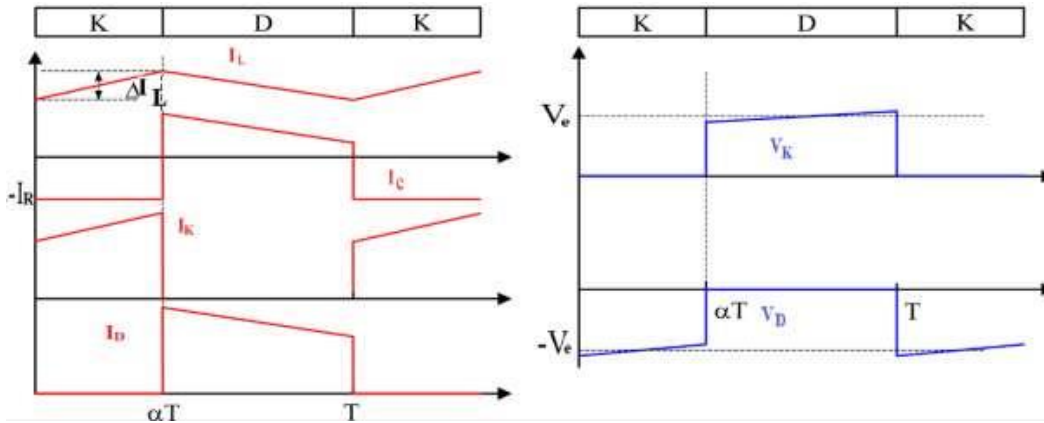
$$V_e - V(1 - \alpha) = 0 \quad (\text{II} - 12)$$

Le rapport cyclique est alors de cette forme :

$$M(\alpha) = \frac{V}{V_e} = \frac{1}{(\alpha - 1)} \quad (\text{II} - 13)$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée. C'est pour cela que l'on parle de survolteur .

Les formes d'onde des caractéristiques d'hacheur dévolteur :



**Figure II.6 :** Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Boost

### I.3.3 Convertisseur Buck-Boost:

Est un convertisseur qui combine les propriétés des convertisseurs Buck et Boost il est donc Abaisseur / Elévateur de tension, de plus c'est un montage inverseur de tension, son schéma de principe est montrée dans la Figure.II.7.

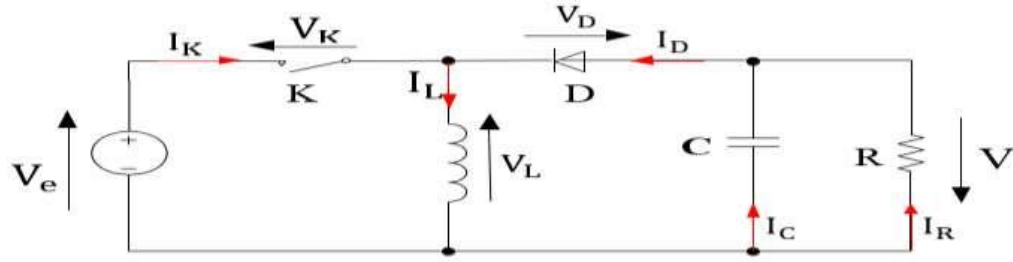


Figure.II.7 : Schéma de Convertisseur Buck-Boost

À la fin de l'état passant, le courant  $I_L$  a augmenté de :

$$\frac{dI_L}{dT} = \frac{V_e}{L} \quad (\text{II} - 14)$$

Pendant l'état bloqué, on a :

$$U_L = -V \quad (\text{II} - 15)$$

En régime permanent la valeur moyennes de la bobine L est nul :

$$\langle U_L \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T U_L dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{aT} V_e dt + \int_{aT}^T (-V) dt \right] = 0 \quad (\text{II} - 16)$$

$$\frac{1}{T} [(V_e)(aT - 0) + (-V)(T - aT)] = V_e a - V(1 - a) = 0 \quad (\text{II} - 17)$$

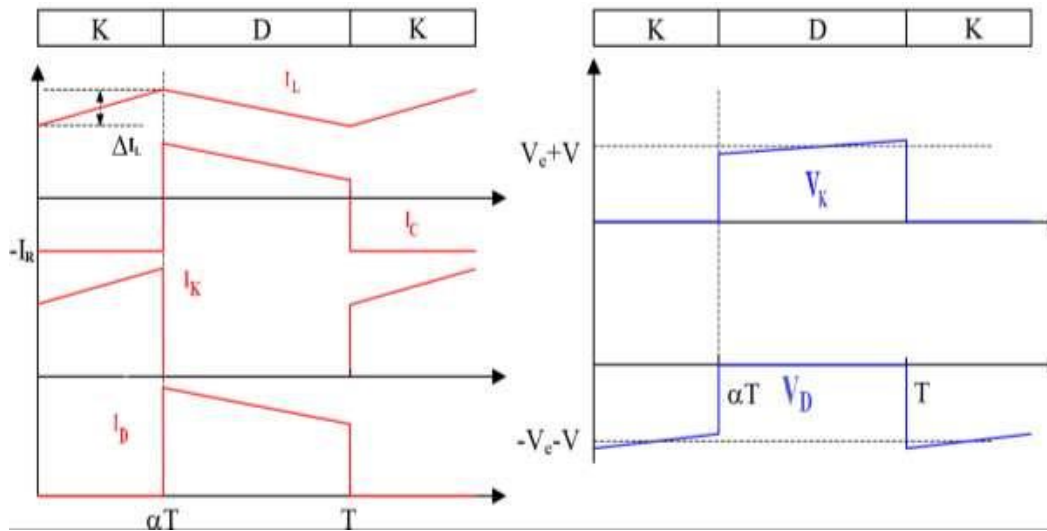
Où le rapporte cyclique  $M(\alpha)$  obtenue est :

$$M(a) = \frac{V}{V_e} = \frac{a}{(1 - a)} \quad (\text{II} - 18)$$

Les principales différences aux convertisseurs buck et boost sont :

La tension de sortie est de polarité inverse de celle d'entrée.

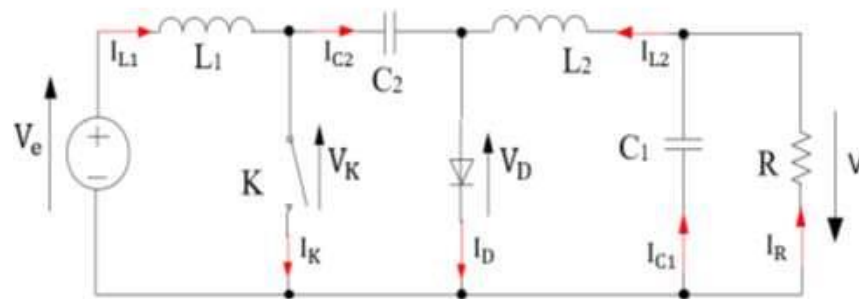
La tension de sortie peut varier de 0 à  $-\infty$ .



**Figure.II.8 :** Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Buck-Boost

### II.3.4 Convertisseur Cuk

Ce type de convertisseur est un montage abaisseur-élevateur et inverseur de tension. Il est considéré une liaison entre deux sources de courant continu par l'intermédiaire d'une source de tension continue qui doit accumuler puis restituer au récepteur l'énergie délivrée par le générateur, suivant le schéma de principe ci-dessous Figure.II.9.



**Figure.II.9 :** Schéma de Convertisseur Cuk

Les équations obtenues durant l'état passante  $[0 ; \alpha T]$

$$U_{L1} = V_e \quad (\text{II} - 19)$$

$$U_{L1} = -U_1 - V \quad (\text{II} - 20)$$

Les équations obtenues pendant l'état bloquée  $[\alpha T ; T]$

$$U_{L1} = V_e - U_{C1} \quad (\text{II} - 21)$$

$$U_{L2} = -V \quad (\text{II} - 22)$$

Les valeurs moyenne de UL1 et UL2 sont :

$$\langle U_{L1} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T U_{L1} dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{aT} V_e dt + \int_{aT}^T (V_e - U_{C1}) dt \right] = 0 \quad (\text{II} - 23)$$

$$V_e - U_{C1}(1 - a) = 0 \quad (\text{II} - 24)$$

$$\langle U_{L2} \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T U_{L2} dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{aT} (-U_{C1} - V) dt + \int_{aT}^T (-V) dt \right] = 0 \quad (\text{II} - 25)$$

$$-U_{C1}a - V = 0 \quad (\text{II} - 26)$$

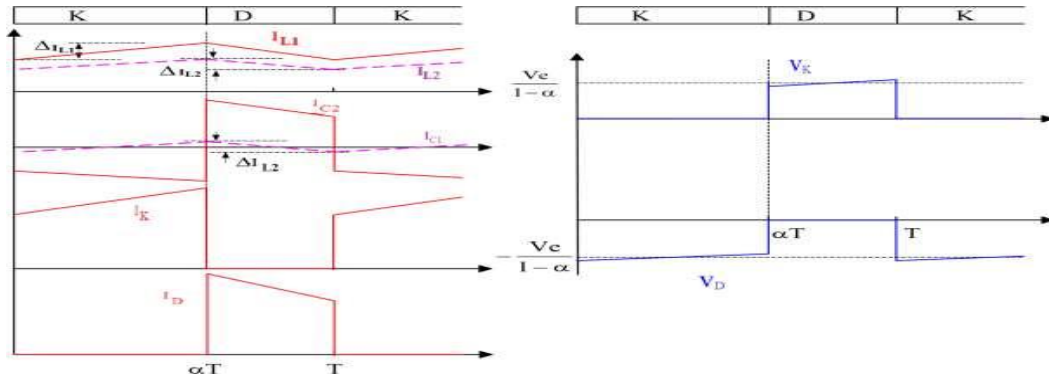
A partir de l'équation (II.25) peut déduire l'équation de  $U_{C1}$  :

$$U_{C1} = \frac{-V}{a} \quad (\text{II} - 27)$$

On remplace  $U_{C1}$  par son expression dans  $\langle U_{L1} \rangle_T$  pour obtenir l'expression du rapport cyclique :

$$V_e + \frac{V}{a}(1 - a) = 0 \quad (\text{II} - 28)$$

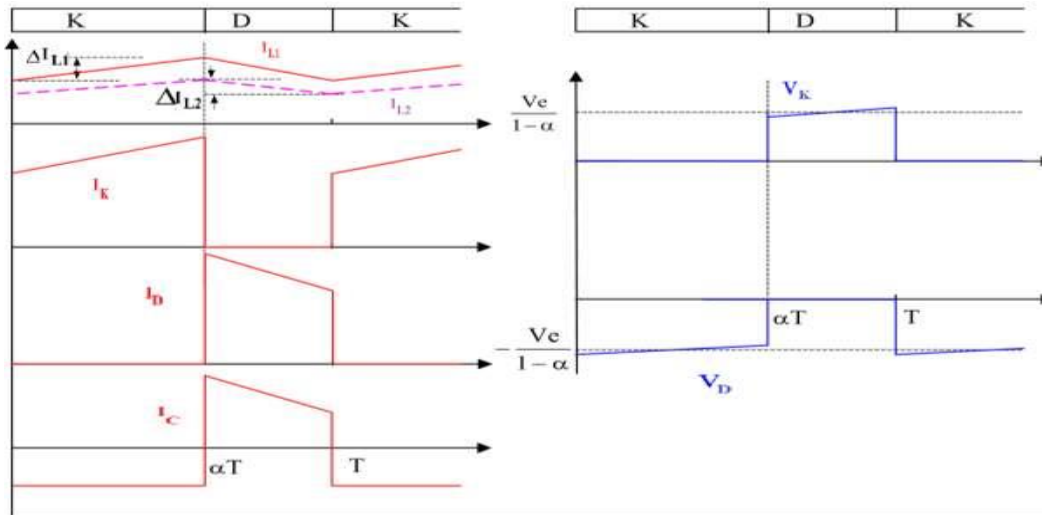
$$\frac{V}{V_e} = -\frac{a}{(1 - a)} = M(\alpha) \quad (\text{II} - 29)$$



**Figure.II.10 :** Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Cuk

### II.3.5 Convertisseur Sepic:

Le convertisseur Sepic Figure.II.10 présente des caractéristiques similaires à celles du convertisseur Cuk, sauf qu'il n'est plus inverseur de tension.



**Figure.II.11** : Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Sepic

### II.4 Commande MPPT

De nombreuses recherches ont été menées sur les commandes MPPT dans le but de trouver un système optimal permettant de rechercher le point de puissance maximale (PPM) en fonction de la variation de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

Dans la littérature, différents types d'algorithmes de commande extrême sont mentionnés, présentant des niveaux de précision variables. Ces commandes utilisent l'évaluation ou la mesure de la puissance fournie par le générateur pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur de puissance et appliquer une action de contrôle appropriée afin de suivre l'évolution du PPM au fil du temps.

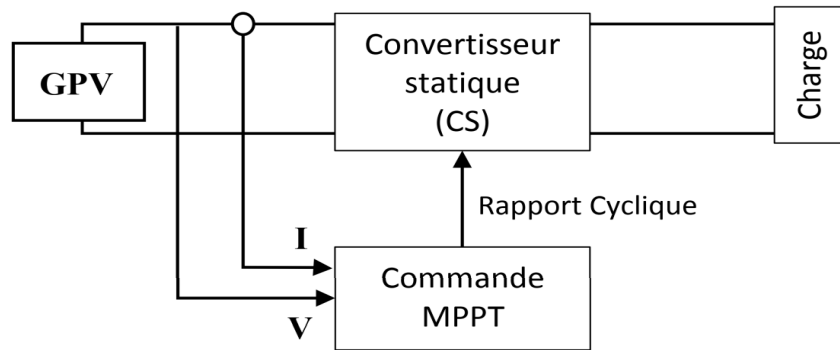
Un grand nombre de ces commandes offrent l'avantage d'être précises et d'avoir une réactivité élevée. Cependant, certaines souffrent d'un manque d'optimisation de leur algorithme, qui peut parfois être trop complexe et entraîner une consommation d'énergie excessive. Il est donc nécessaire de développer des algorithmes de commande plus optimisés, qui parviennent à concilier précision et rapidité de réaction tout en minimisant la complexité et la consommation d'énergie associées. Cette recherche d'optimisation reste un défi important dans le domaine des commandes MPPT.

#### Principe de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire

fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM).

La chaîne de conversion photovoltaïque est optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. Il peut être représenté par le schéma de la figure (II.11) [25-26].



**Figure II.12:** Schéma de base d'une alimentation utilisant des panneaux solaires.

#### II.4.1 Méthodes classiques de commande MPPT

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance  $v=f(V_p)$  obtenue directement de la caractéristique du (PV) [23], [24]. Le point de puissance maximale (PPM) est obtenu quand la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, soit

$$\frac{dp_v}{dv_p} = 0 \quad (\text{II} - 30)$$

##### II.4.1.1 Algorithme Perturber et Observer (P&O) :

Ce processus est caractérisé par la perturbation du système tout en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$  pour le but de la recherche de MPPT, ce processus entraîne une augmentation ou une diminution de la tension, suite à cette perturbation on observe à chaque instant  $k$  les variations de puissance et de tension puis on les compare aux précédentes de l'instant  $k-1$ . Si la puissance augmente, on s'approche au point de puissance maximum, donc on continue à perturber la tension dans le même sens, et si la puissance diminue, on s'éloigne donc du MPP. Dans ce dernier cas on doit inverser le sens de perturbation de tension comme il est représenté dans la Figure.II.13, Ce processus répète périodiquement jusqu'à ce que le MPP soit atteint selon l'organigramme de la Figure.II.14.

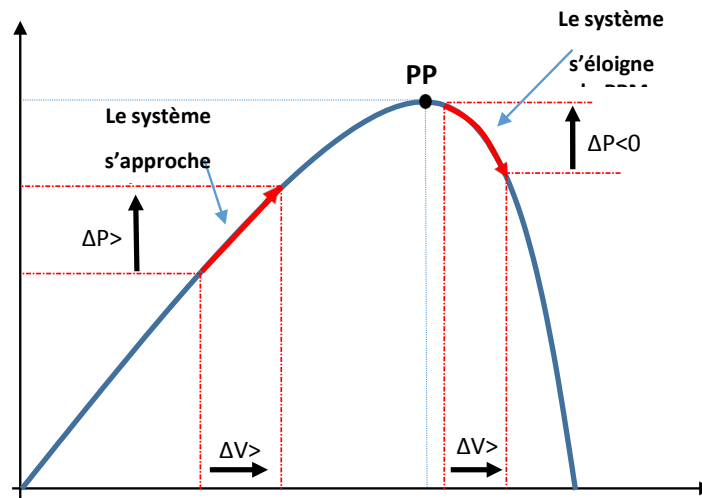


Figure.II.13 : principe de méthode P&amp;O

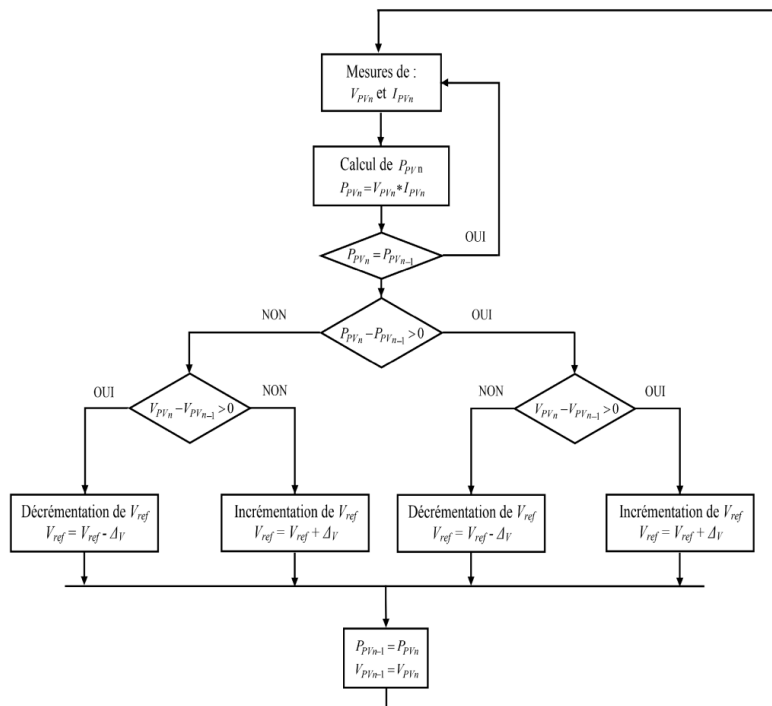


Figure .II.14 : Organigramme de l'algorithme de P&amp;O

L'inconvénient de cette méthode lors d'un changement des conditions atmosphériques (lumière) la puissance du point de recherche sera perturbée par l'ensoleillement et non pas par la perturbation de l'algorithme [8][9], ce réagit comme si cette augmentation est produite par



l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, Par conséquent, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP et continuera à s'éloigner si l'éclairement augmente (ou diminue) progressivement, une version améliorée de cet algorithme est proposée, où on introduit une nouvelle condition dans la branche « Oui » de condition  $\Delta P(k) > 0$  dans la structure de l'organigramme de l'algorithme de P&O.

#### II.4.2 Algorithme incrémentation de la conductance (INC) :

Cette technique est basée sur la connaissance de la variation de la conductance du GPV et des connaissances sur la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximum, tel que la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiquée dans l'équation suivante

$$G = \frac{i}{V} \quad (\text{II} - 31)$$

La position de point de fonctionnement par rapport au PPM est donnée par l'évolution de la puissance du module ( $P_{pv}$ ) par rapport à la tension  $V_{pv}$ , la Figure. II.15 permet d'écrire les conditions suivantes :

Si  $\frac{dP}{dV} > 0$ , le point de fonctionnement est à gauche de MPPT.

Si  $\frac{dP}{dV} = 0$ , le point de fonctionnement est sur le MPPT.

Si  $\frac{dP}{dV} < 0$ , le point de fonctionnement est à droite de MPPT.

Le lien entre la conductance et la dérivée de puissance  $\frac{dP}{dV}$  peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V * i)}{dV} \quad (\text{II} - 32)$$

Cette équation selon la règle du produit peut être réécrite :

$$\frac{dP}{dV} = i \frac{dV}{dV} + V \frac{di}{dV} = i + V \frac{di}{dV} \quad (\text{II} - 33)$$

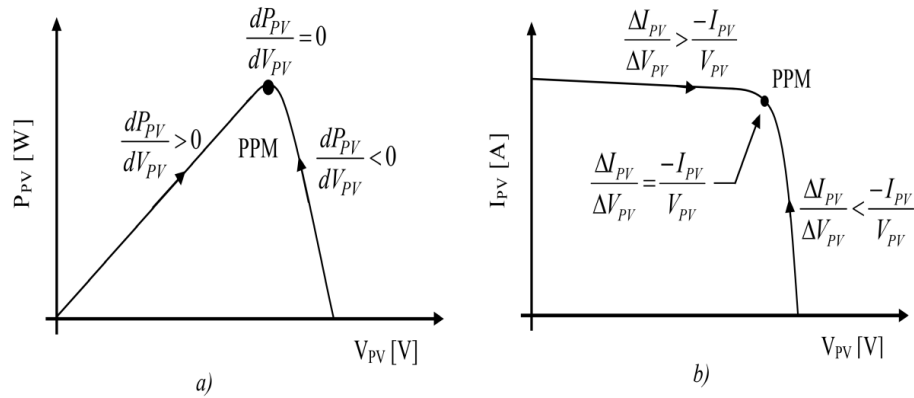
$$\frac{di}{dV} = -\frac{i}{V} \quad (\text{II} - 34)$$

Donc les nouvelles variations de la conductance sont comme suite :

Si  $\frac{di}{dv} > -i$ , le PF est à gauche de MPPT.

Si  $\frac{di}{dv} = -i$ , le PF est sur le MPPT.

Si  $\frac{di}{dv} < -i$ , le PF est à droite de MPPT.



**Figure.II.15** : Positionnement du point de fonctionnement

Si l'incrément de conductance  $dG$  est supérieur à l'opposé de la conductance on diminue le rapport cyclique cela produit une augmentation de la tension, par contre si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de cette dernière on augmente le rapport cyclique, ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM.

Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la figure suivante.

**Figure.II.16** : Algorithme basée sur la méthode Incrément de conductance

Figure.II.16 : Algorithme basée sur la Figure.II.16 : Algorithme basée sur la méthode I

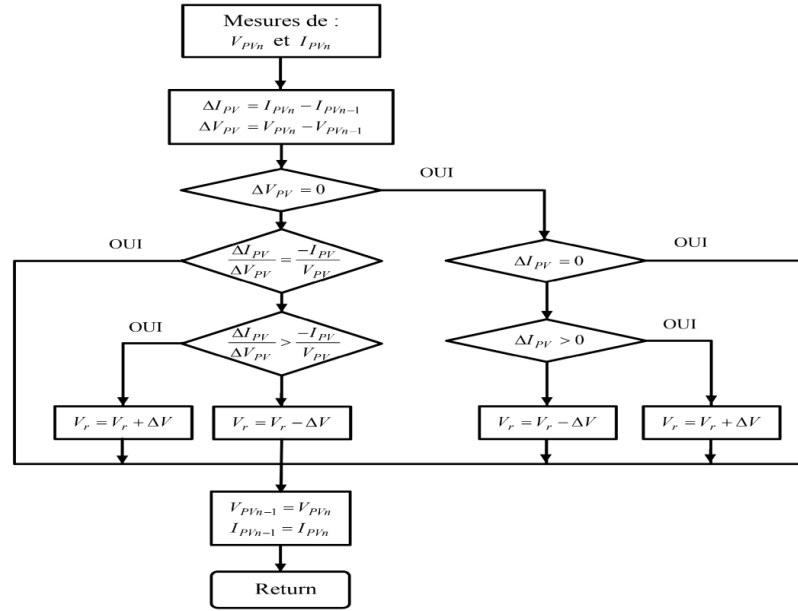


Figure .II.16 : Organigramme de l'algorithme de l'incrément de conductance

### II.4.3 Méthodes à bus l'intelligence artificielle de commande MPPT

#### II.4.4 Algorithme à base de la Logique floue:

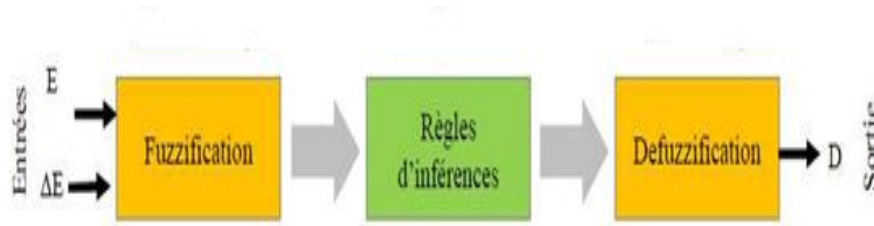
Cette commande est classée parmi les plus utiliser grâce à l'évolution des microcontrôleurs, l'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précise, l'approche de FL est issue à la décomposition d'une plage de variation d'une variable réelle sous formes de variables linguistiques et l'attribution de la fonction d'appartenance pour chaque variable, Cette théorie est adaptée au problème d'optimisation atteindre le MPP, elle repose sur l'observation en temps réel de deux critères d'entrée sont l'écart E par rapport à la valeur recherchée  $E = 0$  et la variation de l'erreur CE qui représente le sens et la vitesse de convergence, et une variation de sortie  $\Delta\alpha$  qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le MPP.

Les deux entrées de contrôleur sont définies par les équations suivante :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{v(k) - v(k-1)} \quad (\text{II} - 35)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{II} - 36)$$

Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois bloc : la fuzzification, l'inférence et la Defuzzification comme le montre sur la figure suivante.



**FigureII.17:** Structure de base du contrôleur MPPT à base logique floue.

**La fuzzification** : Cette unité porte sur la conversion de variables réelles à des variables floue pouvant prendre cinq valeurs suivantes :

NB : Negative Big

NS : Negative Small

ZE : Zero PS : Positive Small

PB : Positive Big

**L'inférence** : L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. En effet, des règles d'appartenance vont être définies pour la sortie comme ça était fait pour les entrées, dans ce cas L'inférence floue est effectuée à l'aide de la méthode de Mamdani, utilise des règles de type IF... AND... THEN.

**La Défuzzification** : Utilise la méthode centroïde pour calculer le  $\Delta\alpha$  de sortie qui est considéré comme le barycentre.

Parmi les différentes formes des fonctions d'appartenance on 'a trapèze, gaussien et triangulaire, mais la forme triangulaire est considérée comme la plus appropriée pour sa simplicité.

**Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons étudié un étage d'adaptation (une interface d'électronique de puissance) entre le système **PV** et la charge, on a étudié les différents convertisseurs **DC-DC** avec leurs influences sur la tension de panneau **PV**, nous avons ensuite présenté les techniques les plus populaires pour la poursuite de point de fonctionnement à puissance maximale. Nous avons commencé par l'explication des méthodes classiques les plus utilisées **P&O** et **INC** et leurs organigrammes.

. Vers la fin on a étudié la méthode basée sur l'intelligence artificielle **FL** et l'approche métaheuristique **P&O** avec les étapes d'optimisation de ce dernier.

# **CHAPITRE III**

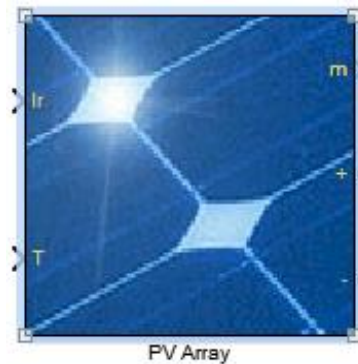
**Simulation et résultat de la  
command MPPT**

### III.1. introduction:

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Le point de fonctionnement dans ce cas se situe à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique I-V du générateur. Ce point ne peut pas coïncider avec le point de puissance maximale, il s'ensuit une perte de puissance maximale du système. Ce problème peut être résolu soit par le changement de configuration du générateur photovoltaïque, soit par l'adjonction d'un dispositif de recherche de point de puissance maximale placé entre le générateur et la charge pour assurer l'adaptation d'impédance. L'exploitation optimale de l'énergie électrique disponible aux bornes du générateur photovoltaïque peut contribuer à la réduction du coût global du système. Il existe plusieurs techniques pour satisfaire ce but. Dans ce chapitre nous allons citer et expliquer différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale et en terminant par notre méthode qui est choisie parmi les précédents s'appelle 'perturbation et observation', (P&O : Perturb-and-Observe).[15]

### III.2. simulation d'un module photovoltaïque :

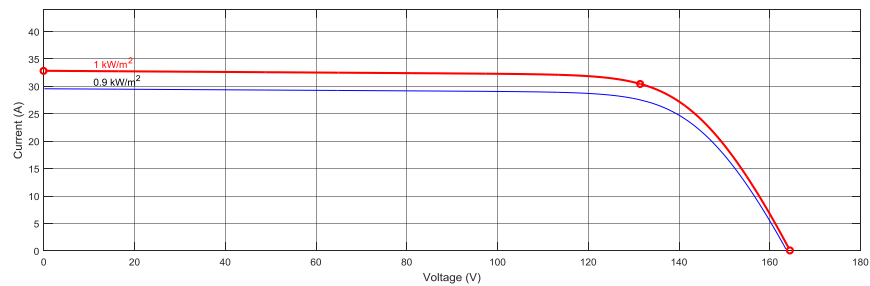
Sur la base du modèle mathématique de la cellule solaire développé dans l'outil MATLAB/ Sim Power System. Le bloc schématique de SIMULINK est montré sur la Figure (1.10).



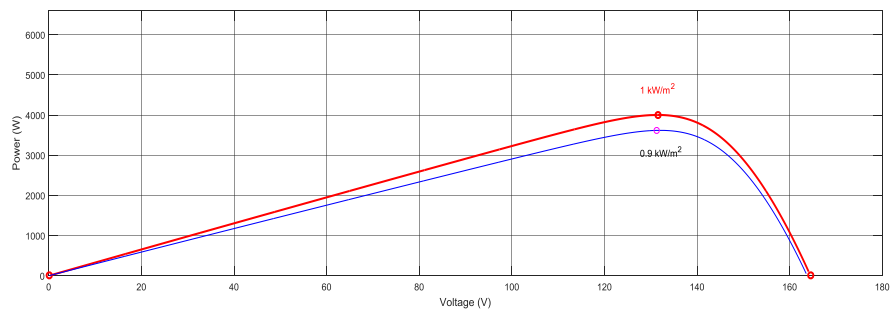
**Figure.III.1 :** Schéma de simulation d'un module photovoltaïque

**Tableaux III.1 :** Caractéristiques électriques du module PV KC200GT en condition de test standard [16].

|                                                    |           |
|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>Nombre de cellule en série par panneau (Ns)</b> | 54        |
| <b>Puissance maximale (P<sub>max</sub>)</b>        | 200.143 W |
| <b>Courant de court-circuit (I<sub>cc</sub>)</b>   | 8.21 A    |
| <b>Tension de circuit ouvert (v<sub>co</sub>)</b>  | 32.9 V    |
| <b>Courant au point de MPP (I<sub>op</sub>)</b>    | 7.61 A    |
| <b>Tension au point de MPP (v<sub>op</sub>)</b>    | 26.3 V    |



**Figure.III.2 :**Caractéristique I-V d'unmodule PV.

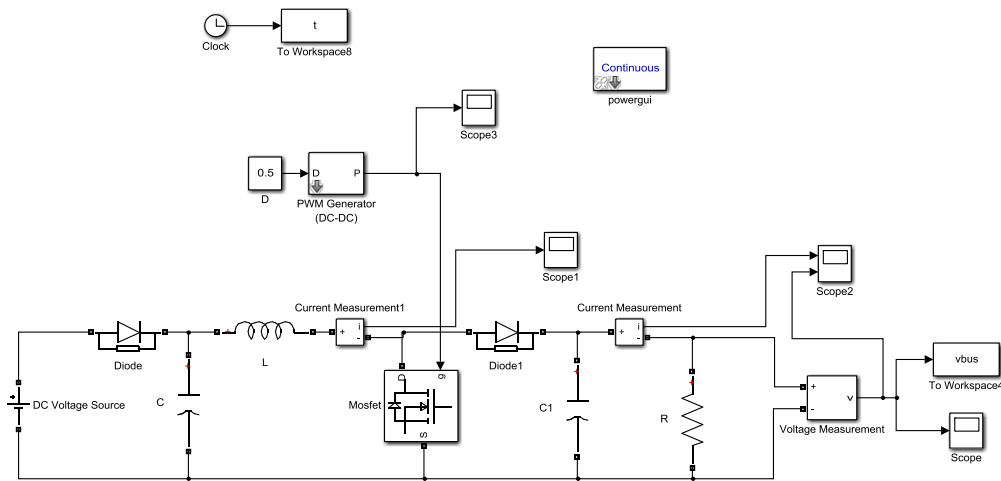


**Figure.III.3:** Caractéristique P-V d'unmodule PV.

### III.3. Simulation du convertisseur boost :

Pour montrer le rôle des convertisseurs boost nous avons utilisé logiciel Matlab pour la simulation et nous prenons ( $E=100V$ ,  $L= 4e-4$  H,  $R=200$ ,  $D=variable$ ).

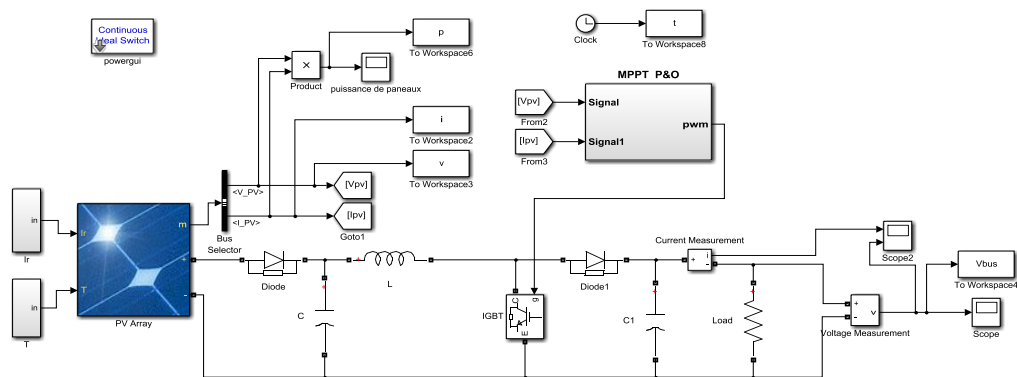


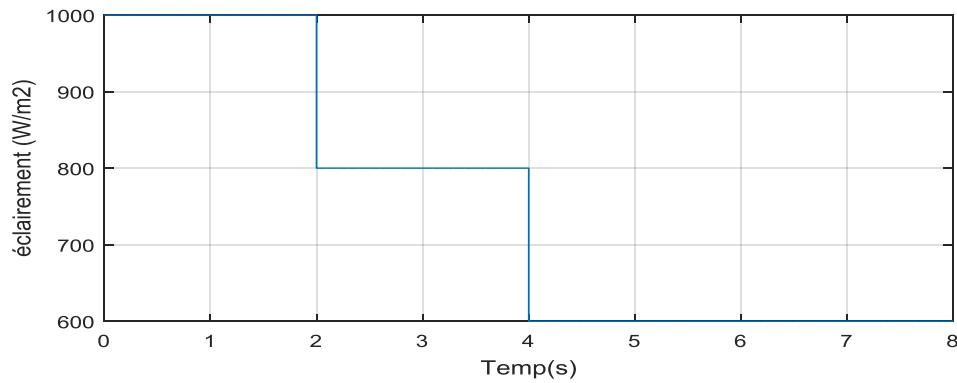
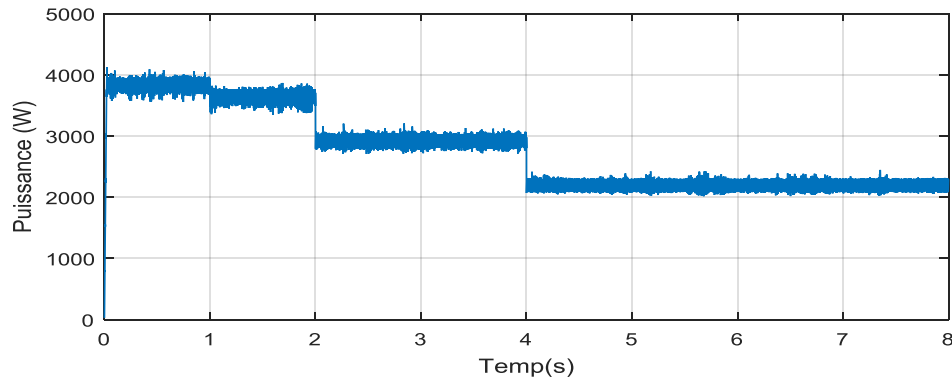
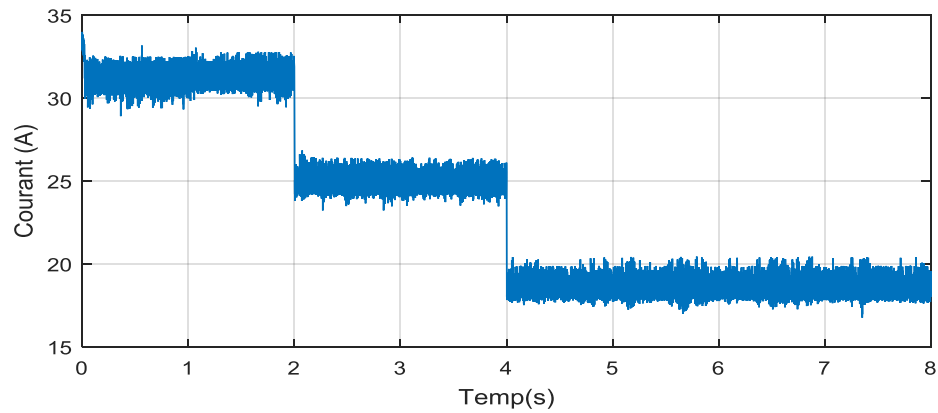
**Figure.III.4 :** Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC.**Figure.III.5 :** Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC.

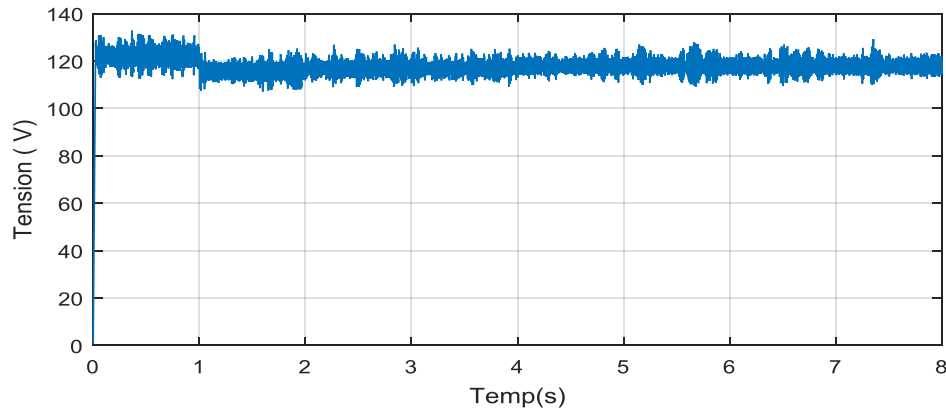
| C1      | C2      | L    |
|---------|---------|------|
| 4700e-6 | 1200e-6 | 4e-4 |

**TableauIII.2 :** Paramètres du convertisseur DC-DC boost.

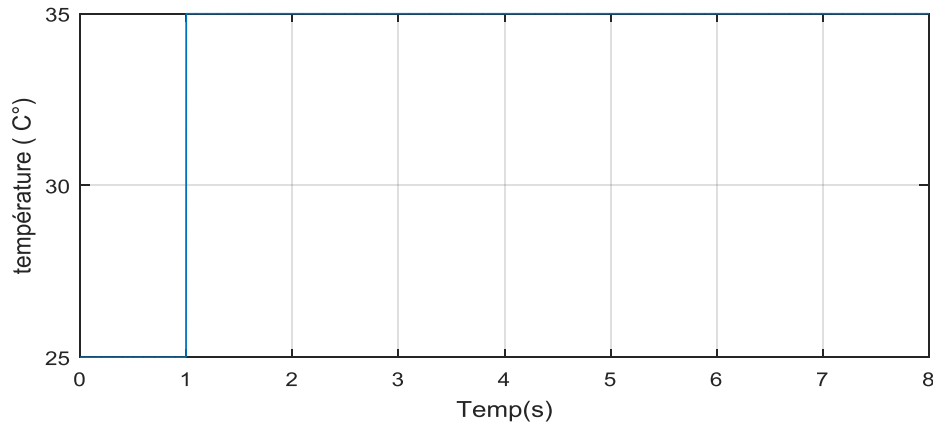
### II.3.1.1 Algorithme Perturber et Observer (P&O) :

**Figure III .6:**schématique de SIMULINK du générateur photovoltaïque avec MPPT.

**Figure III.7:** Variation de l'éclairement.**Figure III.8:** Résultats de simulation des courbes de puissance**Figure III.9:** Résultats de simulation du courant.



**Figure III.10:** Résultats de simulation de la tension.



**Figure III.11:** Variation de la température

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur MPPT par la méthode P&O à des meilleures performances comme le montre la figure 2.18, avec petit des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide.

### III.4. MPPT en logique floue, présentation du système :

#### III.4.1. Définition des critères d'entrées :

##### III.4.1.1. L'écart E:

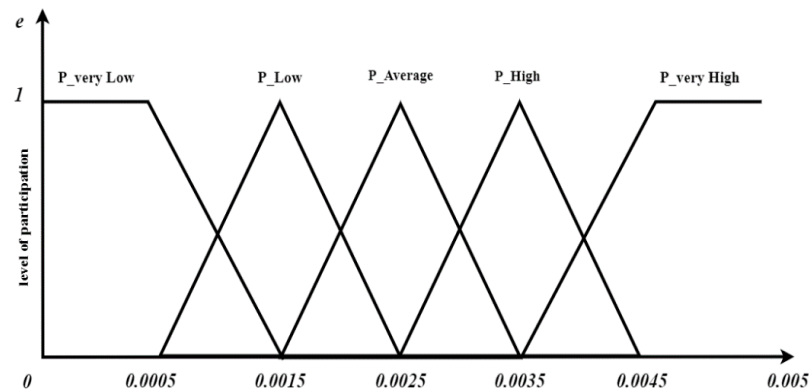
C'est l'écart entre  $\frac{dp}{dl} = (k)$  et la valeur recherchée  $\frac{dP}{dl}(k) = 0$ . Cette dernière valeur correspond à l'unique extremum de la courbe  $P = f(I)$ , Cet extremum est un maximum .

Plus E est positif, plus la valeur de P croit .Inversement, plus E est négatif, plus la valeur de P décroît.

Enfin quand E tend vers 0, la valeur de P tend vers son maximum, le MPP. On peut l'assimiler à la pente  $P = f(I)$

$$E(K) = \frac{dp}{dt}(k) - 0 = \frac{dP}{dt}(K) \quad (\text{III} - 1).$$

Les figures (IV.1) et (IV.2) donne respectivement les fonctions d'appartenance associées à la variante E le premier contrôleur de (type I) .

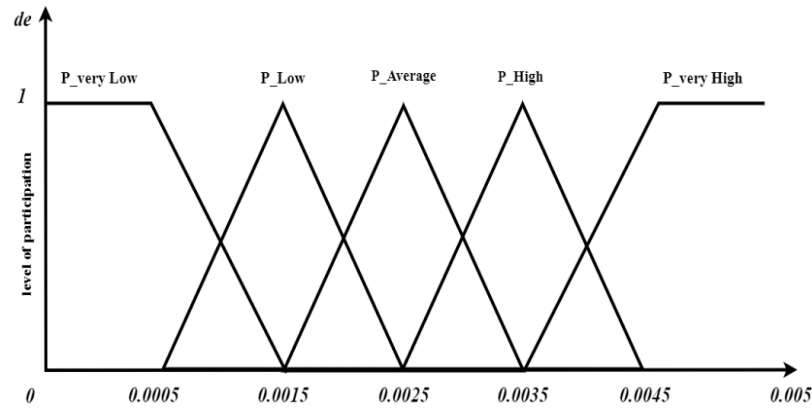


**Figure III.12:** Fonctions d'appartenance de la variable E (MPPT floue type I)

Chaque variable du contrôleur est définie par cinq (5) fonctions d'appartenance. Nous utilisons des fonctions de triangulaires et trapézoïdales aux extrémités des univers de discours pour les variables d'entrée (E). Les termes linguistiques associés aux fonctions d'appartenance sont : PG (positif grand), PP (positif petit), ZE (Zéro), NP (négatif petit) et NG (négatif grand).

#### III.4.1.2. Variation de l'écart CE:

La variation de l'écart CE indique dans quel sens et dans quelle proportion l'écart se modifie à mesure que l'algorithme suit son cours. Ainsi, lorsque CE tend vers 0, le système se stabilise (mais pas nécessairement au MPP) Les figures (III.8) et (III.9) donne respectivement les fonctions d'appartenance associées à la variante CE le premier contrôleur de (type I)



**Figure III.13:** Fonctions d'appartenance de la variable CE (MPPT floue type I)

### III.4.2. Définition du critère

**de sortie :**

#### IV.4.2.1. Incrément dD

L'incrément di correspond à la valeur d'ajustement additionnée au courant I a chaque itération de l'algorithme.

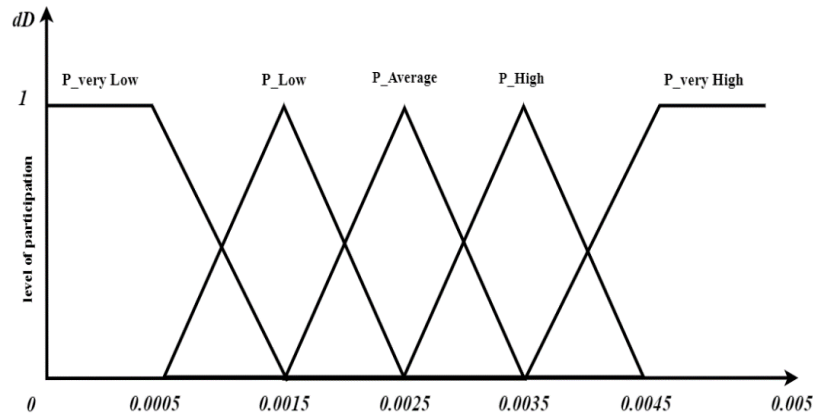
C'est-a-dire que

$$I(K) = I(K - 1) + dD \quad (\text{III} - 2)$$

Nous avons défini 7 classes

d'incrément allant du grand incrément négatif au grand incrément positif. Ces 7 classes de sorties correspondent aux 7 règles du système flou

Les figures (III.10) et (III.11) donnent respectivement les fonctions d'appartenance associées à la variante dD le premier contrôleur de (type I)

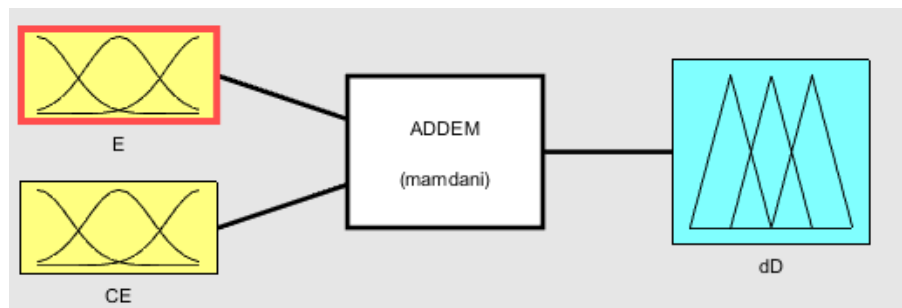


**Figure III.14:** Fonctions d'appartenance de la variable dD (MPPT floue type I)

### III.5.3. Fonctionnement du système floue

#### III.2.3.1. Schéma de fonctionnement

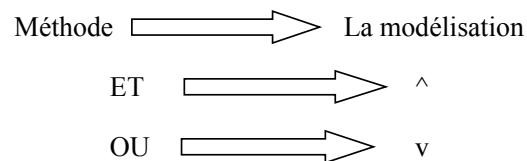
Le système flou possède deux entrées (E et CE) et une sortie dD



**Figure III.15:** Schéma de fonctionnement du système flou conçu via la fuzzylogictoolbox de Matlab

#### III.2.3.2. Schéma d'inférence

Le schéma d'inférence floue est celui de Mandani-Assilian :



On calcule le degré de déclenchement  $\mu_i$  de chacune des règles  $R_i$  en modélisant le «ET» par ( $\wedge$ ). La conséquence finale est obtenue par max-union de toutes les conséquences partielles. Nous avons défuzzifié par une méthode barycentrique («centroïde» dans la Fuzzy Logic Toolbox de Matlab).

### III.5.4. Tableau des règles floue

Le tableau ci-dessous donne l'ensemble des règles qui permettent de déterminer le signal de sortie dD du régulateur MPPT en fonction des signaux d'entrées (E et CE). Les règles de contrôle doivent être désignées de sorte que la variable d'entrée E doit être toujours nulle.

**Tableau III.3 :** tableau des règles des systèmes floue (type I)

| E=Voltage step<br>$\Delta e=(k)$ | PVL | PL  | PA  | PH  | PVH |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| PVL                              | PVH | PVL | PVL | PL  | PL  |
| PL                               | PVH | PVL | PVL | PL  | PL  |
| PA                               | PL  | PL  | PL  | PVH | PVH |
| PH                               | PL  | PVH | PL  | PVL | PVH |
| PVH                              | PVL | PVL | PVH | PH  | PVH |

Le tableau ci-dessous donne l'ensemble des règles qui permettent de déterminer le signal de sortie dD du régulateur MPPT floue type II en fonction des signaux d'entrées ( $\Delta P$  et  $\Delta V$ )

### III.5.5. Construction du courant Imppt :

La valeur de courant Imppt obtenue de l'addition de la sortie de système floue dI avec la valeur précédente de Imppt ( Imppt (k-1)).

$$Imppt(K) = Imppt(K - 1) + dI \quad (III - 3)$$

### III.5.6. Conception du contrôleur MPPT flou :

Dans ce travail nous utilisons la conception des contrôleurs flous (CF) appliqué à la poursuite du point de puissance maximale (commande MPPT floue

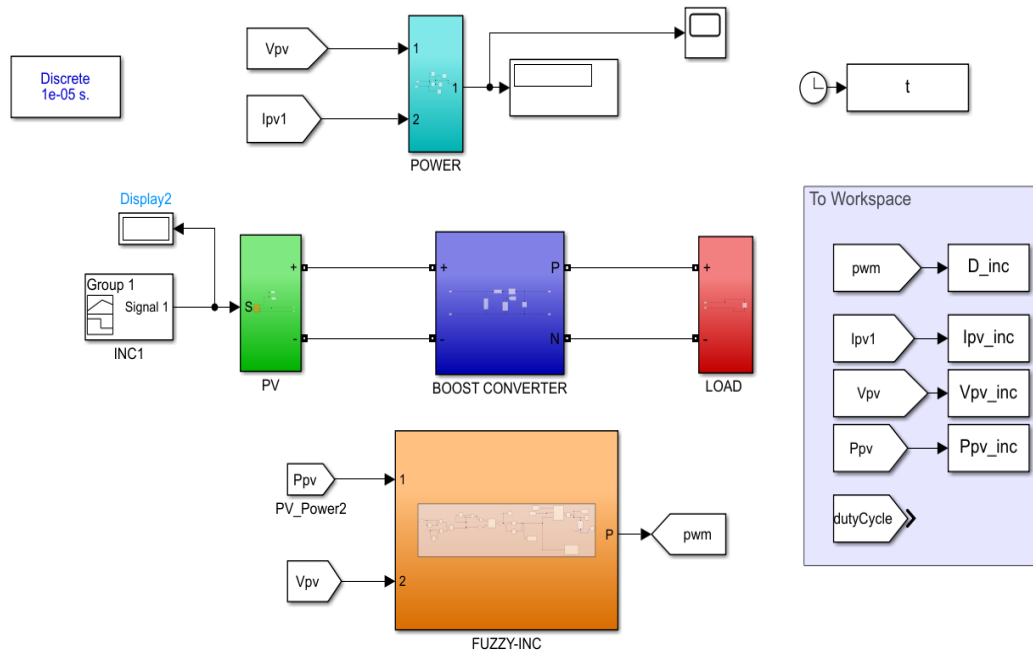


Figure III.16 : Schéma de la command MPPT floue

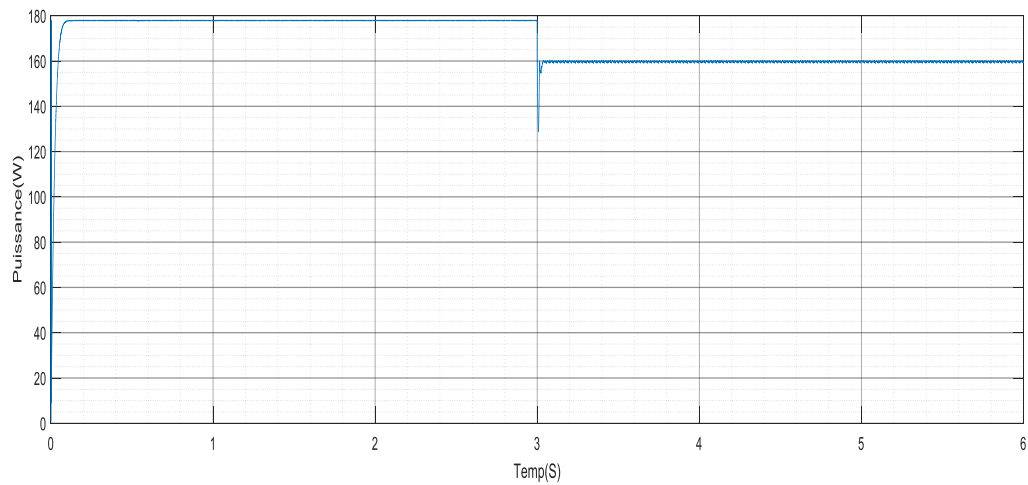
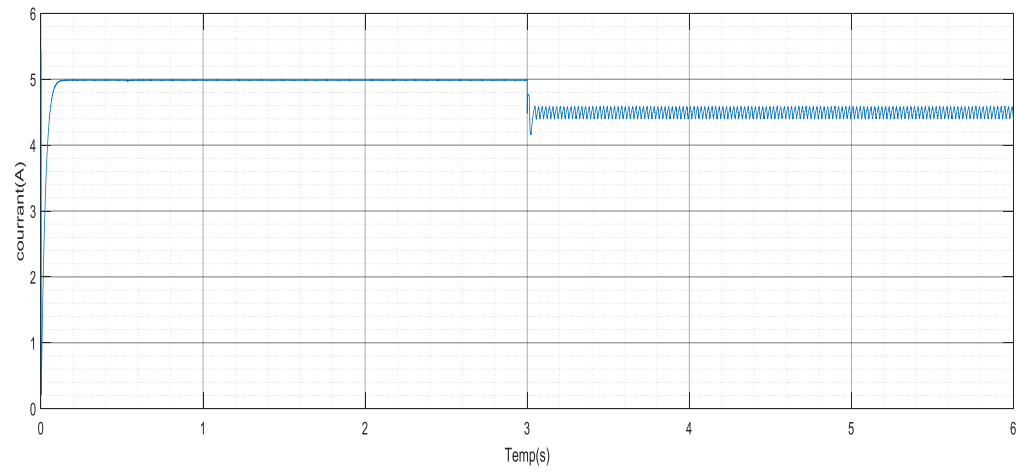
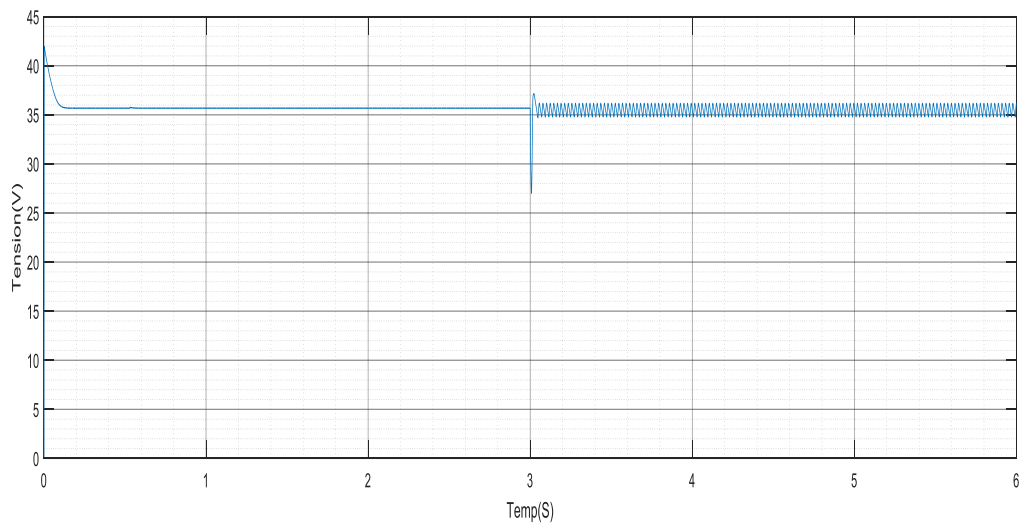
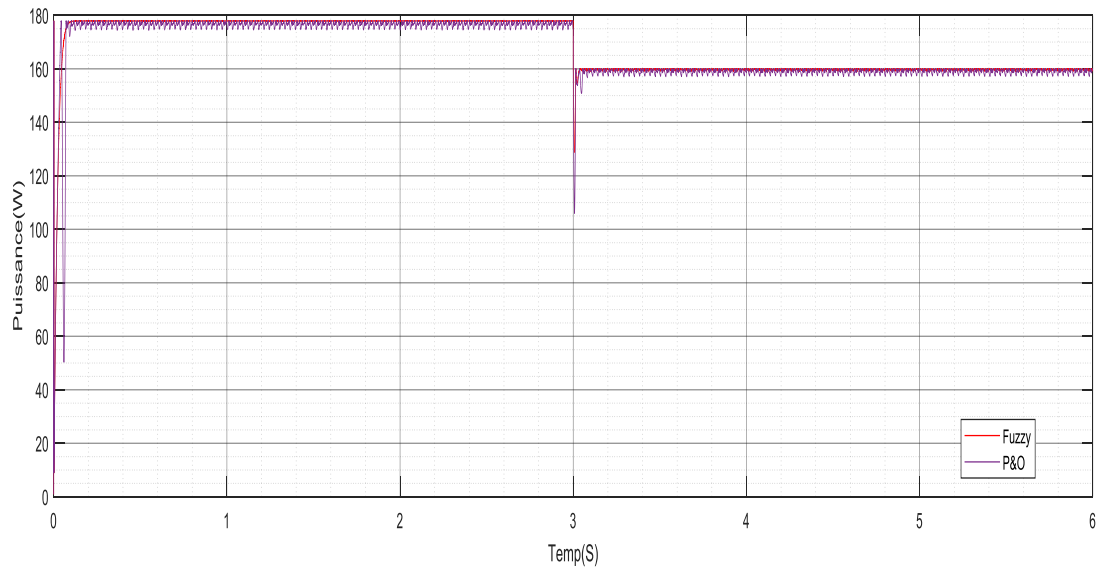


Figure III.17 : Résultats de simulation des courbes de puissance.



**Figure III.18:** Résultats de simulation du courant**Figure III.19:** Résultats de simulation de la tension.



**Figure III.20 :** Résultats de simulation des courbes de puissance

**conclusions :**

Dans ce chapitre, nous avons fait une présentation du système de commande mppt floue avec une application des deux commandes MPPT choisi sur le système PV associant le panneau PV – hacheur – charge. Nous avons ensuite présenté les résultats pour une variation de l'éclairement. Les résultats de simulation montre un fonctionnement satisfaisant sur la tension et la puissance générée et au niveau de la charge.

L'algorithme P&O est classique et simple. En général, cet algorithme repose fortement sur les conditions initiales et offre des fluctuations sur la valeur optimale. Le principal inconvénient de cet algorithme est sa mauvaise conduite après un brusque changement d'éclairage. L'algorithme floue se comporte mieux lorsque les conditions météorologiques changent rapidement. Cependant, il s'agit d'un algorithme plus complexe que le précédent.

# **Conclusion générale**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

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

Pour ce faire, nous avons commencé par introduire le lecteur pas à pas au domaine des systèmes photovoltaïque en rappelant quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque.

Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que leur type avec à la fin un aperçu de cette énergie en Algérie. Dans un deuxième temps, ayant les bases du chapitre I, nous avons attaqué la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV ainsi que ses performances sous l'influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement).

Puis nous avons détaillé le modèle du convertisseur Boost qui représente étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Quant à la partie de commande MPPT, faisant objet de cette étude, elle a été bien détaillée dans les chapitre III en présentant le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT.

Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles. La mise en place des simulations, la présentation des résultats obtenus, les discussions et la comparaison ont fait l'objet du dernier chapitre.

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

# **Bibliographie**

## ***BIBLIOGRAPHIE***

- [1] Bidi manel, "conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures", mémoire de master, université de m'sila, 2018-2019.
- [2] Ameer ali elhabib, daoudi mustapha, "dimensionnement d'une installation photovoltaïque (application entreprise enava)", mémoire de master, université dr. tahar moulay de saïda, 2015-2016.
- [3] Chouikhi wassila faiza, "réalisation d'une commande buck-boost pv", mémoire de master, université abou bakr belkaid tlemcen, 2017-018.
- [4] Benadel faiza, "étude et simulation d'une commande mppt pour système pv", mémoire de master, université mohamed boudiaf-m'sila, 2015-2016.
- [5] Kharef fatima zohra, "commande mppt pour les panneaux photovoltaïques en ombrage", mémoire de master, université ahmed draïa-adrar, 2020-2021.
- [6] Alaas mahmoud, boucetta issam, "maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de mppt soumis à des éclairagements différents", mémoire de master, université badji mokhtar annaba, 2017.
- [7] Ketfi noujoud, dahmani rahma, "commande non linéaire d'un système d'énergie renouvelable", mémoire de master, université mohamed el bachir eli brahimi, bordj bou arréidj, 2020-2021.
- [8] Boulmares ikhlas, kadiri hanane, "etude comparative des performances de différentes commandes mppt", mémoire de master, université ahmed draïa-adrar, 2019-2020.
- [9] Haik ammar, "etude et simulation du diagnostic des défauts et anomalies d'un générateur photovoltaïque", mémoire de master, université abdelhamid ibn badis mostaganem, 2020.
- [10] Belkaid abdelhakim, "conception et implémentation d'une commande mppt de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome", doctorat en sciences, université ferhat abbas, satiflufas (algerie), 2015.
- [11] Tayebi nourredine, "implémentation des algorithmes de poursuite appliqués au système photovoltaïque par arduino", mémoire de master, université de gharadïa, 2019-2020.
- [12] Cylia tigrine, ouerdia ait ouali, "etude et simulation des techniques mppt d'un système photovoltaïque", mémoire de master, université a.mira-bejaia, 2018-2019.
- [13] : A. AYOUDJ, « Etude des différentes commandes MPPT pour générateur photovoltaïque » Mémoire de Fin d'Etude, Université A. MIRA-BEJAIA.
- [14] : Bellazouz Lynda, « Réalisation d'une commande MPPT Numérique », Mémoire d'ingénieur en électronique de fin d'études, Université Abderrahmane Mira de Bejaia 2009/2010.

[15] : A. BIBOO LEORRTA, « Réalisation de techniques MPPT numérique », Rapport de stage, Projet de Fin d'Etudes, Université Virgila. [8] : E. Bianconi, J. Calvente, R. Giral, G. Petrone, « A fast current-based MPPT technique based on sliding mode controller », IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Poland, pp.59-64.

[16]: B. AZOUI, « Modelization and experimentation of low power system aimed to electrification of mountainous and isolation region », Mémoire de Magister, Université de Batna.

[17] : N. AOUCHICHE, « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque », Thèse de doctorat de l'Etablissement université Bourgogne Franche-Comté.

[18] : H. MEDDAH, « Etude d'un système photovoltaïque à base d'un convertisseur statique DC/DC à gain tension élevé », Projet fin d'Etude, Université A. MIRA-BEJAIA