



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



## **Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTE : TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT : Electronique**

### **MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par :**

**DERBALI Messaouda**  
**CHEKNAR Nour el Houda**

**DOMAINE : Sciences et Technologies**

**FILIERE : Électronique**

**OPTION : Électronique des systèmes embarqués**

### **Thème**

**Etude et simulation des commandes MPPT d'un système photovoltaïque sous variation d'éclairement solaire**

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
HADJAISSA Boubakeur	M.C.A	Président
ABOUCHABANA Nabil	M.A.A	Examineur
ROUGAB Ilyes	M.A.A	Encadrant

**Promotion :2020/2021**

# Remerciement

*Avant tout, nous remercions*

*Dieu le tout puissant de nous avoir donné courage, patience et force durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Nous tenons à exprimer notre remerciement et notre gratitude à notre encadreur : Mr. ILYES ROUGAB pour la confiance qu'il nous a prodigué pour la direction de ce travail, sans cesser de nous encourager et de nous pousser vers les horizons de recherche scientifique.*

*Nos remerciements au département d'électronique de l'université de Laghouat et à tous les enseignants qui nous enseignés durant les années du cursus.*

*Nos remerciements sont également adressés aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.*

*Enfin nous remercions aussi nos familles et les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail.*

## DÉDICACE

- ♥ *À l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail que je dédie :*
- ♥ *À deux êtres qui me sont très chers dans cette vie, à Savoir mon père **Omar** et ma mère **Zenab***
- ♥ *Je leur dis merci **Papa** du fond de mon cœur pour ton éducation, ton sacrifice, ton assistance et pour ce que tu m'as fait et qui m'a permis cette réussite et ce bonheur.*
- ♥ *Je te dis merci et mille fois merci **Mama** pour ta patience, ton courage et ton sacrifice pour moi.*
- ♥ *Cher frère : **Achraf**,*
- ♥ *Chères sœurs : **Kheira et Fatna et Khadidja***  
*À toute ma famille*
- ♥ ***DERBALI** et **Hafri***
- ♥ *À mes chers amis.*



*Et À tous mes amis qui j'ai connus dans : Tout les Année universitaire*

**DERBALI MESSAOUDA**

# DÉDICACE

*Louange à dieu seul*

*Ce modeste travail est dédié spécialement à ma chère maman, ma raison de vivre, en témoignage de ma reconnaissance pour sa patience, son amour et ses sacrifices.*

*A mon cher papa pour son amour et son dévouement*

*\*\* A vous, mes parents, je dis merci d'avoir fait de moi celui que je suis aujourd'hui.*

*Aucune dédicace ne pourra exprimer mes respects, mes considérations et ma grande admiration pour vous, puisse ce travail vous témoigner mon affection et mon profonde amour\*\**

*A ma chère sœur Haná, et mes chers frères Khaled et Mohamed et Farouk*

*A mon mari qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que les self-made men et les déterminés finiront toujours par réussir leur vie, à moi-même.*

*A mes nouveaux famille papa maman, Aicha, Soumia, Abire, Mohamed, Karim.*

*A ma grand-mère et toutes mes tantes, et à toute ma famille et mes proches*

*A tous mes amis et collègues de cette promotion, mes enseignants et pour ceux qui m'ont donné de l'aide un jour, que Dieu vous paye pour tous vos bienfaits.*

*Pour finir, à tous ceux que j'aime et qui m'aiment, je dédie ce mémoire.*

**CHEKNAR NOUREL HOUDA**

## ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو تحليل وتقييم ثلاث تقنيات لتتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) في ظل ظروف جوية قياسية مختلفة. في البحوث السابقة، تم اقتراح عدة طرق مختلفة لتتبع نقطة الطاقة القصوى ودراستها من قبل الباحثين، بما في ذلك طريقة الاضطراب و الملاحظة (P&O)، التصريف المتزايد (IC)، طريقة التتبع على أساس المنطق الضبابي، طريقة التتبع على أساس الشبكات العصبية، إلخ. العيب الرئيسي الذي لوحظ هو فعالية هذه التقنيات في مواجهة التغيرات المفاجئة في ظروف الأرصاد الجوية مثل الإضاءة ودرجة الحرارة. عيب آخر لبعض تقنيات تتبع نقطة الطاقة القصوى هو وقت الاستجابة وهو أمر مهم لتحقيق قيمة الطاقة المثلى. لذلك، يصبح التحسين بالطريقة القائمة على المنطق الضبابي هو هدف عملنا، لمناخ نقطة القوة القصوى في النظام الكهروضوئي في ظل ظروف جوية مختلفة. أظهرت الدراسة المقارنة القائمة على المحاكاة أن تقنية التتبع على أساس المنطق الضبابي أدت إلى أداء أفضل.

**الكلمات المفتاحية:** النمذجة، نظام كهروضوئي، محول مستمر-مستمر، تقنيات تتبع نقطة الطاقة القصوى، منطق غامض

## *Résumé*

Le but de ce mémoire est d'analyser et d'évaluer trois techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans des conditions atmosphériques standard et diverses. Dans la littérature, différentes méthodes MPPT sont proposées et étudiées par les chercheurs, citons les très connues Perturbation & Observation (P&O), la conductance incrémentale (IC), le MPPT basé sur la logique floue, le MPPT basé sur les réseaux de neurones, etc. L'inconvénient majeur constaté est l'efficacité de ces techniques face aux variations brutales des conditions météorologiques telles que l'éclairement et la température. Un autre inconvénient de certaines techniques MPPT est le temps de réponse qui est important pour atteindre la valeur de puissance optimale. En ce sens, l'optimisation par la méthode basée sur la logique floue devient l'objectif de notre travail, pour suivre le point de puissance maximale dans un système photovoltaïque sous différentes conditions météorologiques. L'étude comparative basée sur la simulation a montré que la technique MPPT basée sur la logique floue conduisait à de meilleures performances.

**Mots-clés :** Modélisation, Système PV, convertisseur DC/DC, MPPT, P&O, logique floue.

## ***Abstract***

The aim of this memory is to analyze and evaluate three different forms of Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques under standard and various atmospheric conditions. In the literature, different MPPT methods are proposed and studied by researchers, let us quote the well-known Perturb & Observe (P&O), the incremental conductance (IC), fuzzy logic based MPPT, neural networks based MPPT, etc. The major drawback found is the effectiveness of these techniques under sudden variations in weather conditions such as irradiance and temperature. Another drawback of some MPPT techniques is the response time which is important to achieve the optimum power value. In this sense, optimization by the fuzzy logic based MPPT method becomes the objective of our work, to track the point of maximum power in a photovoltaic system under different weather conditions. The simulation based comparative study showed that the fuzzy logic based MPPT technique led to better performance.

***Keywords:*** Modeling, PV system, DC/DC converter, MPPT, P&O, fuzzy logic.

# Liste des figures

## Chapitre I

**Figure I.1** : Schéma d'un système photovoltaïque

**Figure I.2** : Schéma d'un chauffe-eau solaire

**Figure I.3** : Système de conversion d'énergie éolienne

**Figure I.4** : Répartition de la production d'électricité mondiale en 2019

**Figure I.5** : Répartition de la production d'électricité mondiale en 2019

## Chapitre II

**Figure II.1** : L'effet photovoltaïque

**Figure II.2** : Modèle électrique de la cellule photovoltaïque

**Figure II.3** : Caractéristiques électriques d'un panneau PV

**Figure II.4** : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension

**Figure II.5** : Influence de la température sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension

**Figure II.6** : Technologies des cellules PV : (a) Monocristalline ; (b) Polycristalline ; (c) amorphe

**Figure II.7** : Cellule, module, panneau et champ PV

**Figure II.8** : Association des cellules PV identiques en série et sa caractéristique

**Figure II.9** : Association des cellules PV identiques en parallèle et sa caractéristique

**Figure II.10** : Protection du panneau PV par diode 'by-pass'

**Figure II.11** : Protection du panneau PV par diode 'anti-retour'

**Figure II.12** : Schéma descriptif du système autonome

**Figure II.13** : Schéma descriptif du système hybride

**Figure II.14** : Schéma descriptif du système connecté au réseau

### **Chapitre III**

**Figure III.1** : Schéma fonctionnel du système PV complet

**Figure III.2** : Convertisseur DC/DC de type Boost

**Figure III.3** : Principe de la commande P&O

**Figure III.4** : Organigramme de la commande P&O

**Figure III.5** : Principe de méthode tension du circuit ouvert

**Figure III.6** : Organigramme de la méthode tension du circuit ouvert

**Figure III.7** : Schéma fonctionnel de la commande floue

**Figure III.8** : Fonctions d'appartenance floue utilisées dans le processus de fuzzification

### **Chapitre IV**

**Figure IV.1** : Modèle du système PV sous Simulink

**Figure IV.2** : Modèle du générateur PV sous Simulink

**Figure IV.3** : Modèle du convertisseur DC/DC sous Simulink

**Figure IV.4** : Courbes de tension pour différentes commandes MPPT sous éclairement ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) et température ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )

**Figure IV.5** : Courbes de courant pour différentes commandes MPPT sous éclairement ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) et température ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )

**Figure IV.6** : Courbes de puissance pour différentes commandes MPPT sous éclairement ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) et température ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )

**Figure IV.7** : Profil de l'éclairement solaire

**Figure IV.8** : Courbes de puissance pour différentes commandes MPPT sous un éclairement variable

# *Liste des tableaux*

## *Chapitre III*

*Tableau III.1:* Base de règles de logique floue

## *Chapitre IV*

*Tableau IV.1:* Caractéristiques du panneau PV 'MSX60'

*Tableau IV.2:* Comparaison entre les techniques MPPT

# Sommaire

<u>ملخص</u> .....	i
<u>Résumé</u> .....	ii
<u>Abstract</u> .....	iii
<u>Liste des figures</u> .....	iv
<u>Liste des tableaux</u> .....	v

## Introduction générale

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

I.1. Introduction.....	3
I.2. Principales sources d'énergie.....	3
I.2.1. Energies non renouvelables.....	3
I.2.1.1. Energies fossiles.....	3
I.2.1.2. Energies nucléaires.....	4
I.2.2. Energies renouvelables.....	4
I.2.2.1. L'énergie solaire.....	4
I.2.2.2. L'énergie éolienne.....	5
I.2.2.3. L'énergie géothermique.....	6
I.2.2.4. L'énergie de la biomasse.....	7
I.2.2.5. L'énergie hydraulique.....	7
I.3. Production d'électricité dans le monde.....	7
I.4. Stockage de l'énergie électrique.....	9
I.4.1. Les batteries électrochimiques.....	9
I.4.2. Les inductances supraconductrices.....	9
I.4.3. Les supercondensateurs.....	10
I.4.4. L'hydrogène.....	10
I.5. Avantages et inconvénients des énergies renouvelables.....	10

I.5.1. Les avantages des énergies renouvelables .....	10
I.5.2. Les inconvénients des énergies renouvelables.....	11
I.6. Conclusion .....	11

## **Chapitre II : Présentation du système photovoltaïque**

II.1. Introduction .....	12
II.2. Principe de la conversion photovoltaïque.....	12
II.3. Modélisation de la cellule PV .....	13
II.4. Caractéristiques électriques et paramètres d'une cellule PV .....	14
II.4.1. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension .....	14
II.4.2. Puissance crête d'une cellule PV .....	15
II.4.3. Facteur de forme d'une cellule PV .....	16
II.4.4. Rendement d'une cellule PV .....	16
II.5. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques électriques .....	16
II.5.1. Influence de l'éclairement solaire.....	16
II.5.2. Influence de la température .....	17
II.6. Technologies des cellules solaires PV .....	17
II.6.1. Cellules monocristallines.....	18
II.6.2. Cellules polycristallines.....	18
II.6.3. Cellules amorphes.....	18
II.7. Association des cellules PV .....	19
II.7.1. Notion de cellule, module, panneau et champs PV .....	19
II.7.2. Regroupement de cellule PV .....	19
II.7.2.1. Regroupement en série .....	19
II.7.2.2. Regroupement en parallèle .....	20
II.8. Protection des panneaux PV .....	20
II.8.1. Protection par diode 'by-pass' (en parallèle).....	20
II.8.2. Protection par diode 'anti-retour' (en série) .....	21
II.9. Types des systèmes PV.....	21

II.9.1. Les systèmes autonomes.....	21
II.9.2. Les systèmes hybrides .....	22
II.9.3. Les systèmes connectés au réseau .....	22
II.10. Conclusion .....	23

### **Chapitre III : Convertisseurs DC/DC et commandes MPPT**

III.1. Introduction .....	24
III.2. Description du système photovoltaïque .....	24
III.3. Les convertisseurs statiques DC/DC .....	25
III.3.1. Définition .....	25
III.3.2. Types des convertisseur DC/DC .....	25
III.4. Commandes MPPT .....	26
III.4.1. Définition .....	26
III.4.2. Principe de la commande MPPT .....	26
III.4.3. Classification des commandes MPPT .....	26
III.4.3.1. Méthodes directes.....	26
III.4.3.2. Méthodes indirectes.....	27
III.4.4. Techniques de commandes MPPT .....	27
III.4.4.1. Méthode de perturbation et observation (P&O).....	28
III.4.4.2. Méthode de la tension du circuit ouvert (TCO) .....	29
III.4.4.3. Méthode basée sur la logique floue.....	31
III.5. Conclusion.....	32

### **Chapitre IV : Simulation et discussion des résultats**

IV.1. Introduction.....	33
IV.2. L'outil Matlab/Simulink .....	33
IV.3. Simulation du système photovoltaïque .....	33
IV.4. Résultats obtenus et discussion .....	35
III.5. Conclusion.....	42

## **Conclusion générale**

Conclusion générale .....	43
---------------------------	----

## **Références bibliographiques**

Références bibliographiques .....	45
-----------------------------------	----

# *Introduction générale*

## ***Introduction générale***

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, l'exploitation de toutes ses sources est la question que le futur va poser à l'homme. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique est croissante, une grave pollution menace les organismes vivants et l'environnement, c'est pour cela tous les pays du monde cherchent ou bien ils orientent leurs perspectives aux énergies renouvelables (propre, durable, etc. ...) [1].

La part des énergies renouvelables dans la production d'électricité reste encore faible. En effet 19% d'énergie produite sur la planète est d'origine renouvelable. L'essentiel étant toujours issu des combustibles fossiles, tels que le pétrole ou le charbon 64% et par l'énergie nucléaire 17%. L'utilisation des énergies renouvelables comme alternative écologique aux combustibles fossiles et au nucléaire, s'avère une solution très attrayante du fait qu'elles sont inépuisables, non polluantes, très adaptées à la production décentralisée et les technologies sont actuellement au point pour utiliser ces énergies au quotidien. Leur exploitation pour la production d'électricité est très rentable dans les sites isolés ; là où l'extension du réseau électrique serait un échec financier.

Comme son nom l'indique, une énergie renouvelable est une énergie utilisant des éléments naturels, renouvelés plus rapidement qu'ils sont consommés. A ce propos, il est intéressant de citer des appellations qu'on peut classer parmi des énergies renouvelables et respectueuses de l'environnement telles que : l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et l'énergie solaire. L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique solaire en électricité [2].

L'énergie photovoltaïque a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans dans le domaine spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies ensuite avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker d'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

Les paramètres climatiques tels que la température, la poussière et l'éclairement sont des paramètres extrêmement importants dans le comportement des panneaux solaires. Ils influent énormément sur la caractéristique de la cellule photovoltaïque. La variation de l'éclairement est un paramètre très important et ne peut être négligé dans le comportement des cellules PV. Sachant que sur le total d'énergie incidente, une très faible portion est réfléchiée par la surface du capteur et une petite portion est extraite sous forme d'énergie électrique, en conséquence c'est la grande partie de l'énergie incidente qui devra être dissipée sous forme de chaleur. Ceci conduit à une très grande perte d'énergie et à un faible rendement du générateur photovoltaïque. Pour cela, un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) qui suit en permanence la puissance instantanée maximale est requis. L'importance de la recherche du point de puissance maximale repose sur le faible rendement de conversion énergétique des panneaux photovoltaïques.

Le travail présenté dans ce mémoire, est l'étude de l'effet de variation de l'éclairement solaire sur le rendement du système PV en utilisant des commandes MPPT. De nombreux algorithmes MPPT ont été développés et plusieurs publications peuvent être trouvées dans la littérature présentant des améliorations par rapport aux algorithmes classiques [3,4], ceci est l'objectif de notre mémoire.

Le mémoire comporte quatre chapitres : Dans le premier chapitre, nous avons décrit les généralités sur les énergies renouvelables, ses types et sources, leurs avantages et inconvénients, ainsi que la production énergétique dans le monde.

Le deuxième chapitre est consacré à la description et le fonctionnement du système PV de la cellule au générateur photovoltaïque : principe de la conversion PV, les modèles électrique et mathématique de la cellule PV, effet de la température et l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance -tension ainsi que la protection des modules PV.

Dans le troisième chapitre, nous avons décrit les techniques de commandes MPPT choisies dans ce travail (P&O, TCO et logique floue), ces techniques génèrent le rapport cyclique au convertisseur DC/DC approprié (Buck ou Boost).

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation des différentes commandes MPPT et discussion des résultats obtenus.

En fin, une conclusion générale couronne ce mémoire pour récapituler nos analyses, nos résultats des commandes simulées et une perspective en vue.

*Chapitre I*

*Généralités sur les*

*énergies renouvelables*

## ***1.1. Introduction***

Aujourd'hui, l'électricité est indispensable au développement économique, son importance s'accroît avec les évolutions technologiques, l'industrialisation et le besoin de confort moderne. L'accroissement de sa production est donc synonyme d'augmentation de la qualité de vie et de création de richesse.

Actuellement, la principale source d'énergie utilisée pour produire de l'électricité, est celle issue des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon). Or il s'avère que ces ressources sont présentes en quantités limitées et non renouvelables, et que leurs combustions engendrent des gaz à effet de serre [5,6].

Les sources d'énergies renouvelables présentent l'avantage d'être disponibles en quantité illimitée et d'être non émettrices de gaz à effet de serre excepté lors de la fabrication des systèmes utilisant la source renouvelable. Leurs exploitations sont un moyen de répondre aux besoins en énergie tout en préservant l'environnement. Les principales sources d'énergies renouvelables sont l'hydraulique, le solaire, l'éolien, la biomasse, la géothermique, et l'énergie marine. Nous présenterons dans ce chapitre ces différentes sources d'énergies renouvelables et les parts qu'elles représentent au niveau mondial [7-9].

## ***1.2. Principales sources d'énergie***

Les énergies ont été divisées en deux types selon l'étendue de la possibilité de renouvellement et de continuation de cette énergie : énergies non renouvelables et énergies renouvelables.

### ***1.2.1. Energies non renouvelables***

C'est l'énergie conventionnelle ou l'énergie qui est épuisée et comprend le charbon, le pétrole, le gaz naturel et les produits chimiques, c'est-à-dire une énergie qui ne peut pas être reconstruite ou compensée rapidement [10].

#### ***1.2.1.1. Energies fossiles***

Les énergies fossiles sont tirées principalement du charbon, du pétrole et du gaz naturel. Elles sont appelées fossiles car elles proviennent de la décomposition très lente d'éléments organiques (provenant d'animaux ou de plantes) il y a plusieurs millions d'années.

Leur quantité est limitée sur Terre et leur extraction rapide provoque leur épuisement. Il est plus ou moins facile d'extraire cette énergie, en fonction des conditions géologiques et de l'évolution des techniques. Riches en carbone, elles produisent lors de leur combustion une part importante du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) émis par l'homme, qui est une des causes du réchauffement climatique. Elles sont également sources de pollutions de l'air aux particules (oxydes, suies et métaux).

### **I.2.1.2. Energies nucléaires**

L'utilisation de cette énergie non fossile ne rejette pas de CO<sub>2</sub> ni de polluants. En revanche, elle produit des déchets radioactifs qui nécessitent un confinement du fait de la chaleur et des émissions radioactives qu'ils génèrent, et dont la durée de vie peut être très longue (plusieurs milliers d'années).

Le rendement des centrales est de l'ordre de 33%. Cette valeur relativement faible implique que les rejets de chaleur dans les cours d'eau, ou dans l'atmosphère, sont importants et risquent de causer une pollution thermique égale à deux fois l'énergie produite. Ceci peut générer un réchauffement important des cours d'eau utilisés ce qui a des conséquences néfastes sur la faune et la flore et nécessite l'arrêt de centrale en cas de canicule [10].

## **I.2.2. Energies renouvelables**

Les ressources renouvelables sont variées et inépuisables. Leur conversion en énergie thermique, chimique ou électrique présente peu de dangers humains et écologiques. Elles se présentent sous de nombreuses formes, certaines étant naturellement stockables (comme la biomasse ou les barrages hydroélectriques), d'autres non, en particulier celles qui transforment les énergies renouvelables, intermittentes, aléatoires et non contrôlables : c'est particulièrement les cas des sources éoliennes et photovoltaïques. Or, ce sont précisément celles qui sont les plus prometteuses en termes de potentialité pour le futur.

### **I.2.2.1. L'énergie solaire**

L'énergie solaire est l'énergie qui provient du rayonnement solaire, directement à travers l'atmosphère. On peut distinguer le solaire photovoltaïque et le solaire thermique.

#### **I.2.2.1.1. L'énergie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique renouvelable produite à partir du rayonnement solaire. La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque,

plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution.

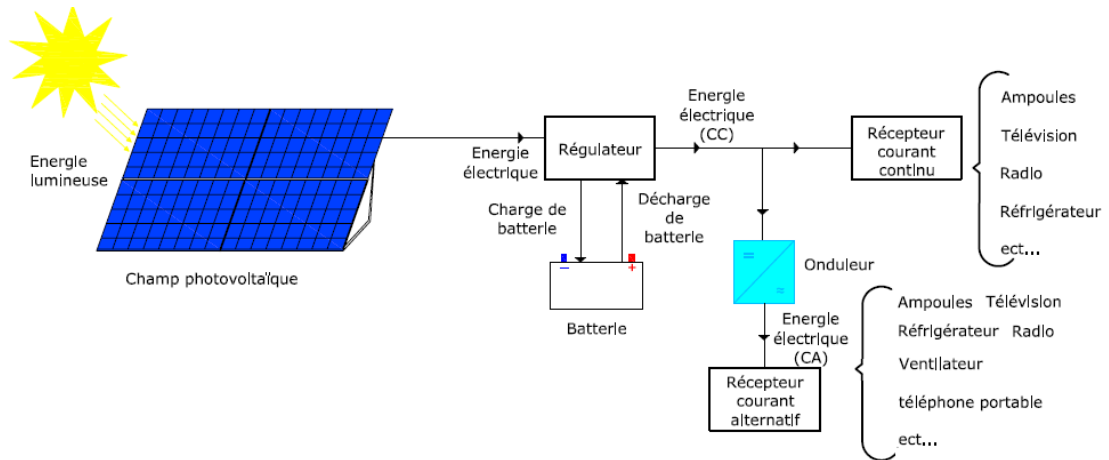


Figure I.1 : Schéma d'un système photovoltaïque

### I.2.2.1.1. L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est la transformation instantanée de l'énergie des rayons solaires en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement, comme par exemple le chauffage de l'eau sanitaire à l'aide des capteurs solaires, ou indirectement dans le cas de la production de l'électricité dans une centrale thermodynamique solaire. L'énergie solaire thermique est basée sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement qui est différente de celle du photovoltaïque où l'électricité est générée par l'énergie des photons.

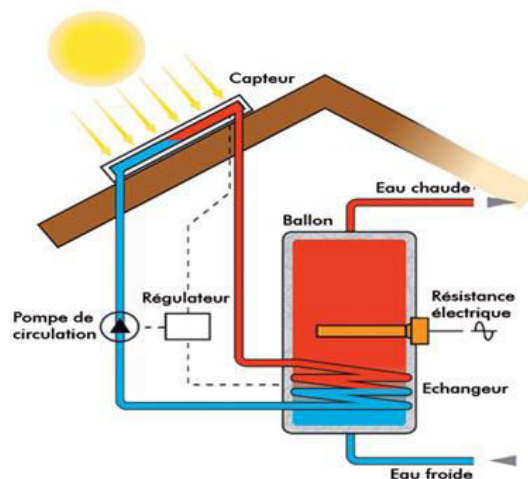


Figure I.2 : Schéma d'un chauffe-eau solaire

### I.2.2.2. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne (l'énergie de vent) est une forme indirecte de l'énergie solaire. L'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent.

On utilise un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne. Son fonctionnement est simple et s'inspire de la technologie des moulins à vent. La machine se compose en général de 3 pales portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent (énergie que possède un corps du fait de son mouvement) en énergie mécanique (mouvement mécanique des pales). Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement.

Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Il faut donc d'abord que l'énergie mécanique des pales passe par un multiplicateur qui a pour rôle d'accélérer le mouvement lent des pales.

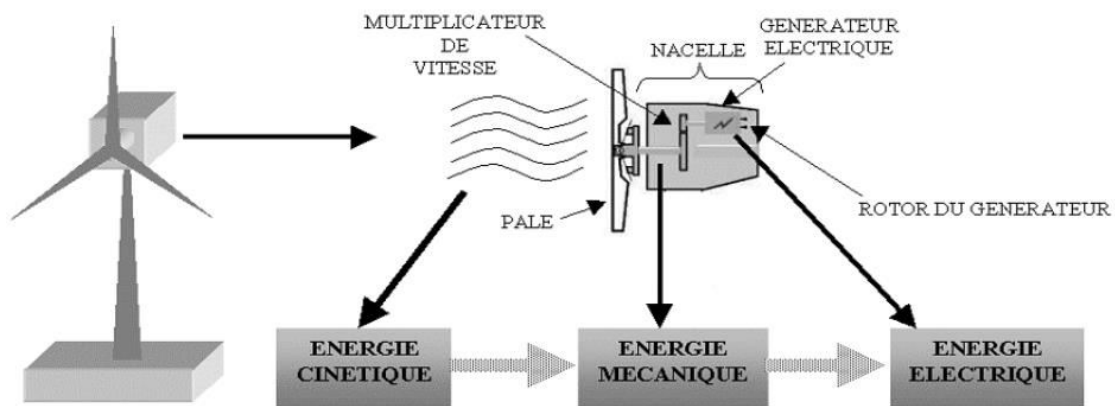


Figure I.3 : Système de conversion d'énergie éolienne

### I.2.2.3. L'énergie géothermique

La géothermie consiste à capter la chaleur contenue dans la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité. Partout, la température croît depuis la surface vers l'intérieur de la terre. Selon les régions l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3°C par 100 m. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de la biomasse. C'est donc une énergie fiable et stable dans le temps.

On distingue trois types de géothermie ; la haute, la basse et la très basse énergie.

- La géothermie à haute énergie : La température élevée du gisement (entre 80 °C et 300 °C) permettant la production d'électricité.
- La géothermie à basse énergie : Les températures comprises entre 30 °C et 100 °C Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur.
- La géothermie à très basse énergie : La température est comprise entre 10 °C et 30 °C. Cette technologie est appliquée au chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique.

#### **I.2.2.4. L'énergie de la biomasse**

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale pour la transformation de ces résidus en énergie (chaleur, gaz, carbone).

Grâce à la valorisation de la biomasse, on peut obtenir de l'électricité, de la chaleur et des carburants propres appelés, biocombustibles ou biocarburants liquides ou gazeux, tels que le biogaz, le bioéthanol et le biodiesel. Ces carburants sont utilisés soit purs, ou en mélange avec des carburants d'origine fossile.

La biomasse est donc une source d'énergie renouvelable que si sa régénération équivaut à sa consommation.

#### **I.2.2.5. L'énergie hydraulique**

L'énergie hydraulique est l'énergie produite par le mouvement de l'eau, cette énergie est qualifiée de cinétique. Parmi les énergies hydrauliques les plus communes, on trouve naturellement l'hydroélectricité qui permet de fournir du courant à partir d'un barrage.

Un barrage provoque une retenue (aussi appelée lac artificiel) à partir de laquelle l'eau est canalisée vers le pied du barrage grâce à des conduites forcées. Le puissant courant ainsi créé actionne une turbine qui entraîne, à son tour, un alternateur grâce auquel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

### I.3. Production d'électricité dans le monde

La production d'électricité renouvelable a atteint 7200 TWh en 2019, soit 19.1% de la production mondiale. Cette part reste supérieure à la production d'électricité d'origine nucléaire (13,5% en 2019), mais largement inférieure à l'électricité produite à partir des combustibles fossiles (67,2%). Les 0,2 % restants sont apportés par la combustion des déchets qualifiés de non renouvelable. La figure (I.4) montre la répartition de la production d'électricité mondiale en 2019 [11].

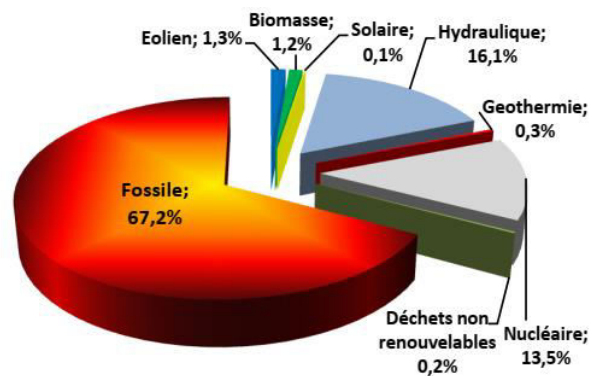


Figure I.4 : Répartition de la production d'électricité mondiale en 2019 [11]

Comme mentionner précédemment, l'électricité renouvelable provient de six sources distinctes. L'hydroélectricité est la principale d'entre elles avec 84,3% du total renouvelable. L'énergie éolienne est devenue en 2019 la seconde source d'énergie renouvelable pour la production d'électricité (7% du total). Elle devance aujourd'hui la filière biomasse, qui rassemble la biomasse solide, la biomasse liquide, le biogaz et les déchets ménagers renouvelables (6,3%). Suivent la géothermie (1,7%), le solaire (0,6%) qui rassemble les centrales photovoltaïques et les centrales solaires thermiques (hélio-thermodynamiques), et les énergies marines (0,01%). La répartition de la production d'électricité mondiale, d'origine renouvelable, en 2019, est présentée sur la figure (I.5) [11].

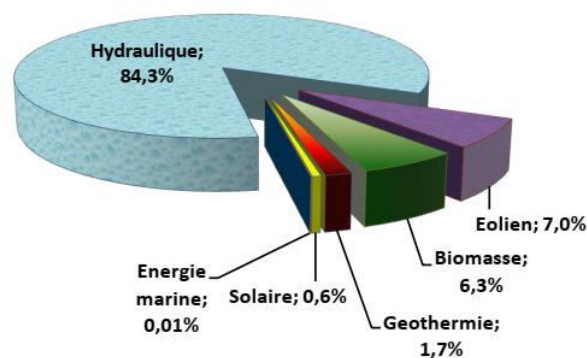


Figure I.5 : Répartition de la production d'électricité mondiale en 2019 [11]

Malgré sa forte contribution dans la production d'électricité mondiale, d'origine renouvelable, la filière hydraulique croît lentement sur la période 1999-2019 (+ 2,1% par an en moyenne), cache le dynamisme des autres filières renouvelables. Sans l'hydraulique, la croissance de la production d'électricité renouvelable serait de 11,6 % par an en moyenne depuis 1999. Donc : la part des filières renouvelables sans l'hydraulique a plus que doublé dans la production mondiale d'électricité, passant de 1,4 % du total en 1999 à 3 % du total en 2019. La stagnation de la part de l'électricité renouvelable sur l'ensemble de la période s'explique par une baisse de 1,6 point de la part de l'hydraulique (17,7 % en 1999 contre 16,1 % en 2019).

#### ***I.4. Stockage de l'énergie électrique***

Les différentes technologies de stockage qui peuvent être employées pour des systèmes à petites et moyennes échelles ainsi que leurs principes sont [12-14] :

##### **I.4.1. Les batteries électrochimiques**

Les batteries (ou accumulateurs électrochimiques) sont des générateurs "réversibles" c'est-à-dire pouvant stocker l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation.

Les principales technologies de batterie existantes sont les accumulateurs plomb acide, nickel-cadmium et ion-lithium. Les accumulateurs (selon le type), ont des constantes de temps allant de la dizaine de minutes à la dizaine d'heures, et leurs capacités peuvent atteindre quelques MWh.

Une batterie au plomb est constituée d'un ensemble d'éléments de 2 V connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. La valeur usuelle de la tension d'une batterie de démarrage est de 12 V, soient six éléments intégrés dans un même bac, mais dans les systèmes de télécommunication la tension de batterie peut-être de 24 ou 48 V. Le standard qui s'est imposé dans le photovoltaïque pour applications en sites isolés est de 24 V.

##### **I.4.2. Les inductances supraconductrices**

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créée par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Pour maintenir la bobine dans l'état supraconducteur, il faut l'introduire dans un cryostat rempli d'hélium liquide. Ces systèmes ont l'avantage d'avoir une dynamique et un cyclage très élevé. Cependant, les coûts de fabrication et de maintenance sont très élevés et il y en a très peu d'inductances supraconductrices en

fonctionnement. Même si les recherches envisagent des inductances supraconductrices de l'ordre de 10 à 100 MW, les systèmes disponibles actuellement sont compris entre 1 et 10 MW [12].

### **I.4.3. Les supercondensateurs**

C'est la seule technologie dont on peut parler vraiment du stockage d'électricité. Cependant, c'est une technique bien nouvelle qui se trouve encore en phase de recherche et de développement. A présent on trouve, fréquemment des supercondensateurs dans les produits électroménagers, mais leurs puissances ne dépassent pas les quelques Watts. Les recherches actuelles ont pour but l'obtention de supercondensateurs dont la puissance soit de l'ordre de dizaines ou même de centaines de Kilowatts, afin d'être utilisés dans des véhicules électriques [13,14].

### **I.4.4. L'hydrogène**

Les principaux modes de stockage de l'hydrogène sont le stockage dans des réservoirs sous forme comprimée (gazeuse) ou liquide, le stockage sur des composés solides (adsorption) et le stockage dans les hydrures (absorption). Le stockage sous forme comprimée est l'un des plus utilisés actuellement, la pression varie entre 200-350 et 700 bars pour les pressions de stockage les plus élevées.

L'hydrogène peut être stocké dans des bouteilles de 10 litres jusqu'à des réservoirs de 10000 m<sup>3</sup>. Les bouteilles commercialisées actuellement (50 litres) permettent un stockage jusqu'à 350 bars. Il existe des réservoirs ronds ou cylindriques. Le réservoir est fait d'alliages métalliques très résistants à la corrosion. Pour réduire d'avantage le poids, on tente d'introduire des polymères et des fibres de carbone dans la structure. L'inconvénient principal dont souffre cette technique est sa faible densité volumétrique [15].

## ***I.5. Avantages et inconvénients des énergies renouvelables***

### **I.5.1. Les avantages des énergies renouvelables**

Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux, car ces dernières sont en général propres, sûres et surtout, elles existent en quantité illimitée parmi lesquelles on peut citer :

- La sûreté est l'un des avantages principaux, car il existe de très faibles risques d'accident ;
- Elles génèrent également peu de déchets, et ces déchets sont parfois recyclables ;

- La décentralisation des énergies renouvelables est aussi un facteur positif très important pour développer certains territoires et le développement local ;
- Ces énergies renouvelables permettent de réduire considérablement l'émission de CO<sub>2</sub> ;
- L'énergie nucléaire ne participe pas à l'effet de serre, mais les craintes que représente cette énergie sont beaucoup plus graves comme les risques d'explosion ou d'accident, la prolifération des armes nucléaires et le sort des déchets nucléaires [16].

### **I.5.2. Les inconvénients des énergies renouvelables**

- Leur disponibilité dépend du climat. Pour celles fonctionnant au solaire, il n'est possible d'utiliser que 50 % de leur capacité réelle dans les zones équatoriales et encore moins à cause de la disparition du soleil pendant plusieurs mois dans les pôles. En outre, quand le ciel est nuageux, le rayonnement solaire est moindre. Lors de périodes anticycloniques, il n'y a pas de vent. Cette énergie n'est pas très stable ;
- La responsabilité sur le réchauffement climatique des énergies renouvelables est un inconvénient majeur. Elles sont souvent présentées et admises pour justement résoudre ce problème, mais pour que ce soit réel, il faudrait diminuer considérablement la consommation des énergies fossiles comme le pétrole, le charbon ou le gaz et mieux maîtriser l'énergie renouvelable pour l'économiser davantage ;
- L'impact visuel sur le paysage est à prendre en compte surtout lors de constructions de grandes centrales solaires ou de champs d'éoliennes. Ces productions décentralisées aideraient à diminuer le nombre de lignes à haute tension. Elles restent donc une pollution pour la faune. De plus, les expériences menées déjà dans certains pays montrent qu'elles aident à l'accroissement de ces mêmes lignes ;
- Les problèmes majeurs pour la faune sont les barrages hydroélectriques, car ils inondent des vallées entières et ont un fort impact négatif sur l'écosystème. Les poissons migrent difficilement vers leurs lieux de reproduction, même si des passes à poissons ont été construites. Les éoliennes sont un danger pour les oiseaux et les chauves-souris.

### **I.6. Conclusion**

La production d'électricité mondiale est principalement issue des combustibles fossiles. Ces ressources sont limitées, non renouvelables, et leurs combustions engendrent des gaz à effet de serre. Pour lutter contre le réchauffement climatique, la production d'électricité via les énergies renouvelables est en constante augmentation. Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types des énergies renouvelables, leurs stockages ainsi que leurs avantages et

inconvenients, dans le chapitre suivant nous allons présenter le type le plus fameux des énergies renouvelables : l'énergie solaire photovoltaïque.

*Chapitre II*

*Présentation du*

*système photovoltaïque*

## II.1. Introduction

Le système PV comprend tous les composants nécessaires pour convertir l'énergie du soleil en énergie électrique afin de pouvoir l'utiliser par les divers consommateurs. Les principaux composants d'un système PV sont le générateur PV, les régulateurs, les convertisseurs statiques (hacheurs, onduleurs) et les batteries. Ce chapitre est consacré à l'étude et l'analyse du système photovoltaïque du cellule PV au générateur, ces caractéristiques de courant et de puissance, les méthodes possibles pour le groupement des cellules ainsi que leurs protections.

## II.2. Principe de la conversion photovoltaïque

La cellule solaire photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie du rayonnement solaire et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple au silicium de jonction PN avec un rendement qui arrive jusqu'à environ 20%. Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type *N* et dopée de type *P* (Figure II.1). Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la Structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%), la face arrière peut être entièrement métallisée [15].

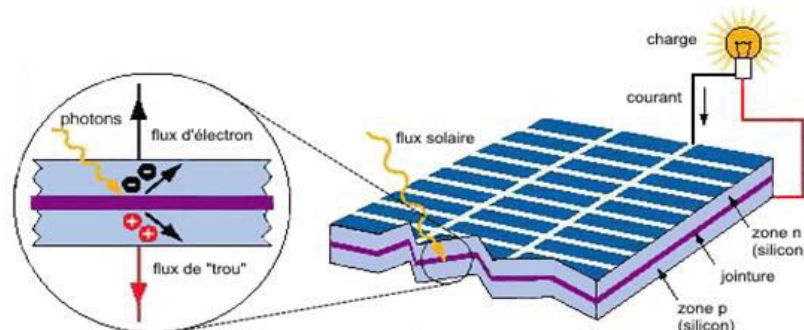


Figure II.1 : L'effet photovoltaïque [15]

### II.3. Modélisation de la cellule PV

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances : série  $R_s$  et shunt  $R_{sh}$  comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure suivante :

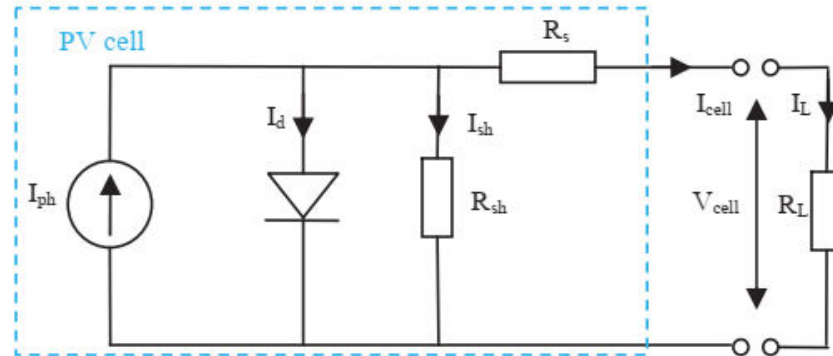


Figure II.2 : Modèle électrique de la cellule photovoltaïque [3]

Les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  représentent respectivement les résistances des contacts métalliques et de fuites de la jonction PN. En générale, la résistance  $R_{sh}$  est très élevée et la résistance  $R_s$  est très faible.

Le courant photopile a pour expression :  $I = I_{ph} - I_d - I_{sh}$

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_d}{kT}\right) - 1 \right] - \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (\text{II.1})$$

Le courant  $I_{ph}$  est en fonction de l'éclairement  $E$  comme suit :  $I_{ph} = I_{cc} \left( \frac{E}{1000} \right)$

En utilisant la loi des mailles, la tension de la diode est :  $V_d = V + R_s I$

Donc, le courant  $I$  en fonction de la tension  $V$  s'écrit sous la forme implicite suivant :

$$I = I_{cc} \left( \frac{E}{1000} \right) - I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\eta kT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.2})$$

Où :

$E$  : l'éclairement solaire ( $\text{W/m}^2$ ).

$I_s$  : courant de saturation inverse de la diode.

$q$  : charge d'électron:  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb

$k$ : constante de Boltzmann :  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K

$\eta$ : le facteur d'idéalité du diode, généralement entre 1 and 2.

$kT/q \approx 25$  mV à  $T = 300$  K.

$I_{cc}$ : courant de court circuit.

$V_{co}$ : tension du circuit ouvert.

En général, le courant de sortie d'un panneau PV contient  $N_s$  cellules connectées en série et  $N_p$  chaînes connectées en parallèle est fourni par l'un des équations suivantes [17-19] :

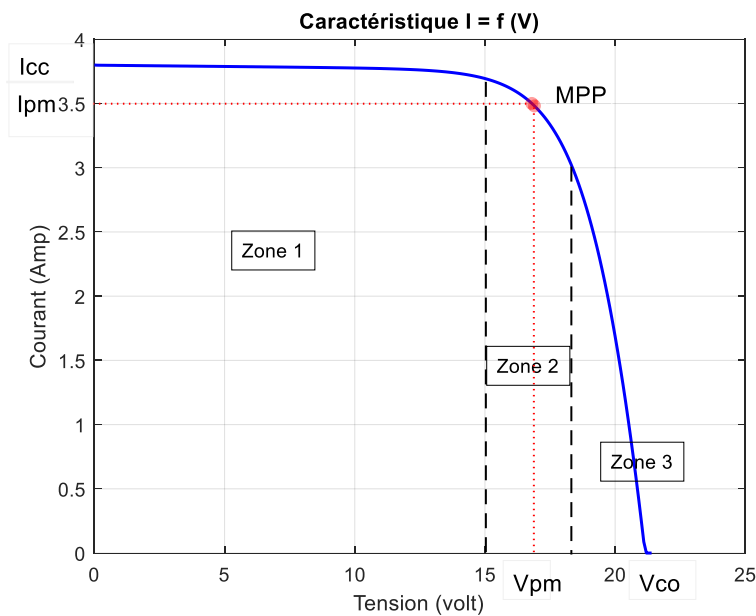
$$I = N_p \cdot I_{cc} \left( \frac{E}{1000} \right) - N_p \cdot I_s \left[ \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p} \right)}{\eta k T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{\frac{N_p}{N_s} V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.3})$$

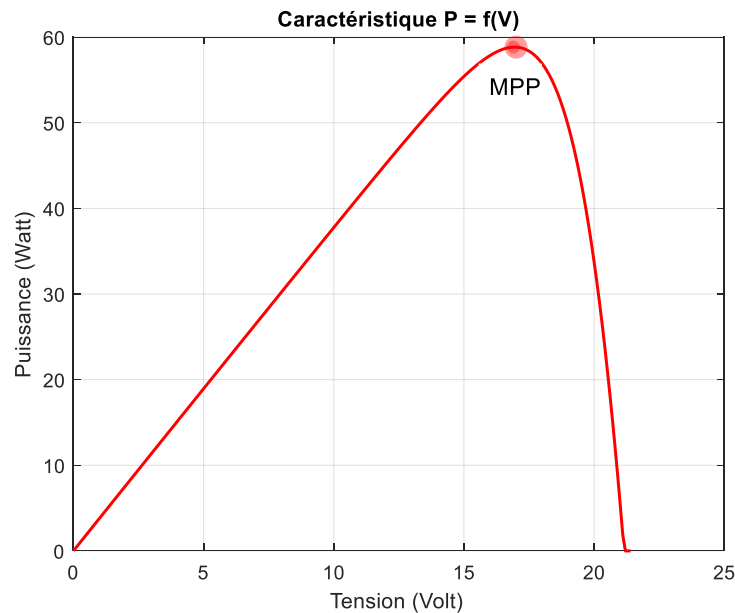
$$I = N_p \cdot I_{cc} \left( \frac{E}{1000} \right) - N_p \cdot I_s \left[ \exp \left( \frac{q (N_p V + N_s R_s I)}{N_p N_s \eta k T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{N_p V + N_s R_s I}{N_s R_{sh}} \right) \quad (\text{II.4})$$

## II.4. Caractéristiques électriques et paramètres d'une cellule PV

### II.4.1. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension

En utilisant l'équation implicite du courant délivré par la cellule photovoltaïque, on peut tracer ses caractéristiques électriques : courant-tension et puissance-tension. Les caractéristiques  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  sont représentées sur la figure suivante :





**Figure II.3 :** Caractéristiques électriques d'un panneau PV

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque, pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe  $I = f(V)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. On distingue trois zones essentielles [20] :

- Fonctionnement comme générateur de courant : le point de fonctionnement appartient à la zone (1). Le courant est proche du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la tension est faible.
- Fonctionnement comme générateur de tension : le point de fonctionnement appartient à la zone (3). La tension est proche de la tension à vide  $V_{co}$  et le courant est faible.
- Fonctionnement optimal : quand le point de fonctionnement appartient à la zone (2), l'utilisation est meilleure ; la puissance absorbée est maximisée.

La puissance débitée par la cellule dépend du point de fonctionnement de cette dernière, c'est le produit de l'intensité du courant débité et la tension entre ses bornes.

#### II.4.2. Puissance crête d'une cellule PV

La puissance crête d'une photopile, notée  $W_c$  (Watt crête), représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1.5, une température de 25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>.

En d'autres termes, 1  $W_c$  délivre une puissance électrique de 1 W quand il est soumis à un éclairement solaire de 1000 W/m<sup>2</sup>.

### II.4.3. Facteur de forme d'une cellule PV

C'est le rapport entre la puissance crête et le produit  $I_{CC} \cdot V_{CO}$ , ce rapport traduit la forme rectangulaire de la caractéristique  $I = f(V)$ .

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC} \cdot V_{CO}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{CC} \cdot V_{CO}} \quad (\text{II.5})$$

Les valeurs typiques de facteur de forme vont environ de 60% à 80%.

### II.4.4. Rendement d'une cellule PV

On définit le rendement énergétique d'une cellule PV par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente :

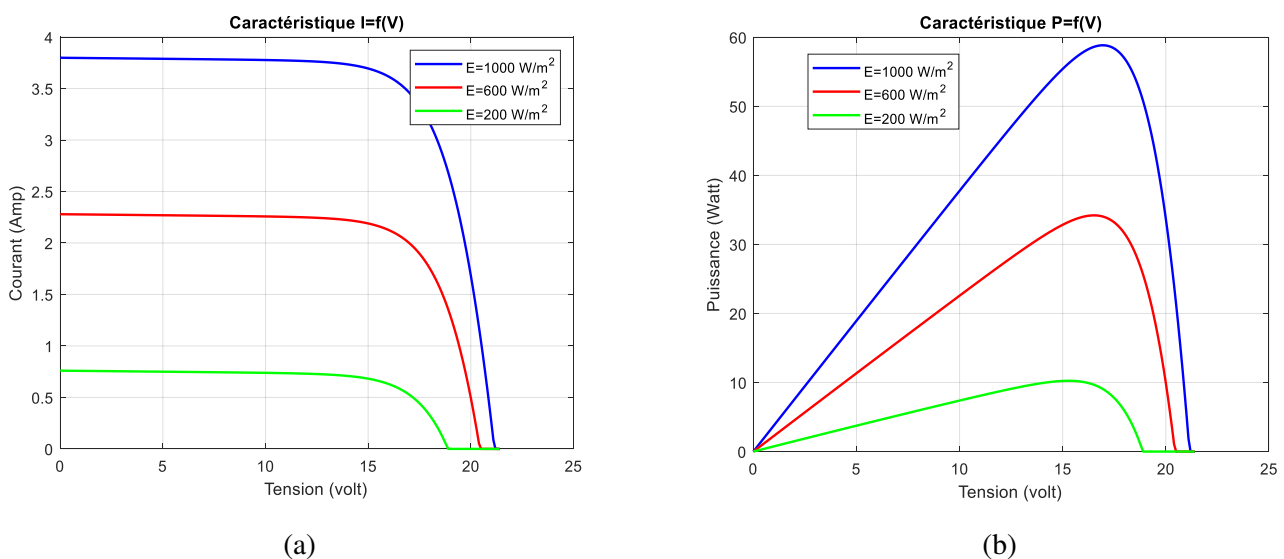
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_m \cdot V_m}{E \cdot S} \quad (\text{II.6})$$

$S$  : surface active des panneaux ( $m^2$ )

## II.5. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques électriques

### II.5.1. Influence de l'éclairement solaire

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure suivante présente la variation des caractéristiques d'un panneau PV à différents niveaux d'éclairement :

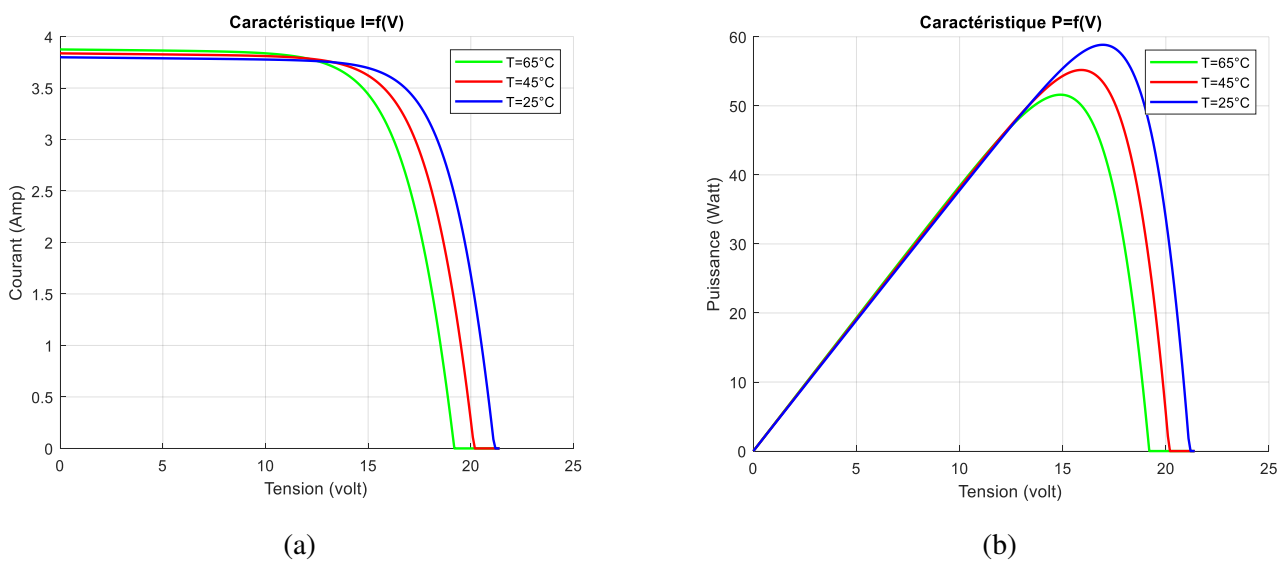


**Figure II.4 :** Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension

On remarque que le courant est directement proportionnel à l'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque la lumière baisse ; mais ne dépend pas de la surface, elle n'est fonction que du matériau. La puissance optimale du module est proportionnelle à l'éclairement et par conséquent, lorsque l'irradiation (l'éclairement) baisse, le facteur de forme augmente et la courbe devient carrée.

### II.5.2. Influence de la température

La température est aussi un paramètre important qui influe directement sur l'énergie électrique produite par les panneaux PV. La figure suivante représente le comportement d'un panneau PV sous un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et à des températures entre 25 et 65 °C :



**Figure II.5 :** Influence de la température sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension

D'après la figure (II.5), l'augmentation de la température entraîne d'une part, une légère augmentation du photo-courant, et d'autre part une diminution de la tension du circuit ouvert, en raison principalement de la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Par conséquent, cette augmentation de température entraînerait une diminution de la puissance maximale disponible et de la tension (0.06 % par °C), une augmentation du courant (0.4 % par °C) et une diminution du rendement et de facteur de forme  $FF$ .

### II.6. Technologies des cellules solaires PV

Le matériau le plus répandu dans les photopiles ou cellules solaires est le silicium. Il est dit tétravalent, cela signifie qu'un atome de silicium peut se lier avec quatre autres atomes de même nature. Il existe plusieurs types de cellules solaires [15] :

### II.6.1. Cellules monocristallines

- Première génération de photopiles.
- Forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo-carrées, de surface bleu-gris uniforme.
- Rendement excellent de 16 % et jusqu'à 21 %.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.

### II.6.2. Cellules polycristallines

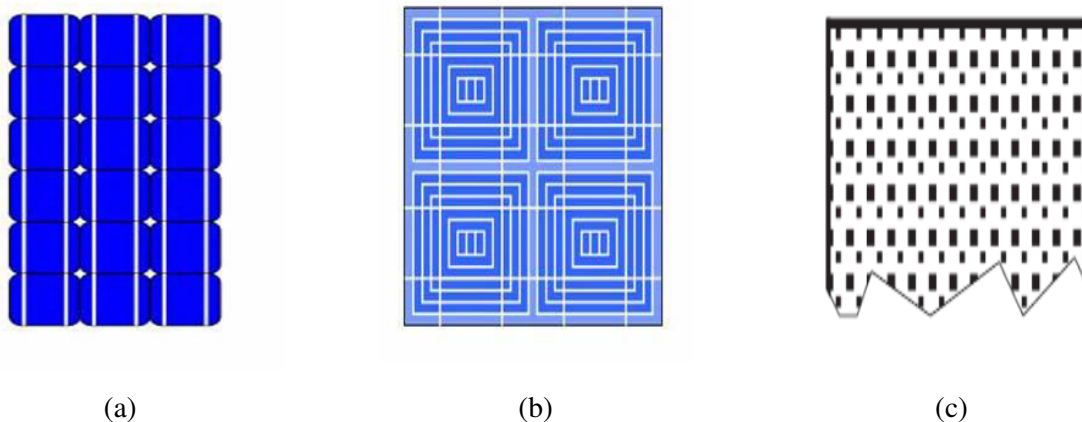
Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en plusieurs cristaux dont les orientations sont différentes.

- Rendement de 11 % et jusqu'à 15 %.
- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.

### II.6.3. Cellules amorphes

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Elles ont une surface uniformément sombre.

- Rendement de seulement 6 à 8% par module.
- Coût de production bien plus bas.
- Appliquées dans les petits produits de consommation : montres, calculatrices, mais peu utilisées dans le cadre des installations solaires.
- Mieux réagir à la lumière diffuse et donc, elles sont plus performantes à une température élevée.



**Figure II.6 :** Technologies des cellules PV : (a) Monocristalline ; (b) Polycristalline ; (c) amorphe

## II.7. Association des cellules PV

### II.7.1. Notion de cellule, module, panneau et champs PV

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base, un ensemble de cellules forment un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système solaire auquel viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie) des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur ...

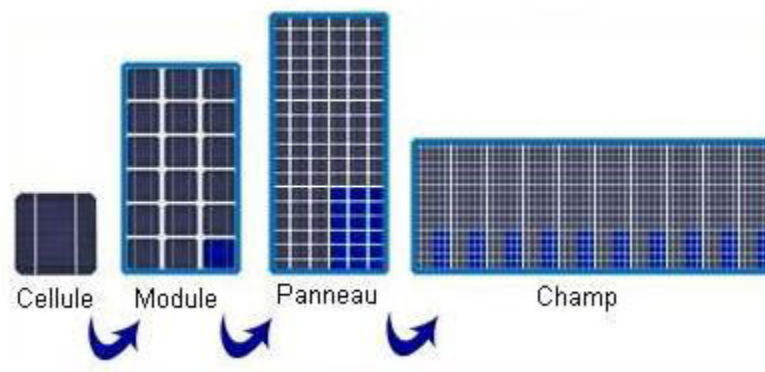


Figure II.7 : Cellule, module, panneau et champ PV [2]

### II.7.2. Regroupement de cellule PV

#### II.7.2.1. Regroupement en série

En mettant  $N_s$  cellules PV identiques en série, le pôle positif (+) de chaque cellule est relié au pôle négatif (-) de la cellule suivante, le courant de la branche reste le même et la tension de cette branche est  $N_s$  fois plus grande que celle d'une cellule PV.

$$\begin{cases} I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_{N_s} \\ V = V_1 + V_2 + V_3 \dots + V_{N_s} = N_s \cdot V_i \end{cases} \quad (II.7)$$

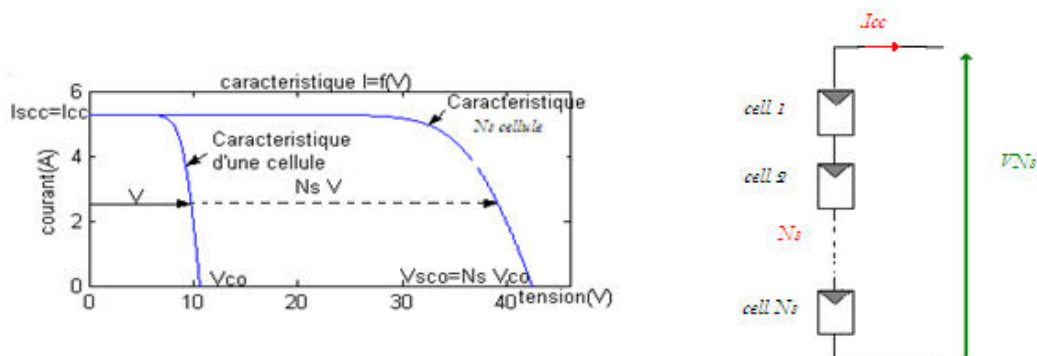


Figure II.8 : Association des cellules PV identiques en série et sa caractéristique [21]

### II.7.2.2. Regroupement en parallèle

En mettant  $N_p$  cellules identiques en parallèle, tous les pôles positifs (+) sont reliés entre eux et tous les pôles négatifs (-) sont reliés entre eux, la tension de la branche reste la même et le courant de cette branche est  $N_p$  fois le courant d'une cellule PV.

$$\begin{cases} I = I_1 + I_2 + I_3 \dots + I_{Np} = N_p I_i \\ V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_{Np} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

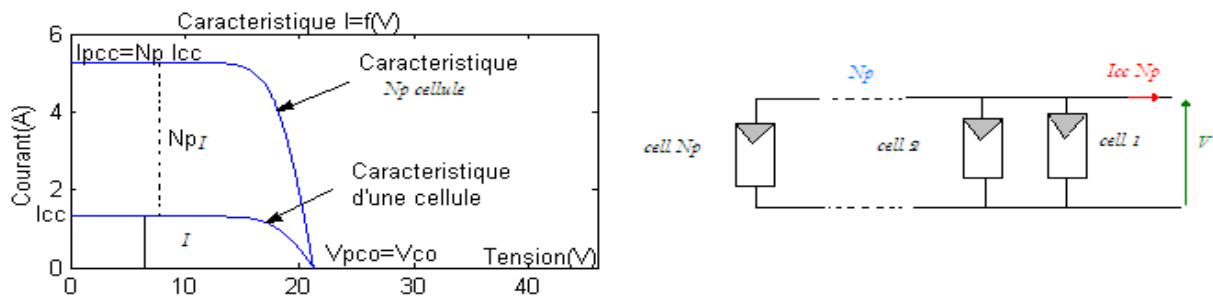


Figure II.9 : Association des cellules PV identiques en parallèle et sa caractéristique [21]

## II.8. Protection des panneaux PV

### II.8.1. Protection par diode 'by-pass' (en parallèle)

Lorsqu'une partie de module est accidentellement couverte, le courant produit par le reste du champs PV continuer à circuler à travers les cellules cachées, toute la tension du module peut chuter via ces diodes. Dans ce cas, ces dernières se comportent en récepteur et risquent l'échauffement et la destruction. Ce phénomène est dit 'hot spot' ou point chaud, pour éviter ce phénomène, on installe en parallèle sur les modules des diodes qui dérive le courant en cas d'obstruction de cellule. La diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante.

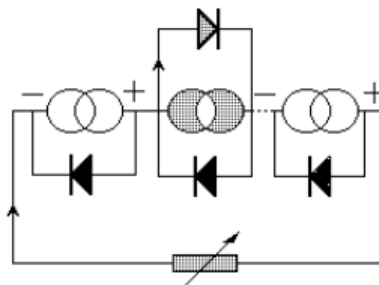


Figure II.10 : Protection du panneau PV par diode 'by-pass'

### II.8.2. Protection par diode ‘anti-retour’ (en série)

Pour la protection des modules en cas d’endommagement, on branche en série des diodes anti-retour. Une cellule PV se comporte comme récepteur lorsqu’elle ne reçoit pas du rayonnement solaire (nuit, ciel nuageux, ...), elle consomme alors du courant comme une simple lampe, donc pour éviter la décharge de la batterie dans le module, on installe des diodes de blocage en série entre la batterie et le module.

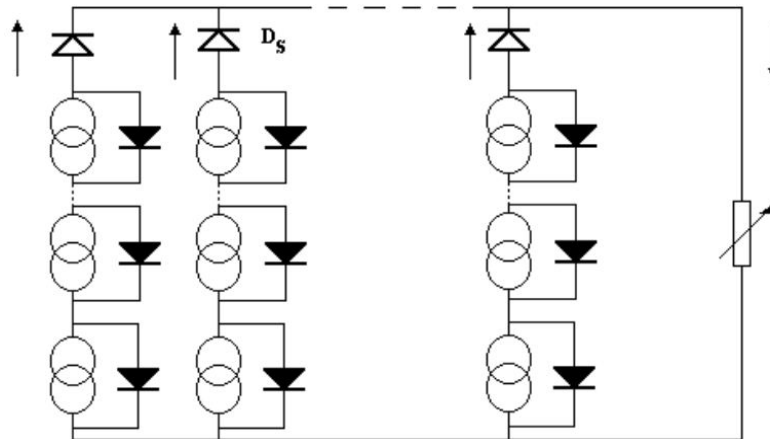


Figure II.11 : Protection du panneau PV par diode ‘anti-retour’

## II.9. Types des systèmes PV

Les genres des systèmes photovoltaïques que l’on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau. Les deux premiers sont indépendants du service public de distribution d’électricité ; on les retrouve souvent dans les régions éloignées [22,23].

### II.9.1. Les systèmes autonomes

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui produit de l’électricité grâce au soleil, mais qui fonctionne indépendamment du réseau électrique, ils peuvent comporter des accumulateurs qui emmagasinent l’énergie produite par les modules au cours de la journée servant la nuit ou lors des périodes où le rayonnement solaire est insuffisant. Ces systèmes peuvent également répondre aux besoins d’une application (par exemple, le pompage de l’eau) sans recours aux accumulateurs. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d’énergie électrique la plus économique.

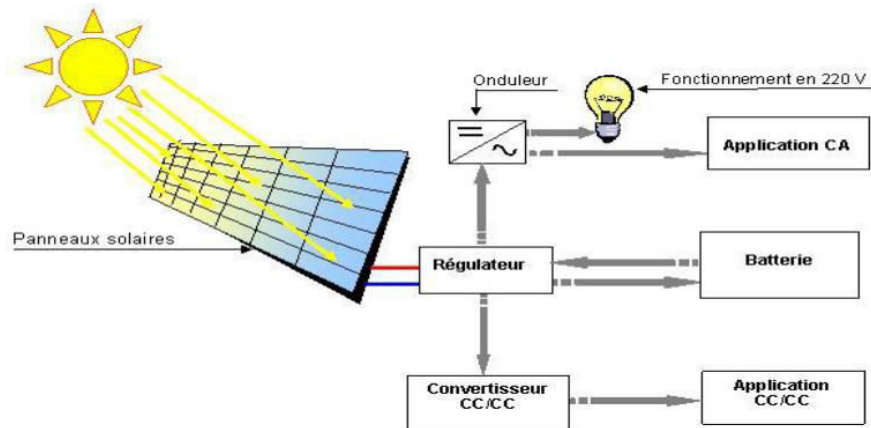


Figure II.12 : Schéma descriptif du système autonome [22]

### II.9.2. Les systèmes hybrides

Les systèmes hybrides, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité, sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une autre source d'énergie comme une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année, ou si on désire diminuer l'investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs.

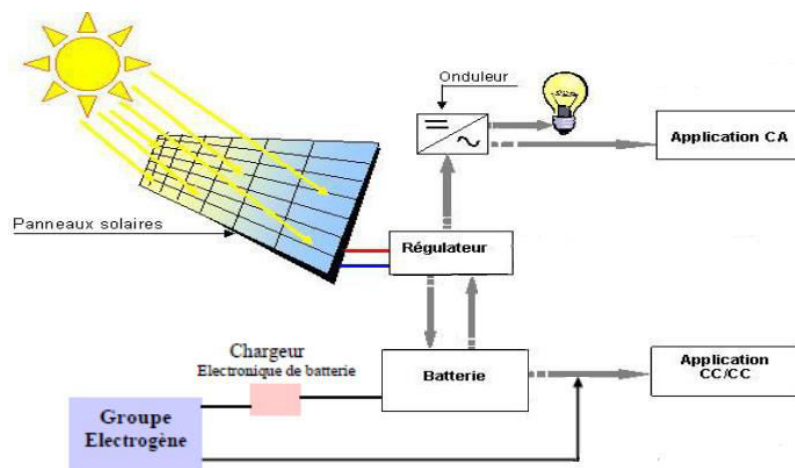
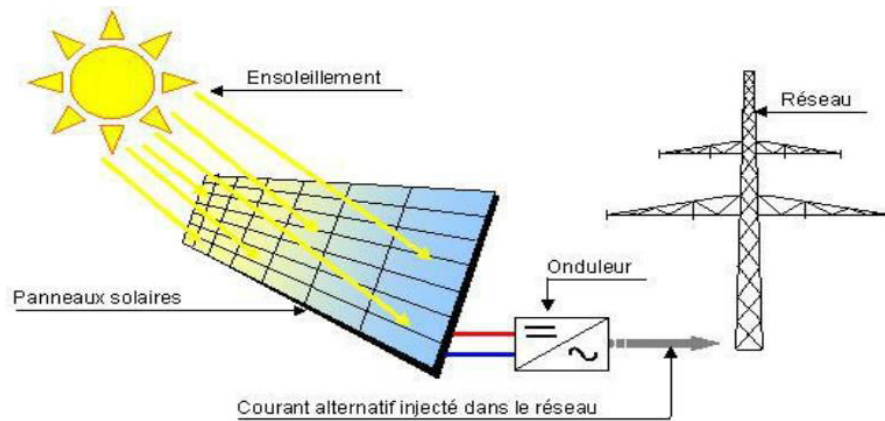


Figure II.13 : Schéma descriptif du système hybride [22]

### II.9.3. Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation sans demander de grandes centrales thermiques ou

hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Un système connecté à un réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin ; ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsqu'il y a une panne de réseau, mais ce n'est pas nécessaire.



**Figure II.14 :** Schéma descriptif du système connecté au réseau [22]

## II.10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque : son architecture de la cellule au champ, le principe de fonctionnement d'une cellule PV, leur modèle mathématique, l'équation implicite courant-tension, les caractéristiques électriques avec l'effet de l'éclairement et la température ainsi que la protection du générateur PV par les diodes 'by-pass' et 'anti retour'.

Dans ce chapitre qui suit, on va présenter les différentes techniques de commande MPPT qui seront simulées puis discutées.

# *Chapitre III*

## *Convertisseurs*

### *DC/DC et commandes*

#### *MPPT*

### III.1. Introduction

Lors du fonctionnement d'un générateur PV, le point de puissance maximale PPM peut être dégradé suite aux variations des conditions météorologiques tel que l'éclairement solaire et la température. L'adaptation entre la source et la charge à lieu en variant le rapport cyclique du convertisseur DC/DC où la recherche de ce point de puissance maximale sera réalisée automatiquement. Ceci est tout à fait possible en adoptant une des approches d'adaptation connue sous le nom des commandes MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Dans la littérature, plusieurs méthodes MPPT sont étudiées et présentées, citons les méthodes à contre réaction de tension et de courant, la méthode P&O, la méthode de l'incrémental conductance, les méthodes de l'intelligence artificielle comme la logique floue et les réseaux de neurones [3, 4, 17-19, 24-26].

Dans ce chapitre, nous allons présenter trois techniques de commande MPPT générant le rapport cyclique  $\alpha$  au convertisseur DC/DC (hacheur), les techniques étudiées sont choisies en raison de leurs efficacités et robustesses contre les variations météorologiques.

### III.2. Description du système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué de quatre blocs comme le montre la figure (III.1). Le premier bloc représente la source d'énergie (Générateur photovoltaïque), le second bloc est un convertisseur statique DC/DC, le troisième bloc représente la charge et le quatrième bloc représente le système de commande. Le convertisseur statique fait l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.), il est utilisé comme unité de traitement de puissance avec des algorithmes MPPT en ajustant le rapport cyclique. Ce rapport est calculé par l'algorithme MPPT et varie entre 0 et 1 [24].

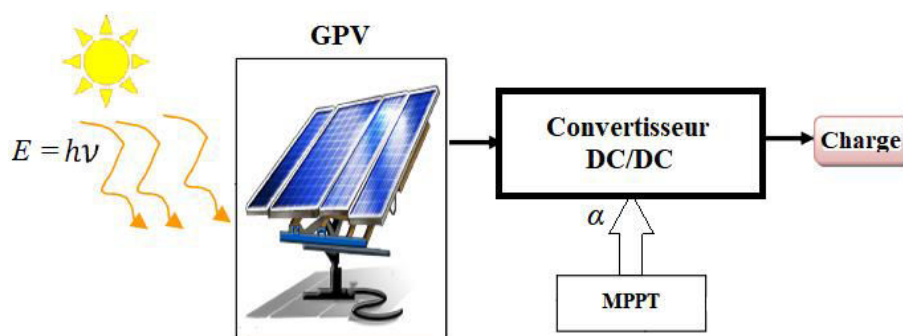


Figure III.1 : Schéma fonctionnel du système PV complet

### III.3. Les convertisseurs statiques DC/DC

#### III.3.1. Définition

Un convertisseur DC/DC ou hacheur est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant) [25].

#### III.3.2. Types des convertisseur DC/DC

Il existe différents types de hacheurs : Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit abaisseur ou Buck. Sinon, on dit qu'il s'agit d'un hacheur élévateur ou Boost, il existe également des hacheurs capables de fonctionner dans les deux sens (Buck-Boost).

Dans cette étude, un convertisseur boost a été utilisé, il est essentiellement composé d'un interrupteur  $K$  (de type IGBT ou MOSFET) et d'une diode  $D$ . L'interrupteur  $K$  est commandé par un signal PWM avec une période de découpage fixe  $T_d$  et un rapport cyclique variable  $\alpha$ . La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, lorsque  $K$  est fermé  $D$  est ouvert ; et quand  $K$  est ouvert,  $D$  est fermé. Durant chaque période,  $K$  est immédiatement fermé à  $t = 0$  jusqu'à  $T_d$  et ouvert de  $\alpha T_d$  à  $T_d$ . Il existe deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (mode de conduction discontinu) ou non (mode de conduction continu). Nous nous intéressons au deuxième cas qui est le plus important. La figure (III.2) donne le schéma synoptique de ce convertisseur [25-27] :

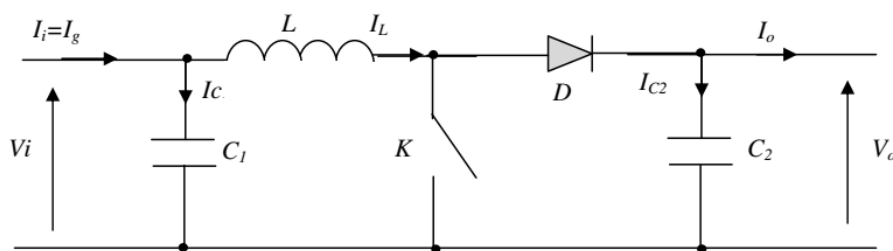


Figure III.2 : Convertisseur DC/DC de type Boost [21]

En régime continu, les valeurs moyennes de la tension de sortie  $V_0$  et du courant de sortie  $I_0$  sont données par [26] :

$$V_0 = \frac{V_i}{1 - \alpha} \quad (\text{III.1})$$

$$I_0 = I_i(1 - \alpha) \quad (\text{III.2})$$

### III.4. Commandes MPPT

#### III.4.1. Définition

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), 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 (éclairage et température), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{pm}$  et  $I_{pm}$ ). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique commandé par une MPPT.

#### III.4.2. Principe de la commande MPPT

Le principe de la commande MPPT est de faire varier le rapport cyclique  $\alpha$  du convertisseur statique automatiquement, à l'aide d'un signal électrique approprié pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP, ainsi quels que soient les conditions météorologiques, la commande du convertisseur place le système au point de fonction maximum MPP ( $V_{pm}$ ,  $I_{pm}$ ).

#### III.4.3. Classification des commandes MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPP ont été développées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de changement de température et/ou d'éclairage, le matériel nécessaire pour la mise en œuvre, ...

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : Méthodes directes et indirectes [28].

##### III.4.3.1. Méthodes directes

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP.

Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui, est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur PV, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrémental de conductance, etc....

#### III.4.3.2. Méthodes indirectes

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{cc}$  ou  $V_{co}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur.

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser, elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc.....

#### III.4.4. Techniques de commandes MPPT

De nombreuses recherches ont été développées concernant les différents algorithmes du suivi du point de puissance maximale MPP. En tenant compte des variables des paramètres du système et/ou des changements climatiques. Le schéma fonctionnel de la Figure (III.1) présente un générateur PV avec MPPT, la charge peut être alimentée à partir du GPV en utilisant MPPT, avec un contrôleur spécifique, pour suivre la puissance maximale générée par le GPV.

Ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches Aussi plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées. Dans cette partie, on présentera l'aspect théorique de quelques méthodes (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont : La méthode de perturbation et observation (P&O), la méthode de tension du circuit ouvert et la méthode basée sur la logique floue [25-34].

### III.4.4.1. Méthode de perturbation et observation (P&O)

La méthode de P&O est la technique MPPT la plus connue, c'est une technique largement utilisée parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple et peu de paramètres de mesure, pour l'utiliser on considère que le PV fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le MPP.

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau PV et on observe la variation de la puissance électrique délivrée à la sortie du panneau PV.

Si  $\frac{dP}{dV} > 0$ , alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

Si  $\frac{dP}{dV} < 0$ , le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

Si  $\frac{dP}{dV} = 0$ , le point de fonctionnement oscille autour du MPP.

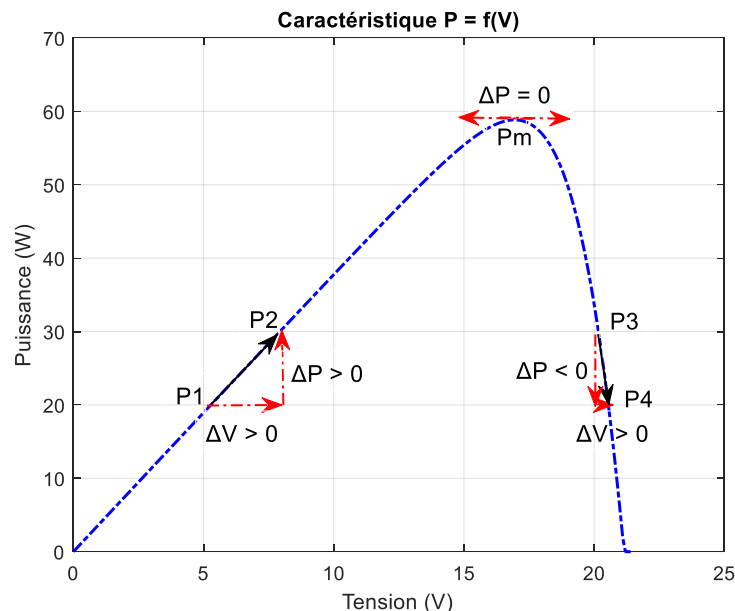


Figure III.3 : Principe de la commande P&O

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $k$ , puis on la compare à la précédente de l'instant

( $k-1$ ). Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (MPP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du MPP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique  $\alpha$ . La figure (III.4) illustre l'organigramme de *Début* de P&O.

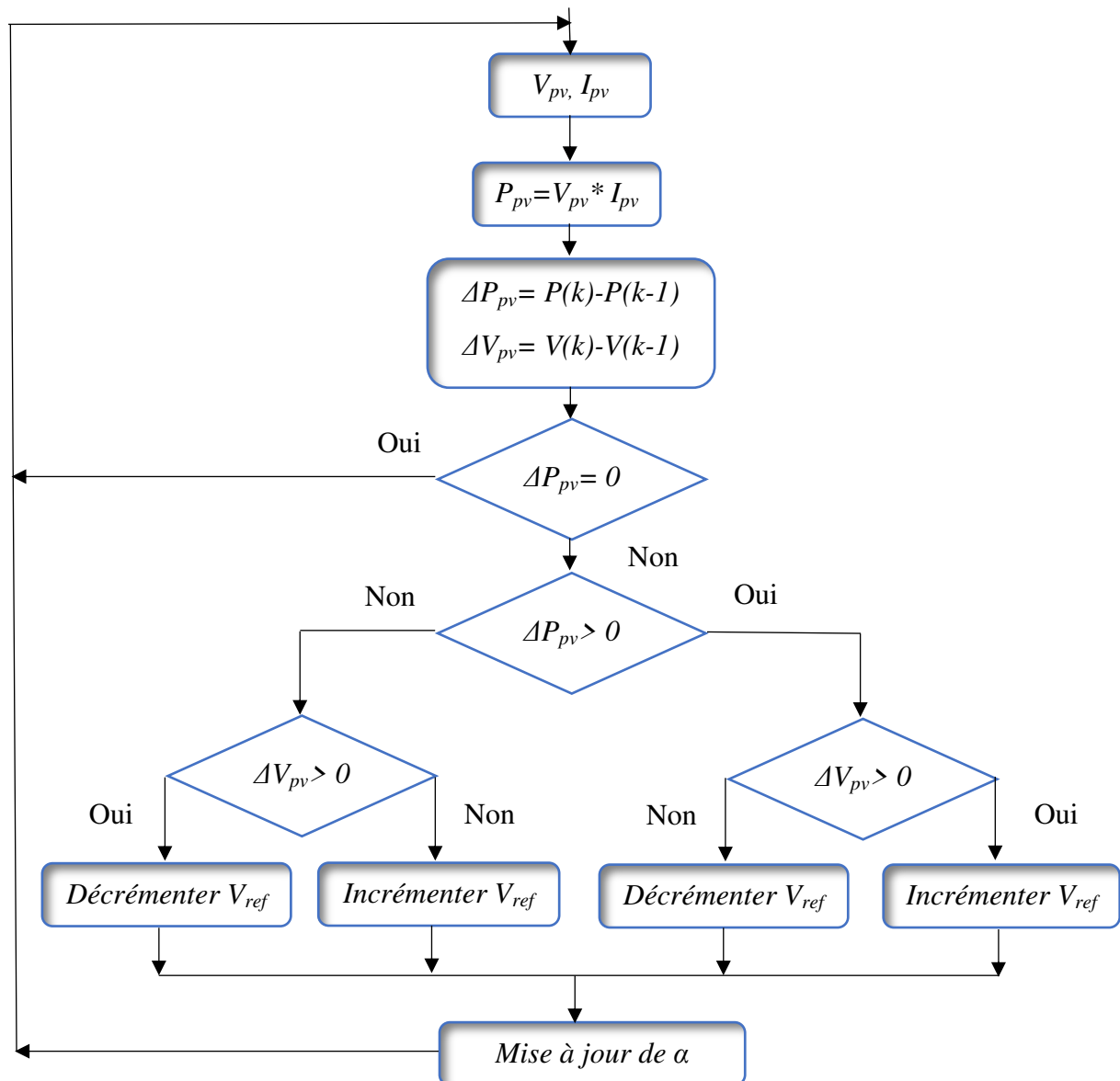


Figure III.4 : Organigramme de la commande P&O

#### III.4.4.2. Méthode de la tension du circuit ouvert (TCO)

La méthode de la tension du circuit ouvert (open circuit voltage) également appelée la méthode de tension constante ou la méthode à contre réaction de tension, est basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  et la relation linéaire approximative (III.3) liant cette tension avec la tension de point maximal du GPV [33,34] :

$$V_{mpp} = k \cdot V_{co} \quad (\text{III.3})$$

Où  $k$  est une constante de proportionnalité. il est généralement compris entre 0.71 et 0.86. Une fois que  $k$  est déterminé, le  $V_{mpp}$  peut être calculé à l'aide de l'expression précédant (III.3) avec  $V_{co}$  mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension  $V_{mpp}$  est alors prise comme tension de référence. Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle  $V_{pv}$  et la tension de référence  $V_{ref}$  ( $V_{mpp}$ ). Le signal d'erreur est traité pour rendre  $V = V_{ref}$  [33].

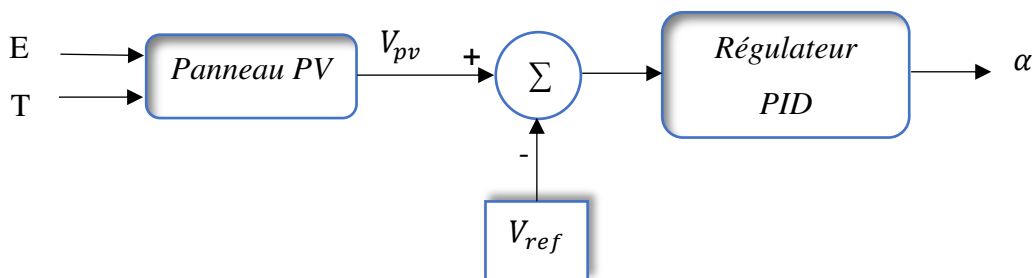


Figure III.5 : Principe de méthode tension du circuit ouvert

L'organigramme de la méthode du circuit ouvert est donné par la figure suivante :

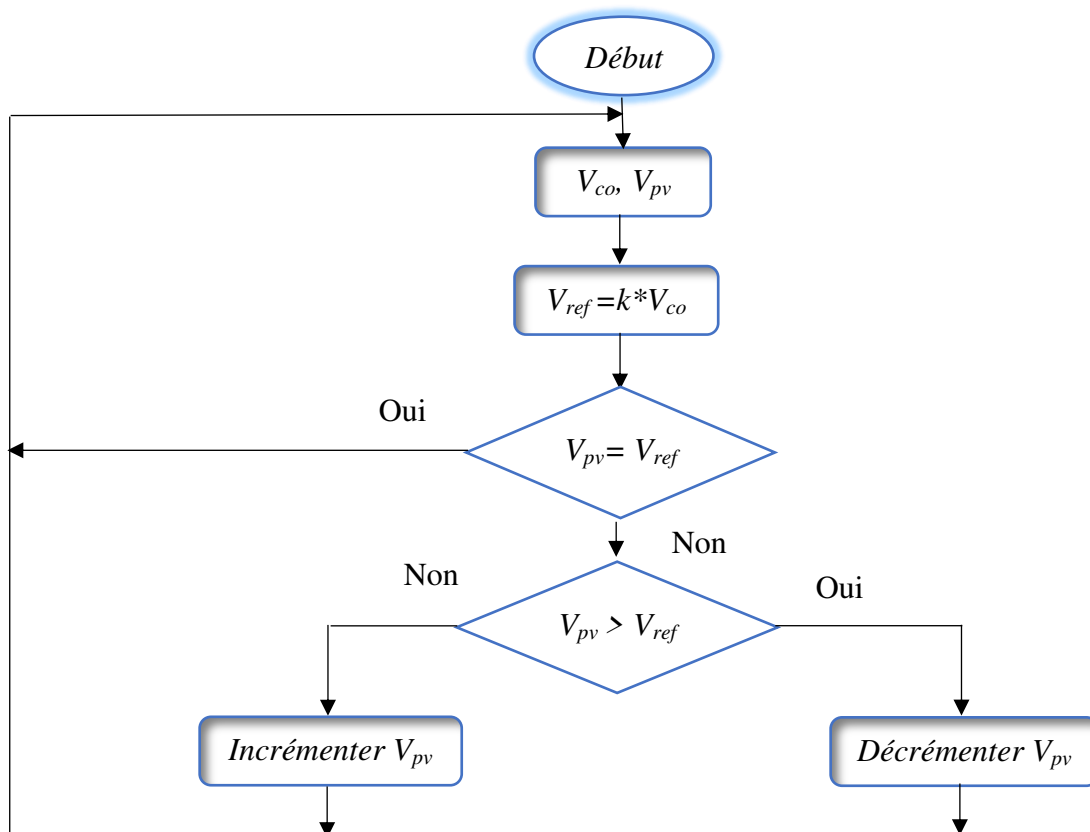


Figure III.6 : Organigramme de la méthode tension du circuit ouvert

### III.4.4.3. Méthode basée sur la logique floue

La logique floue est une borne de l'intelligence artificielle tout comme les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques. Aujourd'hui, la logique floue est une approche alternative intéressante. Il présente plusieurs avantages comme un raisonnement proche de celui de l'homme, il se caractérise par sa robustesse et son insensibilité à la variation des différents paramètres. Au cours de cette dernière décennie, un nombre important de travaux et d'articles scientifiques ont été associés à la commande floue afin d'augmenter le rendement des panneaux photovoltaïques, ainsi que des études comparatives avec les techniques citées précédemment (P&O et P&O améliorée).

La mise en œuvre d'un contrôleur flou s'effectue en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification (Figure III.7) [25,31].

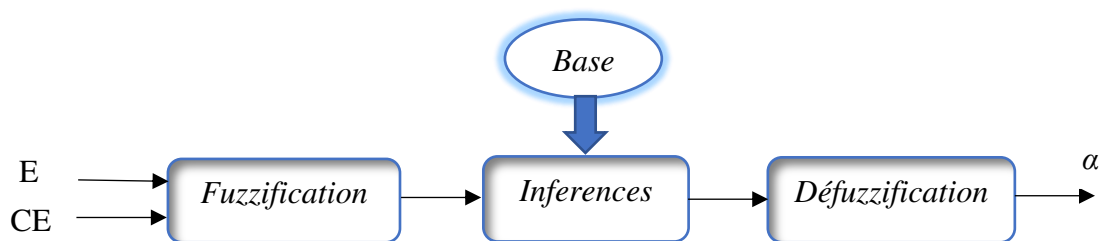


Figure III.7 : Schéma fonctionnel de la commande floue

La fuzzification permet de brouiller les variables d'entrée, une étape préalable consiste à définir un intervalle de variation maximum autorisé pour les variables d'entrée. Le but de la fuzzification est de transformer des variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues. Dans notre cas, nous avons deux variables d'entrée qui sont l'erreur  $E(k)$  et la variation d'erreur  $CE$  à l'instant  $k$  qui sont définies comme suit [3, 32] :

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (\text{III.3})$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{III.4})$$

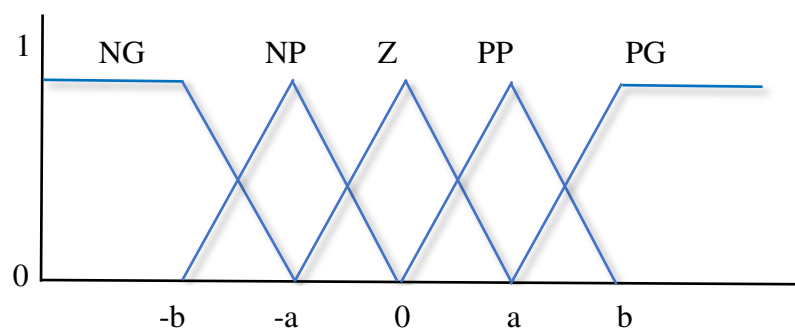


Figure III.8 : Fonctions d'appartenance floue utilisées dans le processus de fuzzification

Ainsi ses variables seront qualifiées : Négatif grand (NG), Négatif petit (NP), Zéro (Z), Positif petit (PP) et Positif grand (PG) comme la montre la figure (III.8).

L'inférence est une étape de définition d'une relation logique entre les entrées et la sortie. En effet, des règles d'appartenance seront définies pour la sortie comme cela a été fait pour les entrées, grâce à ces règles une table d'inférence peut être établie (Tableau III.1) [25]. Il est évident qu'une bonne connaissance du système est requise pour le développement d'un tel régulateur. En effet, en règle générale, une valeur d'entrée est définie par deux fonctions floues de degrés différents, donc la sortie sera également définie par plusieurs fonctions, la question étant de savoir à quels degrés d'appartenance. Plusieurs méthodes peuvent répondre à cette question. De notre côté, nous avons utilisé la méthode Max-Min. Enfin, nous devons faire l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue et c'est le but de la défuzzification.

**Tableau III.1:** Base de règles de logique floue

<b>E \ CE</b>	<b>NG</b>	<b>NP</b>	<b>Z</b>	<b>PP</b>	<b>PG</b>
<b>NG</b>	Z	Z	NG	NG	NG
<b>NP</b>	Z	Z	NP	NP	NP
<b>Z</b>	NP	Z	Z	Z	PS
<b>PP</b>	PP	PP	PP	Z	Z
<b>PG</b>	PG	PG	PG	Z	Z

### **III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné des définitions et notions de bases sur les convertisseurs DC/DC, ainsi que les modèles mathématiques nécessaires à l'étude de leur comportement lors de la simulation du système PV global. Aussi, nous avons présenté quelques commandes MPPT pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement.

Dans le chapitre suivant, on va présenter la simulation de ces techniques MPPT sous MATLAB/Simulink en variant l'éclairement solaire puis on discutera les résultats obtenus.

*Chapitre IV*

*Simulation et*

*discussion des résultats*

### ***IV.1. Introduction***

Dans ce chapitre nous présentons les différents résultats de simulation par l'environnement 'Simulink' de MATLAB. Le 'Simulink' nous permet d'établir les différentes commandes MPPT et de changer facilement les conditions atmosphériques (Eclairage, température), le système complet à simuler contient : Le générateur photovoltaïque, les convertisseurs DC/DC, les commandes MPPT et la charge. Ensuite nous présentons les graphes obtenus par les différentes commandes et on discute les résultats.

### ***IV.2. L'outil Matlab/Simulink***

MATLAB est une plateforme de calcul numérique et de programmation utilisée par des millions d'ingénieurs et de scientifiques pour analyser des données, développer des algorithmes et créer des modèles. En plus du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une large gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Boîtes à outils).
- Simulink, un environnement de modélisation puissant basé sur des schémas fonctionnels et la simulation de systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- D'autres modules dont un compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : l'Atelier DSP.

Simulink est une plateforme de simulation multi-domaines et de modélisation de systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques de modélisation qui permet de spécifier la conception, la simulation, l'application et le contrôle des systèmes de communication, de traitement du signal, de l'automatique, des systèmes photovoltaïques, ....

### ***IV.3. Simulation du système photovoltaïque***

La figure (IV.1) montre le modèle proposé sous MATLAB/Simulink du système PV complet qui contient le générateur PV, le convertisseur DC/DC, les différentes techniques MPPT mentionnées ci-dessus et la charge. Les algorithmes MPPT sont appliqués dans le contrôleur pour fournir au convertisseur le cycle de service optimal pour atteindre la puissance maximale du système PV pour différentes valeurs d'éclairage.

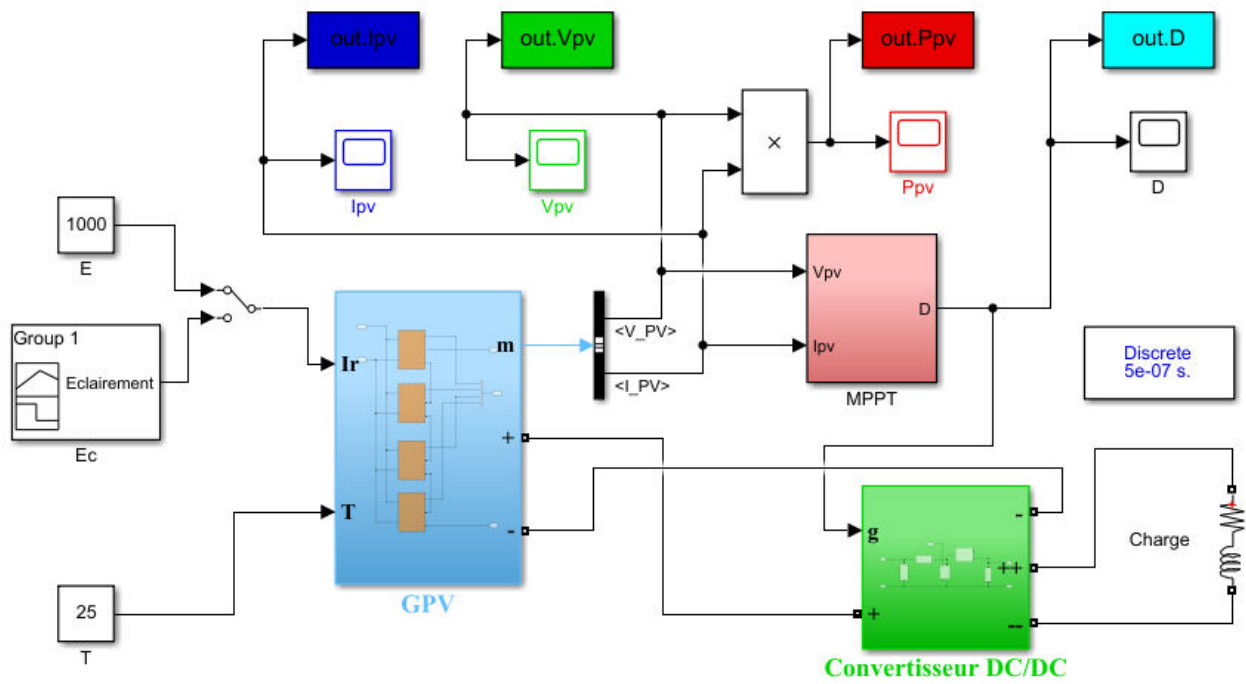


Figure IV.1 : Modèle du système PV sous Simulink

Les modèles de simulation des blocs générateur photovoltaïque et convertisseur DC/DC (Boost) sont illustrés sur les figures (IV.2) et (IV.3) respectivement. Nous changeons la technique MPPT à chaque fois et on verra la courbe de puissance générée par notre système.

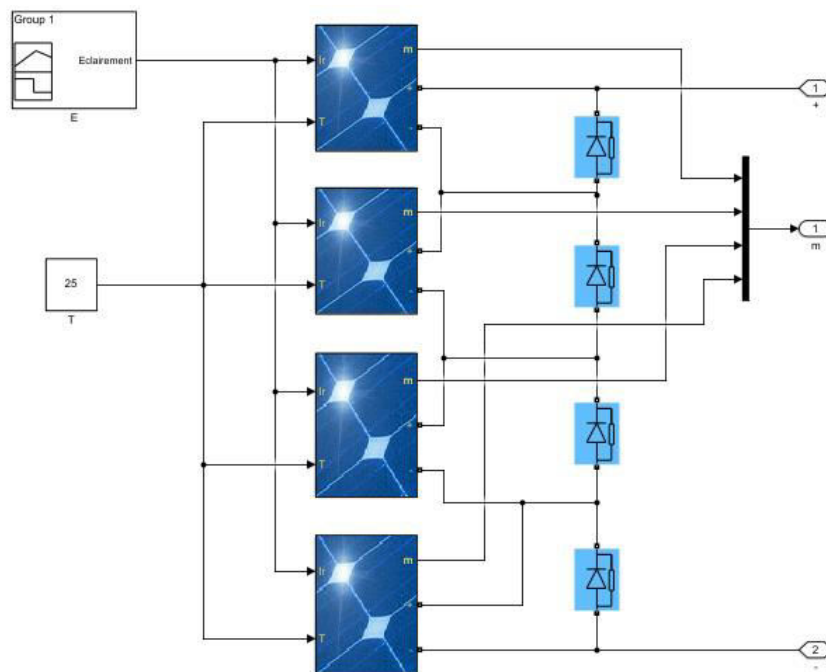


Figure IV.2 : Modèle du générateur PV sous Simulink

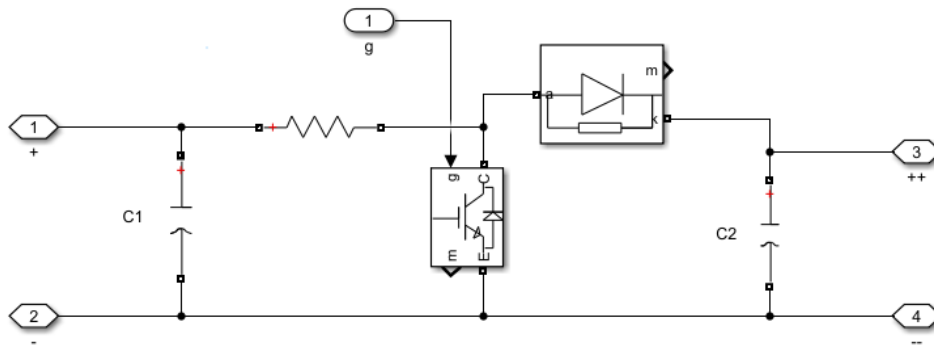


Figure IV.3 : Modèle du convertisseur DC/DC sous Simulink

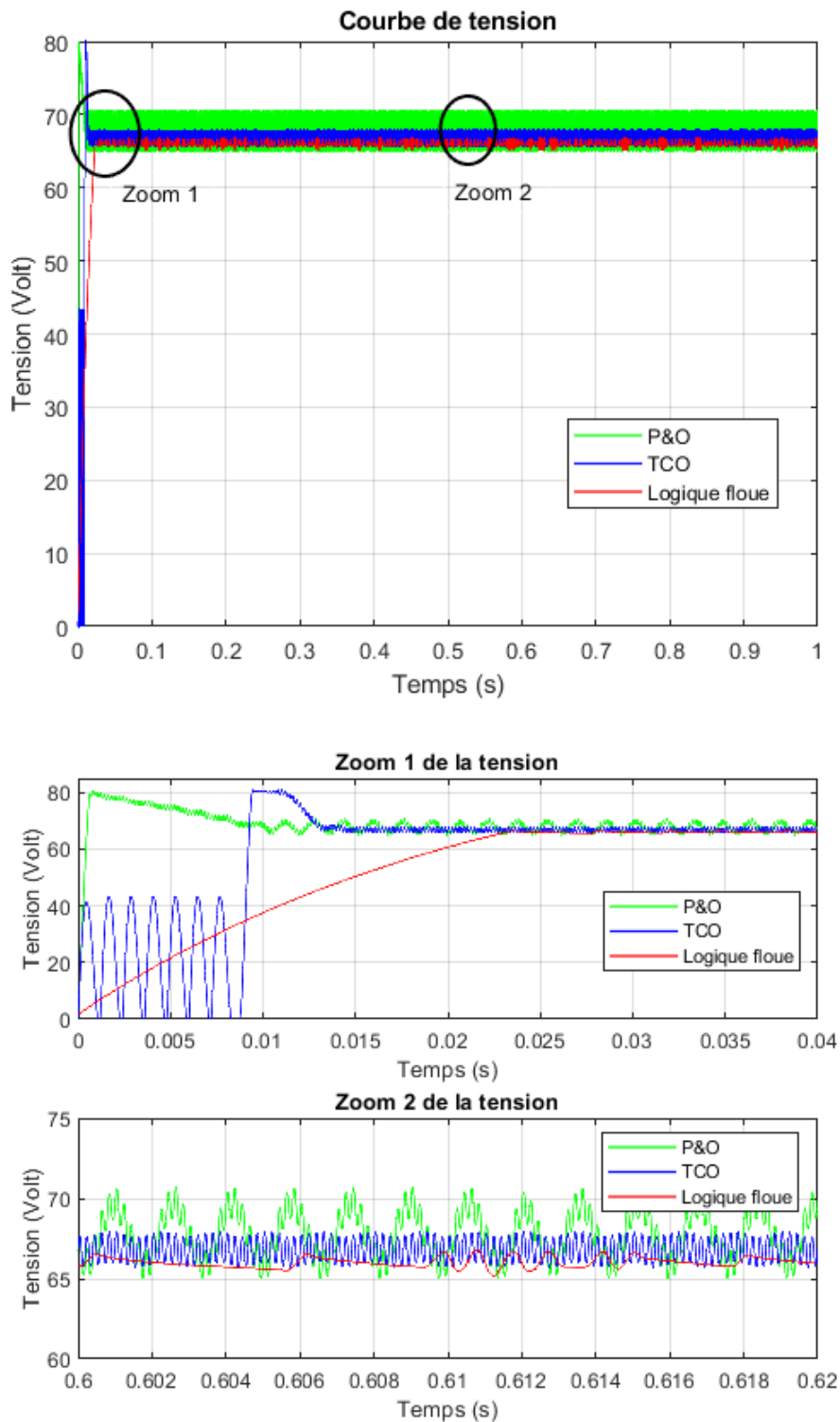
#### IV.4. Résultats obtenus et discussion

Les résultats de simulation sont utilisés pour évaluer les performances des méthodes MPPT. Notre générateur photovoltaïque est composé de quatre panneaux photovoltaïques connectés en série de type 'MSX60', ce panneau PV polycristallin génère environ de 58 W sous les conditions STC, il est simulé pour voir à quel point il est précis et stable lorsque l'éclairement solaire change soudainement et de manière aléatoire. Les paramètres de ce panneau sont donnés par le tableau ci-dessous :

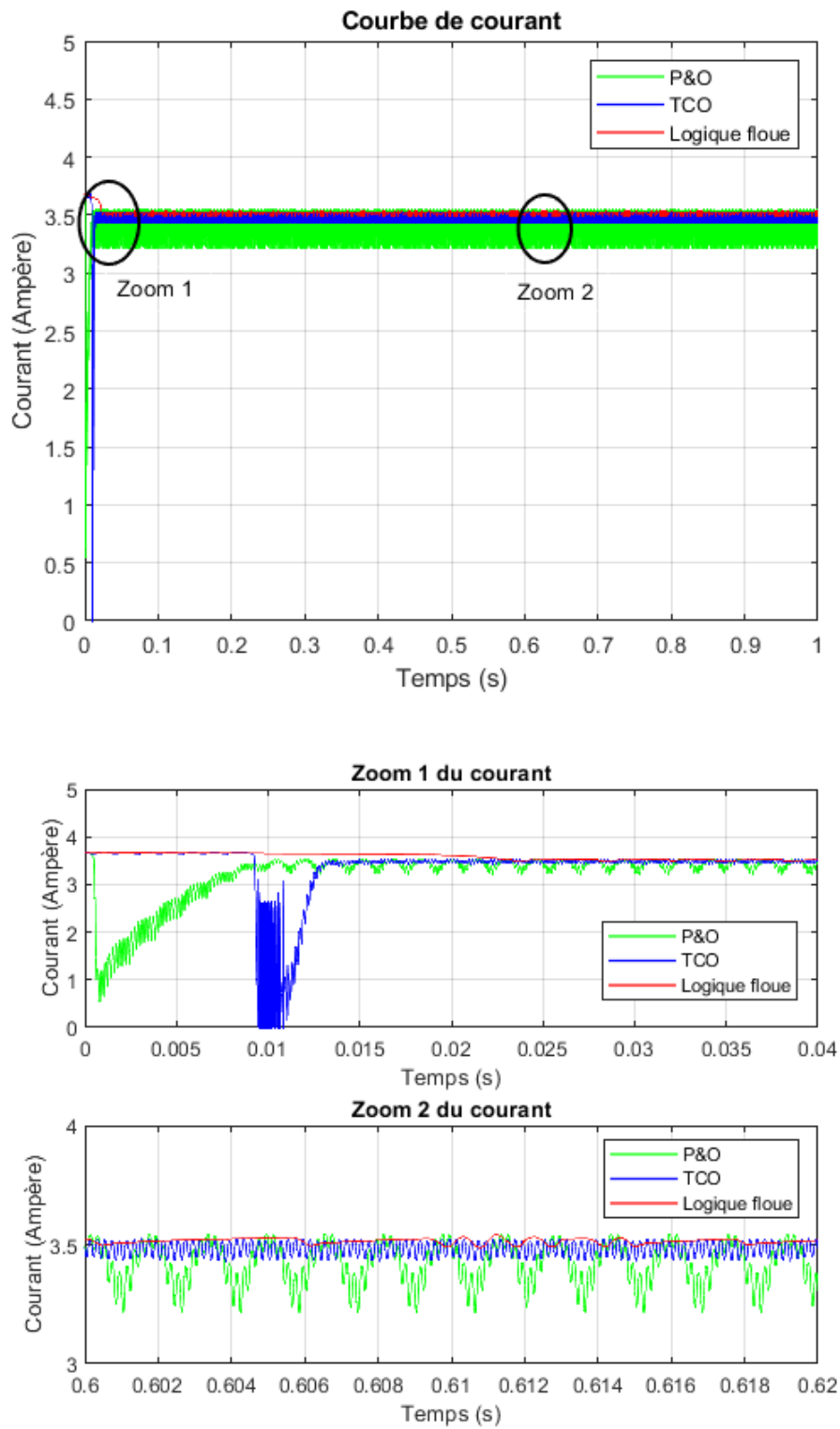
Tableau IV.1: Caractéristiques du panneau PV 'MSX60'

Paramètres	Valeur
Puissance maximale ( $P_{\max}$ )	58 - 60 W
Tension au MPP ( $V_{\max}$ )	17.1 V
Courant au MPP ( $I_{\max}$ )	3.5 A
Tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ )	21.1 V
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	3.8 A
Nombre de cellules en série ( $N_s$ )	36

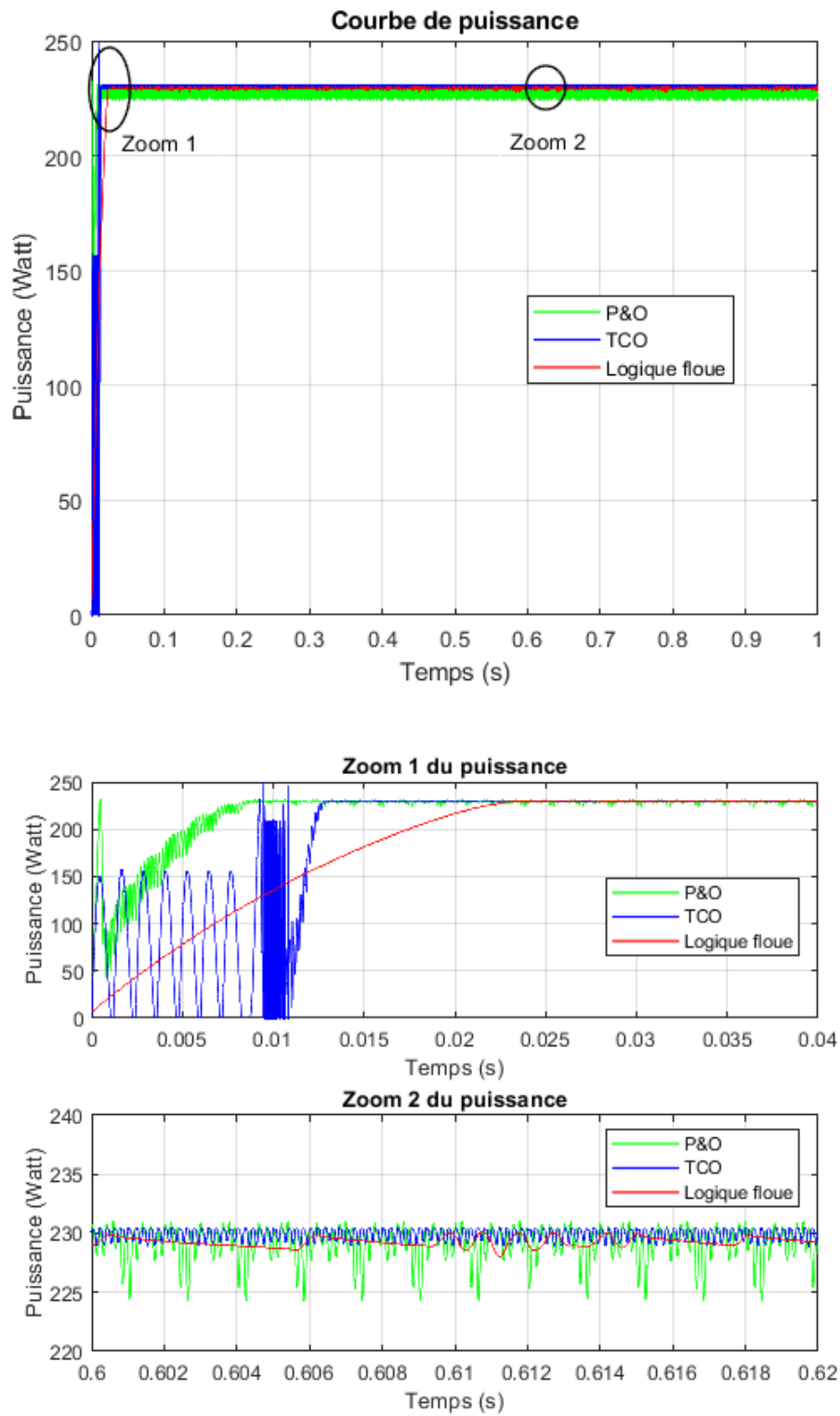
Les figures (IV.4,5,6) montre le courant, la tension et la puissance délivrée par le système dans des conditions stables : Eclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et Température de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  :



**Figure IV.4 :** Courbes de tension pour différentes commandes MPPT sous éclairement ( $1000\text{W/m}^2$ ) et température ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )



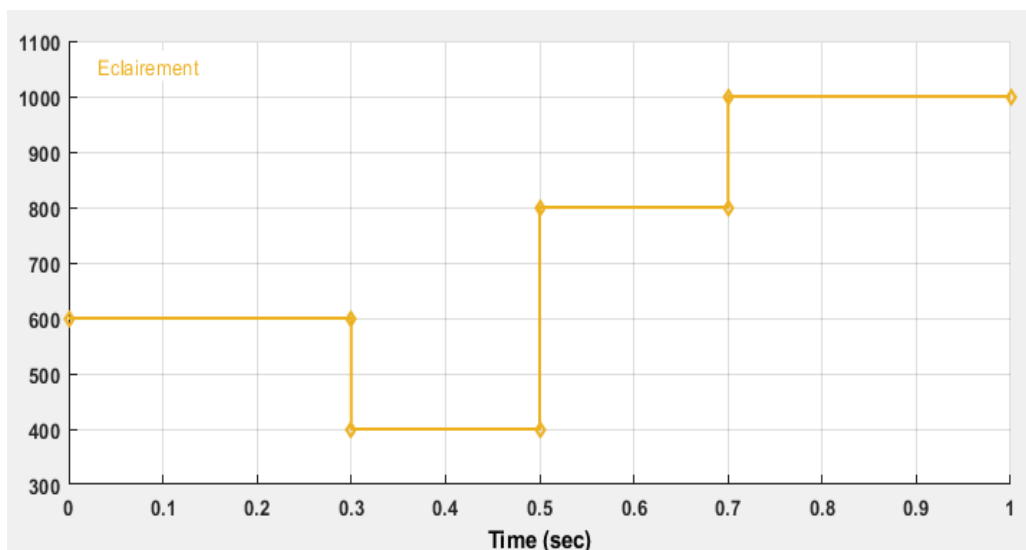
**Figure IV.5 :** Courbes de courant pour différentes commandes MPPT sous éclaircissement ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) et température ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )



**Figure IV.6 :** Courbes de puissance pour différentes commandes MPPT sous éclairciment ( $1000W/m^2$ ) et température ( $25\text{ }^\circ C$ )

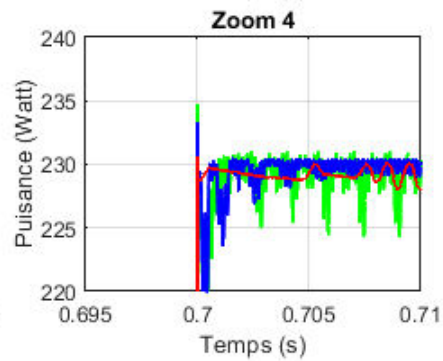
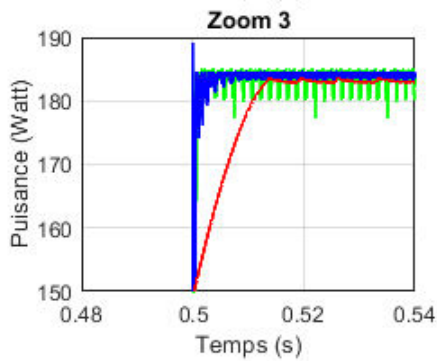
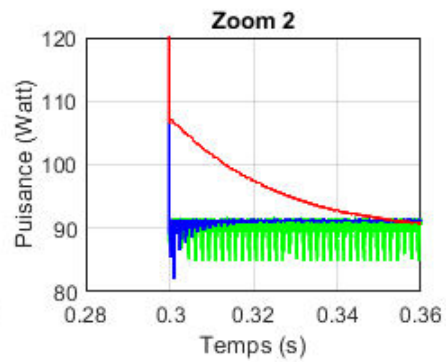
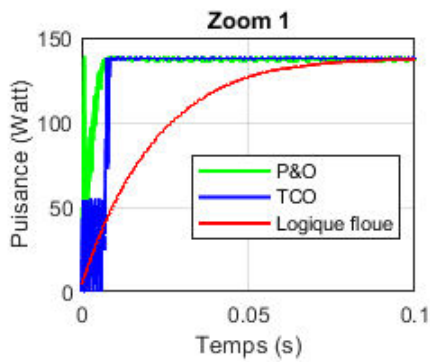
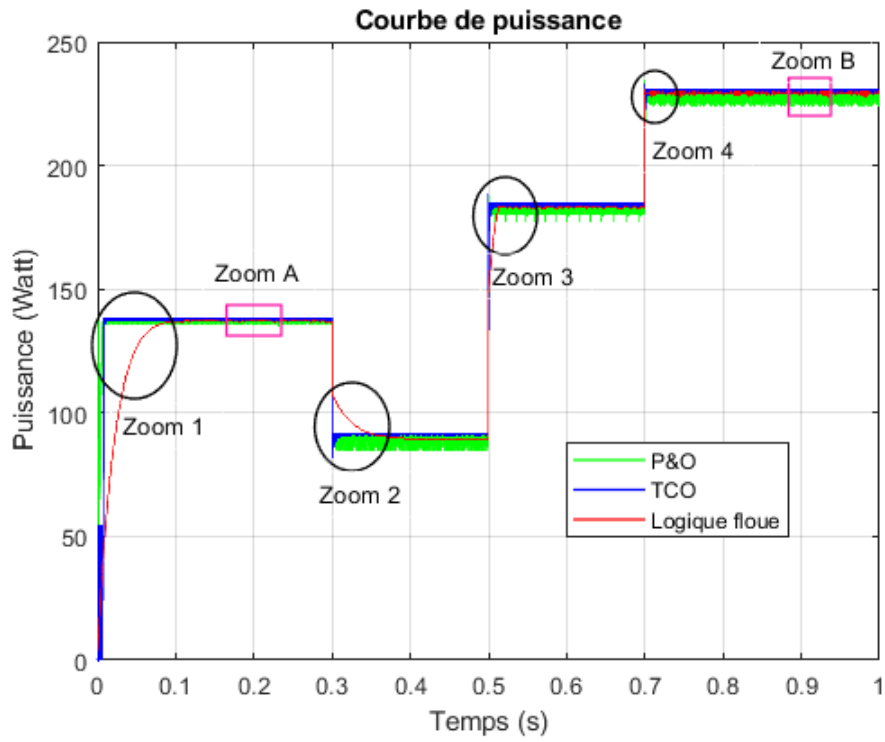
Les réponses temporelles de la tension et de puissance de sortie du système sont illustrées aux figures (IV.4,5,6). Nous pouvons voir que le temps de réponse de la commande P&O est rapide par rapport aux autres commandes, le temps de réponse de la technique TCO est un peu rapide et la commande basée sur la logique floue est lente, par contre la commande P&O a une faible précision et de très grandes oscillations autour de la valeur théorique, la commande TCO a une précision mieux que la commande P&O, les valeurs de puissance données par le contrôleur flou sont très proches de la théorique valeur, il a une précision considérable. Par conséquent, nous pouvons dire que l'algorithme flou a une très bonne vitesse de suivi et une bonne précision en particulier autour du point MPPT.

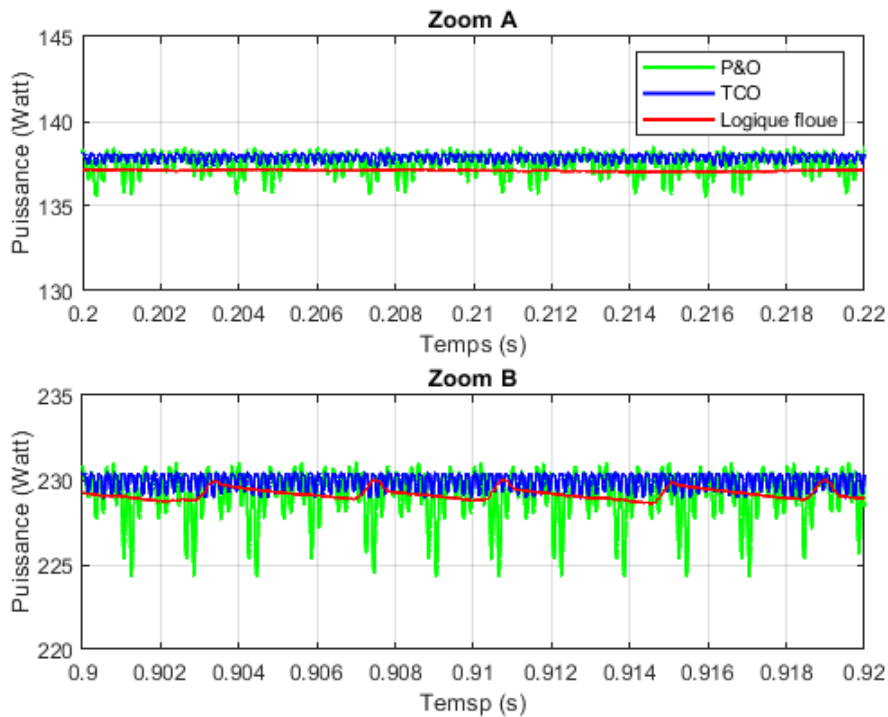
Maintenant, nous allons faire varier l'éclairement solaire à plusieurs valeurs et maintenir la température constante à 25 °C. Cette variation nous permet d'étudier la robustesse et l'efficacité de nos contrôleurs MPPT, l'éclairement énergétique est brutalement réduit de 600 W/m<sup>2</sup> à 400 W/m<sup>2</sup> avant d'augmenter rapidement à 800 W/m<sup>2</sup> et 1000 W/m<sup>2</sup> lors d'une perturbation d'une seconde, le profil de l'éclairement solaire est montré par la figure suivante :



**Figure IV.7 :** Profil de l'éclairement solaire

Les résultats de simulation de différentes techniques sous un éclairement variable sont présentés dans les figures (IV.8) :





**Figure IV.8 :** Courbes de puissance pour différentes commandes MPPT sous un éclairement variable

Les zooms 1, 2, 3 et 4 sont pris lors d'un changement soudain d'éclairement solaire (régime transitoire), tandis que les zooms A et B sont pris en régime permanent.

On voit qu'il existe une relation de proportionnalité entre l'éclairement et la puissance ; une augmentation de l'éclairement se traduit par une augmentation de la puissance photovoltaïque générée. En mode transitoire, on remarque que le contrôleur à logique floue met plus de temps que les contrôleurs P&O et TCO pour atteindre la puissance optimale ; c'est-à-dire un temps de réponse égal à 0,1s pour le contrôleur flou, 0,01s pour les contrôleurs P&O et TCO, ce qui montre que les contrôleurs P&O et TCO sont plus rapides que le contrôleur flou. En régime permanent et après stabilité, le contrôle P&O contient de très fortes oscillations ce qui implique des pertes de puissance importantes, par contre, l'oscillation est un peu faible pour le contrôleur TCO et négligeable pour le contrôleur flou.

**Tableau IV.2:** Comparaison entre les techniques MPPT

<b>MPPT</b>	<b>P&amp;O</b>	<b>TCO</b>	<b>Logique Floue</b>
<b>Identification des paramètres du GPV</b>	Nécessaire	Nécessaire	Nécessaire
<b>Complexité</b>	Moyenne	Faible	Grande
<b>Temps de réponse</b>	Très rapide	Rapide	Lent
<b>Précision</b>	Acceptable	Bonne	Très bonne
<b>Oscillations</b>	Grande	Moyenne	Négligeable

A partir des résultats de simulation obtenus et des statistiques de comparaison présentées dans le tableau ci-dessus, nous remarquons que le contrôleur floue conduit à de meilleures performances, avec presque l'absence d'oscillations en régime permanent, et un temps de réponse un acceptable.

### **III.5. Conclusion**

Les simulations effectuées par l'utilisation des techniques P&O, TCO et la logique floue, sous différentes conditions météorologiques ont permis de dire que les résultats obtenus par le contrôleur MPPT Flou est meilleur que celle du contrôleur MPPT P&O et TCO, du point de vue robustesse et précision vis-à-vis des changements des paramètres météorologiques (éclairage solaire). La puissance de charge suit bien la puissance du GPV quelques soient les variations d'éclairage solaire pour les trois contrôleurs. La méthode P&O, bien qu'elle soit efficace en termes de poursuite du PPM, présente des pertes de puissance dues à l'oscillation du point de fonctionnement du système autour de sa position optimale et un régime transitoire long. La poursuite du point maximum avec le contrôleur MPPT TCO a un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minimale face aux différentes variations, les pertes de puissance sont moindres dans le régime transitoire ; ce qui implique une amélioration du rendement du système. On a vu également que le contrôleur MPPT Flou a une vitesse de suivre un peu faible au démarrage et à chaque phase de transition mais il ne présente que des très faibles oscillations autour de point de puissance maximale.

# *Conclusion générale*

## **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la modélisation et la simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) commandé par une technique MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV sous variation d'éclairement solaire. Dans un premier temps, nous avons donné quelques notions de base sur les énergies renouvelables ainsi que des statistiques sur la production énergétique dans le monde, après, nous avons élaboré en détail la synthèse du modèle électrique et mathématique de chaque organe constituant le système photovoltaïque, à savoir les cellules PV formant un module, les hacheurs, la charge ainsi que les différentes commandes MPPT proposées. Pour cela, nous nous sommes attachés surtout à présenter notre contribution à l'élaboration et à la mise en œuvre de certaines techniques de commande MPPT classiques et intelligents.

Les simulations effectuées par l'utilisation de ces différentes techniques de commande sous différentes conditions atmosphériques nous ont permis de comprendre les problèmes liés au fonctionnement de chaque méthode MPPT afin de localiser les inconvénients et les avantages des différents mécanismes et essayer de trouver des améliorations du point de vue efficacité, rapidité et complexité. 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.

Plusieurs commandes MPPT ont été discutées, implémentées et comparées dans ce travail. L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En général, cet algorithme réagit rapidement au changement climatique mais il présente des oscillations remarquables autour de la valeur optimale, ce qui provoque une perte de puissance importante. L'algorithme de la tension du circuit ouvert semble être une amélioration de l'algorithme P&O. En effet, il se comporte mieux en régime permanent et a moins d'oscillations autour du point de puissance maximale, l'inconvénient majeur de cet algorithme est son mauvais comportement suite à un changement brutal d'éclairement solaire, il faut un temps de réponse long pour atteindre la puissance optimale. Cependant, il s'agit d'un algorithme plus complexe que le précédent. La commande MPPT basée sur la logique floue est la plus fiable par rapport aux autres techniques. Il est adapté aux changements brusques des conditions atmosphériques malgré son lent temps de

réponse, le contrôleur de logique floue a un temps de réponse un peu lent mais il ne présente qu'une faible oscillation autour du point de puissance maximale.

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

*Références  
bibliographiques*

## Références bibliographiques

- [1] Bensalem Salah Eddine. *'Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires'*. Mémoire de Magistère, Université Ferhat Abbas Sétif, 2011.
- [2] Marwen Boufares et Saif Benelhaj salah. *'Optimisation de l'énergie délivrée par un panneau photovoltaïque : « Suiveur de soleil »'*. Mémoire d'ingénieur, Université de Tunis El Manar, Tunisie, 2014.
- [3] Hanen Abbas, Hafedh Abid, Kais Loukil, Ahmad Toumi, Mohamed Abid. *'Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque'*. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014) 435 – 445.
- [4] Mohcine Mokhlis, Mohammed Ferfra, Hemeyine Ahmed Vall, Rafika El idrissi, and Cheikhne Cheikh Ahmed. *'Comparative Study Between the Different MPPT Techniques'*. 5<sup>th</sup> International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), (2020).
- [5] Observ'ER, l'observatoire des Energies Renouvelables. *'La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde'*. Douzième inventaire. Édition 2010.
- [6] H. Ben Ahmed, B. Multon, G. Robin, et O. Gergaud. *'Consommation d'énergie et ressources énergétiques'*. Techniques de l'Ingénieur, traité D3900, 2003.
- [7] B. Multon. *'Production d'énergies électrique par sources renouvelables'*. Techniques de l'Ingénieur, traité D4005, 2003.
- [8] Observatoire européen LEADER/AEIDL. *'Sources d'énergies renouvelables, source de développement durable'*, 1999.
- [9] Commission Européenne, Communication de la Commission. *'Énergie pour l'avenir : Les sources d'énergies renouvelables'*. Livre Blanc établissant une stratégie et un plan d'action communautaires, 1997.
- [10] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_non\\_renouvelable](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_non_renouvelable), 16/08/2021.
- [11] <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>, 16/08/2021.
- [12] G.O. Cimuca. *'Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens'*. Thèse de l'école Nationale Supérieure d'arts et Métiers Centre Lille, France, 2011.
- [13] Christophe darras. *'Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque/Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)'*. Thèse de doctorat à l'Université de Corse-Pascal Paoli, France, 2011.

- [14] J. Labbe, *'L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïque isolés'*. Thèse de doctorat à l'école des Mines de Paris, CEP, Sophia Antipolis, France, 2006.
- [15] Kheridla Youcef et Khineche Kaddour. *'Modélisation et simulation d'un système de production d'hydrogène par voie photovoltaïque'*. Mémoire de Master, université KASDI MERBAH Ouargla, Algérie, 2014.
- [16] Kaabeche Abdelhamid. *'Etude comparative entre le stockage à hydrogène et les batteries au plomb dans un système hybride (Photovoltaïque / Eolien) autonome'*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2012.
- [17] Kahla Sami, Bechouat Mohcene, Amieur Toufik, Feraga Chams-Eddine, Sedraoui Moussa. *'A Comparison Study: Direct and Indirect Mode Control of Perturb and Observe-MPPT Algorithms for Photovoltaic System'*. 1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications (ICSRESA), December 04-05, 2019, Tebessa, Algeria.
- [18] Roberto faranda, sonia leva. *'A Comparative Study of MPPT techniques for PV Systems'*. 7<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Application of Electrical Engineering (AEE'08), Trondheim, Norway, 2008.
- [19] S. Messalti, A. Harrag and A. Loukriz. *'A new PSO-PID variable step size MPPT controller for PV systems under fast changing atmospheric conditions'*. Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°4 (2017) 555 – 571.
- [20] Zarour laid. *'Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau'*. Thèse de doctorant en science, université mentouri de Constantine, Algérie, 2010.
- [21] Sila Djamel Eddine. *'Etude comparative entre trois techniques de commande d'un générateur photovoltaïque'*. Mémoire de Master, université Amar Téldji Laghouat, Algérie, 2012.
- [22] Bentria Mohamed Rafik. *'Etude d'un système de pompage photovoltaïque pour des puits de parcours (cas de la région de Taïbet - Ouargla)'*. Mémoire de Master, université KASDI MERBAH Ouargla, Algérie, 2017.
- [23] Kheddiri Nasreddine et Tedjini Lahcene. *'Etude, modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque'*. Mémoire de Master, université DJILLALI LIABES DE SIDI BELABBES, Algérie, 2019.
- [24] Hanen Abbes, Hafedh Abid, Kais Loukil, Ahmad Toumi, Mohamed Abid. *'Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque'*. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014) 435 – 445, 2014.

- [25] Jyotirmayee Priyadarshini. *'Modelling and simulation of PV system with fuzzy MPPT based converter'*. International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering, (ICRIEECE), 978-1-5386-5995-3/18, 2018.
- [26] Abdelilah Chalh and al. *'Trusted Simulation Using Proteus Model for a PV System: Test Case of an Improved HC MPPT Algorithm'*. Energies 2020, 13, 1943; doi:10.3390/en13081943, 2020.
- [27] Priyanka Sharma, Vijay Kumar Garg. *'Solar power generation using off grid system'*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), e-ISSN: 2395 -0056, p-ISSN: 2395-0072, 2016.
- [28] Boukli-Hacene Omar. *'Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique'*. Mémoire de Magister, université Aboubaker Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2011.
- [29] Emmanuel Kwaku Anto, Johnson A. Asumadu, Philip Yaw Okyere. *'PID control for improving P&O-MPPT performance of a grid-connected solar PV system with Ziegler-Nichols tuning method'*. 11<sup>th</sup> Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, DOI: 10.1109/ICIEA.2016.7603888, 2016.
- [30] S. K. Kollimalla and M. K. Mishra. *'A novel adaptive P&O MPPT algorithm considering sudden changes in the irradiance'*. IEEE Transactions on Energy conversion, vol. 29, no. 3, pp. 602–610, 2014.
- [31] X. Chen, Y. Chen, B. Zhang, and D. Qiu. *'A modeling and analysis method for fractional-order dc–dc converters'*. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 9, pp. 7034–7044.
- [32] Guellal Amar, Mokhtari Abderrahmane, Kherchi Mohamed. *'La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA'*. The 4<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable Energies, October 24-25, 2016, Ghardaia, Algeria.
- [33] Yassine LASMI. *'Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes'*. Mémoire de Magister, université de Sétif, Algérie, 2013.
- [34] BENADEL Faiza. *'Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV'*. Mémoire de Master, université de Msila, Algérie, 2016.