

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique**

**Université Abderrahmane Mira**

**Faculté de la Technologie**



**Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique**

## **Projet de Fin d'Etudes**

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

### **Thème**

**Etude d'un système de poursuite de point de puissance maximale en utilisant la logique floue**

**Préparé par :**

ZERARGA SAMI

MESSALI ABDELKADER

**Dirigé par :**

Mme K.OUALI

**Examiné par :**

Mr A.BELKAID

Mr S.HANFOUG

**Année universitaire : 2021/2022**

# Table de matières

---

## Table des matières

Table de matière

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale ..... 1

### Chapitre I : généralité sur l'énergie photovoltaïque

I.1 Introduction..... 3

I.2 Effet photovoltaïque ..... 3

I.3 La cellule photovoltaïque..... 3

I.3.1 Principe de fonctionnement de la cellule PV ..... 3

I.3.2 Les différentes technologies de cellules PV ..... 4

    I.3.2.1 Première génération..... 4

    I.3.2.2 Deuxième génération..... 6

    I.3.2.3 Troisième génération ..... 9

    I.3.3 Caractéristiques électriques d'une cellule PV ..... 11

I.4 Influence de l'ensoleillement et la température sur le fonctionnement de la cellule PV  
..... 14

I.5 Association des cellules photovoltaïques ..... 15

    I.6 Le modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque ..... 17

I.7 Conclusion ..... 18

### Chapitre II: Méthodes MPPT

II.1 Introduction..... 20

II.2 Connexion directe ..... 20

II.3 Système PV avec commande MPPT..... 22

    II.3.1 Structure du système PV ..... 22

        II.3.1.1 Panneau Photovoltaïque ..... 23

        II.3.1.2 La charge ..... 23

        II.3.1.3 Convertisseur DC/DC (hacheur)..... 23

        II.3.1.4 Commande MPPT ..... 26

## Table de matières

---

II.4 Les Différents algorithmes MPPT classique .....	26
II.5 Technique moderne de poursuite de Point de puissance maximale .....	31
II.5.1 Commande MPPT à base de réseaux de neurones .....	31
II.5.2 Commande MPPT à base de la logique floue .....	32
II.5.2.1 Théorie des ensembles flou.....	32
II.5.2.1.1 Ensemble flou .....	33
II.5.2.1.2 Fonction d'appartenance .....	33
II.5.2.1.3 Raisonnement en logique floue .....	34
II.5.2.2 Structure d'un contrôleur flou.....	34
Fuzzification .....	34
Base de règle.....	35
Défuzzification .....	35
II.6 Conclusion .....	35

### Chapitre III :MPPT à base de la logique floue

III.1. Introduction .....	37
III.2. Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque.....	37
III.2.1 Simulation du panneau PV.....	37
III.2.1.a Influence de la température sur la caractéristique courant/tension du panneau photovoltaïque.....	39
III.2.1.b Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant/tension du panneau photovoltaïque.....	39
III.2.2 Simulation du convertisseur DC/DC .....	40
III.2.3 Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT basé sur la logique floue .....	41
III.4.3.1 Résultats de simulation sous les conditions météorologiques constante.....	44
III.4.3.2 Simulation du système global sous conditions atmosphériques variables .....	45
III.3. Conclusion .....	50
Conclusion générale.....	51
Références bibliographiques.....	52

## Liste des figures

---

### Liste des figures :

#### Chapitre I

<b>Figure I.1.</b> Présentation schématique d'une cellule solaire.....	4
<b>Figure I.2.</b> Cellule photovoltaïque polycristalline.....	5
<b>Figure I.3.</b> Cellule photovoltaïque monocristalline.....	6
<b>Figure I.4.</b> Cellule de deuxième génération.....	7
<b>Figure I.5.</b> Cellule au silicium amorphe.....	8
<b>Figure I.6.</b> Décomposition d'une cellule à base de tellure de cadmium.....	9
<b>Figure I.7.</b> Décomposition d'une cellule à base de CIGS.....	9
<b>Figure I.8.</b> Vue schématique de la décomposition de cellule à multijonctions.....	10
<b>Figure I.9.</b> Cellule nanocristalline à colorant.....	10
<b>Figure I.10.</b> Cellule organiques.....	11
<b>Figure I.11.</b> Courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	11
<b>Figure I.12.</b> Cellule photovoltaïque en circuit ouvert.....	12
<b>Figure I.13.</b> Cellule photovoltaïque en court-circuit.....	13
<b>Figure I.14.</b> Caractéristiques I (V) et P(V) d'un module pour différentes irradiations solaires à 25°C.....	14
<b>Figure I.15.</b> Influence de la température sur la caractéristique I (V) et P(V) pour une irradiation solaire de 1000W/m <sup>2</sup> .....	15
<b>Figure I.16.</b> Association de deux panneaux en parallèle.....	15
<b>Figure I.17.</b> Caractéristique courant tension du raccordement en parallèle des cellules PV.....	15
<b>Figure I.18.</b> Association de deux panneaux en série.....	16
<b>Figure I.19.</b> Caractéristique courant tension du raccordement en série des cellules PV.....	16

## Liste des figures

---

**Figure. I.20.** Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....17

### Chapitre II

**Figure II.1.** Principe du couplage direct.....21

**Figure II.2.** Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.....21

**Figure II.3.** Système photovoltaïque.....23

**Figure II.4.** Convertisseur DC/DC.....24

**Figure II.5 :** hacheur série(Buck).....24

**Figure II.6.** Hacheur parallèle (Boost).....25

**Figure II.7.** Hacheur Buck-Boost.....26

**Figure II.8.** Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation.....27

**Figure. II.9 :** Organigramme de l'algorithme P&O.....28

**Figure II.10.** Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G et de la puissance P.....29

**Figure II.11.** Organigramme de l'algorithme Inc-Cond.....31

**Figure II.12.** Exemple de réseau de neurones.....32

**Figure II.13.** Les formes de fonction d'appartenance.....33

**Figure II.14** Structure générale d'un contrôleur flou.....34

### Chapitre III

**Figure.III.1.** La caractéristique  $I = f(V)$  en fonction de l'éclairement du générateur PV ....38

**Figure.III.2.** La caractéristique  $P = f(V)$  en fonction de l'éclairement du générateur PV...38

**Figure III.3** Caractéristique puissance- tension à  $1000W/m^2$  pour plusieurs températures..39

**Figure III.4.** Caractéristique puissance- tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25).....39

**Figure.III.5.** Modélisation d'un Convertisseur BOOST.....40

## Liste des figures

---

<b>Figure III.6.</b> Tension d'entrée et de sortie du convertisseur Boost.....	41
<b>Figure III.7.</b> programme Simulink de la commande MPPT à base de la logique floue.....	42
<b>Figure III.8.</b> L'architecture interne de sous-système FLC.....	42
<b>Figure III.9.</b> Fonction d'appartenance de la logique floue.....	43
<b>Figure II.10.</b> La puissance en fonction du temps avec la logique floue.....	44
<b>Figure III.11.</b> Le courant en fonction du temps avec la logique floue.....	44
<b>Figure III.12.</b> La tension en fonction du temps avec la logique floue.....	45
<b>Figure III.13.</b> Variation de l'éclairement en fonction du temps.....	46
<b>Figure III.14.</b> Puissance en fonction du temps.....	46
<b>Figure III.15.</b> Courant en fonction du temps.....	47
<b>Figure III.16.</b> Tension en fonction du temps.....	47
<b>Figure III.17.</b> Variation de la température en fonction du temps.....	48
<b>Figure III.18.</b> Puissance en fonction du temps.....	48
<b>Figure III.19.</b> Courant en fonction du temps.....	49
<b>Figure III.20.</b> Tension en fonction du temps.....	49

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux :

**Tableau.III.1.** Paramètres du module photovoltaïque Risen Energy SYP-85S.....37

**Tableau III.2.** Règle d'inférence de la commande par logique floue.....43

### **Introduction générale**

La croissance de la demande énergétique mondiale, l'épuisement inévitable des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la détérioration de l'environnement causée par ses types d'énergies, a incité au développement de nouvelles sources d'énergies, renouvelables, assurant ainsi une durabilité et une protection de l'environnement qui est devenue un point très important.[37]

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque occupe la plus importante place du fait qu'elle est la plus "élégante", silencieuse, autonome, discrète et les systèmes photovoltaïques ne nécessitent qu'un minimum d'entretien et ont une longue durée de vie.

L'énergie photovoltaïque issue de la conversion de l'énergie solaire souffre d'un problème d'optimisation, dû aux caractéristiques électriques non linéaires (courant - tension) des cellules photovoltaïques. Ces caractéristiques dépendent essentiellement des conditions climatiques de rayonnement et de température [38].

Dans la plupart des systèmes de conversion des énergies PV, il existe un algorithme particulier nommé « maximum power point Tracking ». Cette technique permet de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir.

Plusieurs travaux ont abordé le problème de la recherche du point de fonctionnement permettant de tirer le maximum d'énergie des modules PV en utilisant différentes méthodes MPPT.

Objectif, de notre travail est une contribution pour la compréhension et la mise en place d'une commande MPPT intelligente permettant de traquer la puissance maximale dans différentes conditions atmosphériques.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présenterons quelques généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque ensuite nous donnons une description d'une cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement. Nous terminons ce chapitre par la représentation du modèle électrique d'une cellule photovoltaïque basée sur le modèle à une seule diode.



## **Introduction générale**

---

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le système PV avec la commande MPPT et les différents types des convertisseurs statiques ensuite un aperçu de quelques techniques MPPT sera abordé.

Dans le dernier chapitre, des résultats de simulations d'une chaîne de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT basée sur l'intelligence artificielle sera présentée, effectuées avec le logiciel Matlab®/Simulink.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale résumera les résultats obtenus et quelques perspectives.

## **I.1 Introduction**

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés [1].

## **I.2 Effet photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque (ou photoélectrique) consiste à convertir de la lumière en électricité. Il a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839 et a reçu une application industrielle à partir de 1954. Dont le principe est d'exciter les électrons périphériques de certains atomes d'éléments semi-conducteurs, ce qui va créer un courant électrique [2].

## **I.3 La cellule photovoltaïque**

### **I.3.1 Principe de fonctionnement de la cellule PV**

Une cellule est constituée d'un matériau semi-conducteur tel que le silicium absorbant l'énergie des photons et la transformant en énergie électrique [3]. Le principe de cette conversion repose sur les trois phénomènes suivants :

1. Absorption de la lumière ;
2. Conversion de l'énergie absorbée en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron /trou dans le semi-conducteur ;
3. Collecte des particules générées.

À la lumière, les photons absorbés par les semi-conducteurs apportent une telle énergie qu'ils délogent et mettent en mouvement les électrons de ces matériaux dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique (figure.I.1). Ce principe est appelé la photoconductivité [11].

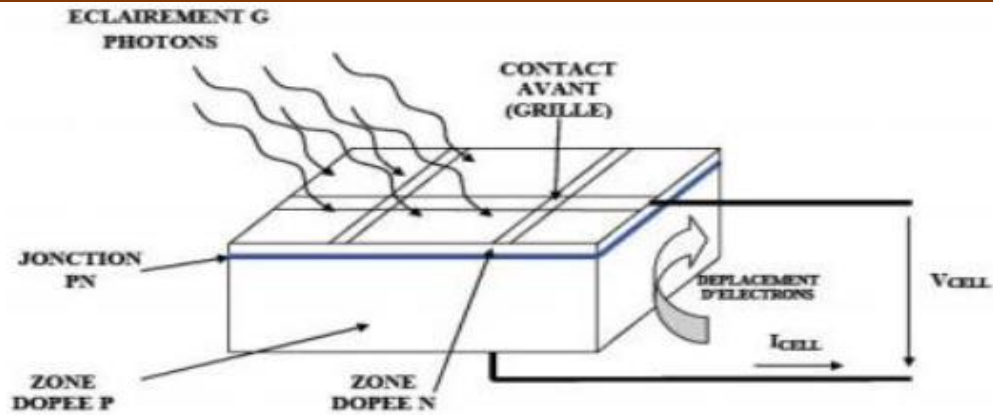


Figure I.1. Présentation schématique d'une cellule solaire.

Le matériau de base le plus utilisé actuellement pour la fabrication des cellules photovoltaïques est le silicium (90 % de la production mondiale). Celui-ci se trouve en très grande quantité sur notre planète puisqu'il constitue environ 28 % de l'écorce terrestre. En fait on le trouve surtout sous forme de dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), nommé aussi silice qui est le constituant principal du sable. Il est donc très abondant et peu coûteux [3].

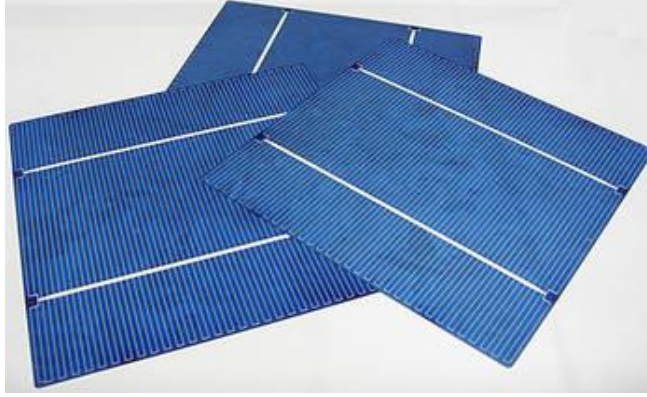
## I.3.2 Les différentes technologies de cellules PV

### I.3.2.1 Première génération

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallines.) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés [4].

#### - Les cellules polycristallines

Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, deux cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux.



**Figure II.2.** Cellule photovoltaïque polycristalline

### **Rendement**

16-18 % (on obtient ainsi une puissance de 160 à 180 Wc par m<sup>2</sup>). Ces cellules restent les plus utilisées du fait du rapport performance/prix.

### **Avantages**

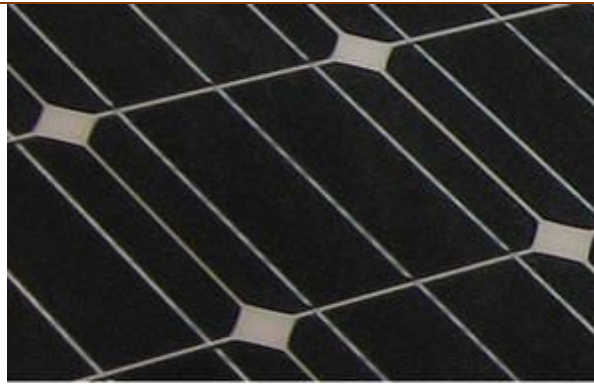
- Rapport performance/prix
- Bon rendement
- Durée de vie importante

### **Inconvénients**

- Faible sous éclairage réduit [5].

#### **- Les cellules monocristallines**

Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en forme général d'un bleu uniforme.



**Figure I.3.** Cellule photovoltaïque monocristalline.

### **Rendement**

17-20 % (on obtient ainsi une puissance de 170 à 200 W par m<sup>2</sup>). Sans entrer dans le détail, si aujourd'hui les cellules sont de types AI-BFS (aluminium back surface Field), l'évolution vers de cellules PERC (passivated emitter and rear cell) permettra prochainement de monter à 23 % tandis que les cellules à hétérojonctions promettent déjà d'atteindre les 26 % (26.6 % déjà obtenu en laboratoire).

### **Avantages**

- Très bon rendement
- Durée de vie importante

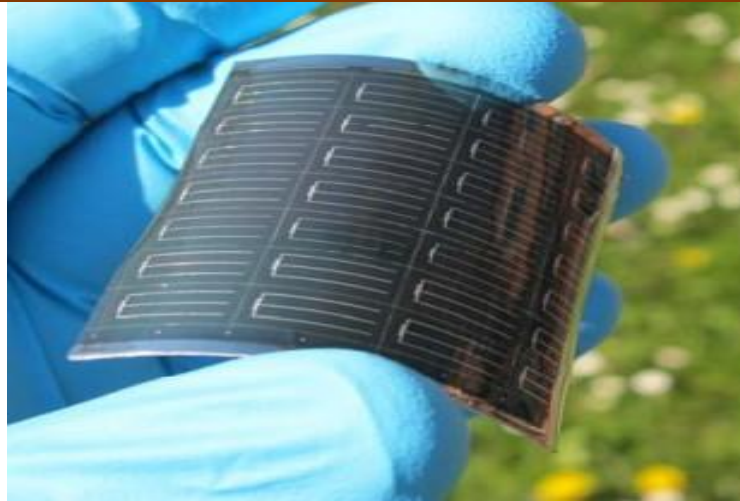
### **Inconvénients**

- Coût élevé
- Rendement faible sous éclairage réduit [6].

#### **I.3.2.2 Deuxième génération**

Les nouvelles cellules photovoltaïques qui constituent la deuxième génération de cellules sont composées de peu de silicium. Cela s'explique par l'augmentation du prix de ce matériau.

Ces cellules sont réputées car elles ont été réduites considérablement d'épaisseur. Ce qui explique la facilité des constructeurs à créer des panneaux photovoltaïques très souples, légers et faciles à installer. C'est pour cela que l'on appelle ces cellules des cellules à couches minces, car leur zone d'absorption est de l'ordre de quelques micromètres (200 à 300 μm) [6].



**Figure I.4.** Cellule de deuxième génération [7].

- **Cellules à base de Silicium amorphe**

Les cellules à base de silicium amorphe sont basées sur l'empilement de base constitué par une couche de type p, une couche non dopée dite intrinsèque et notée i, et une couche de type n.

Ces structures pin sont déposées directement sur le support à basse température (200°C ou moins) à partir de la méthode de dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma (appelée PE-CVD pour plasma enhanced-CVD), par décomposition du gaz silane ( $\text{SiH}_4$ ). Il s'agit de technologies largement similaires à celles utilisées dans le domaine des écrans plats. Les cellules solaires au silicium amorphe, à l'origine cantonnées dans des marchés de niches (exemple : calculettes) ont élargi leur champ d'application dans le domaine des modules souples que l'on peut déployer sur les grandes toitures, fabriqués par les technologies en rouleau (roll to roll) sur des supports plastiques ou métalliques, et dans celui des supports verre de grande surface pouvant aller jusqu'à près de 5,7 m<sup>2</sup> d'un seul tenant [6].

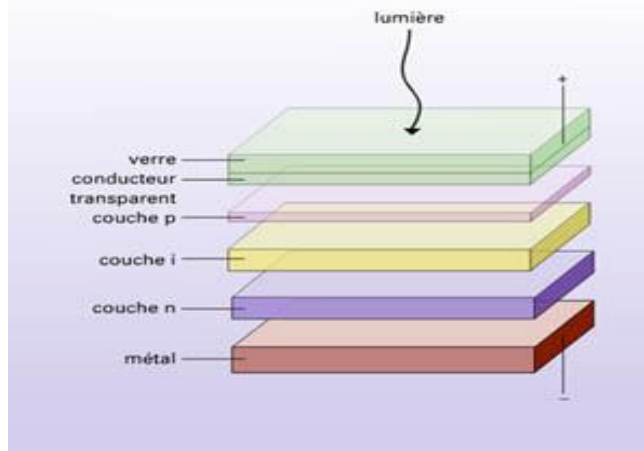


Figure I.5. Cellule au silicium amorphe [6].

#### - Cellules à base de tellure de cadmium

Les cellules à base de CdTe sont également basées sur la formation de jonction p-n mais cette fois-ci par la mise en contact de deux matériaux différents, on parle alors d'hétérojonction. La couche n est un semi-conducteur de grande bande interdite (le CdS avec l'énergie du gap  $E_g$  2,4 eV), qui laisse passer la lumière. On parle alors de couche fenêtre. Les photons sont ensuite absorbés dans la couche de CdTe de type p, appelée absorbeur. La valeur 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbée sur une profondeur de 2  $\mu\text{m}$  autorisant ainsi l'utilisation de matériaux relativement impurs, dont la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ne dépasse pas quelques  $\mu\text{m}$  [8].

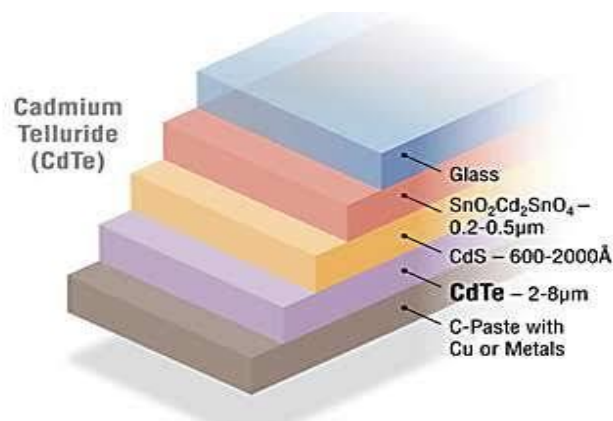
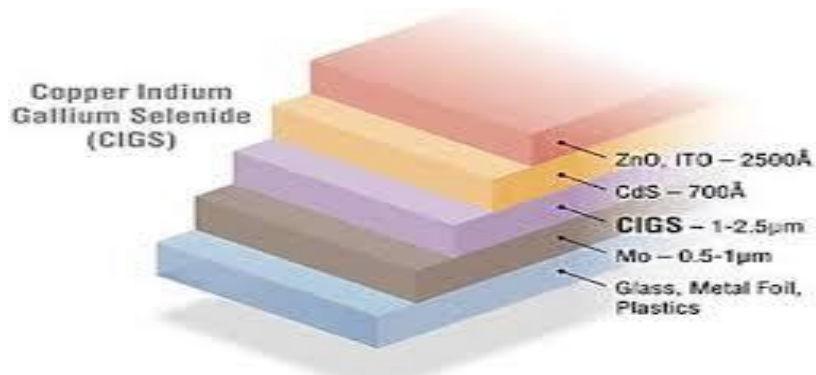


Figure I.6. Décomposition d'une cellule à base de tellure de cadmium [8].

### - Cellules à base de sélénure de cuivre indium gallium

La fabrication des couches de CIS est plus complexe que celles du CdTe du fait de leur caractère ternaire, voire quaternaire (avec le gallium, CIGS), ce qui a nécessité une mise au point plus longue. La contrepartie positive de cette complexité est une grande flexibilité concernant l'optimisation des propriétés. On peut ainsi fixer de façon très modulable, non seulement le gap mais également les autres propriétés (affinité électronique, travail de sortie), en substituant partiellement l'indium avec du gallium, de l'aluminium ou le sélénium par du soufre. L'absorbeur est le CIGS et les couches fenêtres et d'OCT sont constituées de sulfure de cadmium, zinc ou indium (en substitution potentielle du cadmium) et d'oxyde de zinc, dopé aluminium, tandis que le contact arrière est constitué par une couche de molybdène [8].



**Figure I.7.** Décomposition d'une cellule à base de CIGS [8].

#### I.3.2.3 Troisième génération

La disponibilité des matériaux peut être un autre facteur limitant, l'un des inconvénients majeurs des cellules CIGS provient du fait que le sélénium, l'indium et le gallium sont des matériaux dont les ressources sont limitées. Cela entraîne évidemment des coûts de fabrication plus importants car ces matériaux étant rares, ils sont chers. Ceci a par conséquent conduit à l'émergence d'une troisième génération de cellules solaires, encore au stade de développement mais aux perspectives prometteuses pour l'avenir proche.

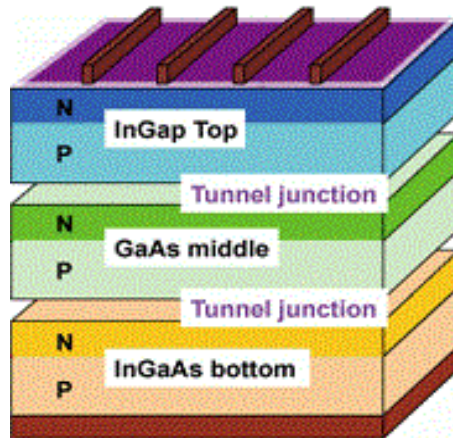
#### - Les cellules multijonctions

Utilisant actuellement majoritairement des alliages dérivés de l'arséniure de gallium GaAs (voir **Figure I.7**)

– une première jonction à grande bande interdite permet de convertir efficacement les photons UV en minimisant les pertes par thermalisation.



- une seconde jonction située immédiatement derrière possède un gap plus petit et convertit alors de façon optimale les photons visibles qui traversent la première jonction.
- une troisième jonction à petit gap convertit les photons infrarouges.

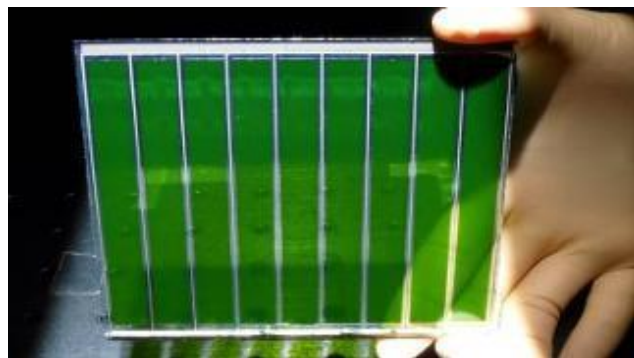


**Figure I.8.** Vue schématique de la décomposition de cellule à multijonctions.

#### - Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Grätzel

Pour les cellules à colorants, il s'agit d'une matrice poreuse inorganique, fonctionnalisée par le greffage de colorants photoactifs à l'échelle de la monocouche moléculaire et imprégnée par un électrolyte liquide contenant un couple oxydoréducteur permettant de communiquer électriquement avec la molécule de colorant.

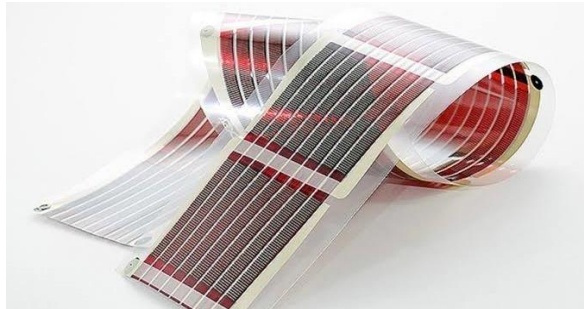
Le système de référence est constitué d'une couche d'oxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) frittée dont les particules sont de taille nanométrique, une molécule de colorant à base de ruthénium et un électrolyte non aqueux (acétonitrile) contenant le couple redox iodo-ioduré [8].



**Figure I.9.** Cellule nanocristalline à colorant [9].

### - Cellules organiques

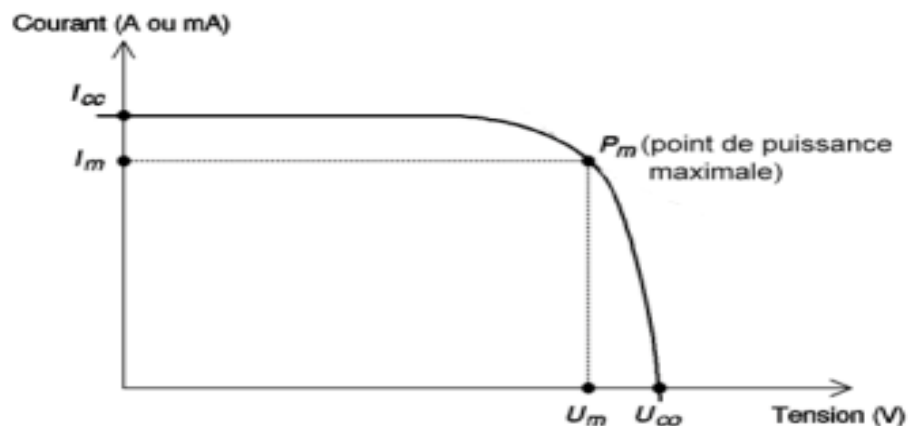
Une des filières émergentes est celle des cellules tout organiques. Dans ce cas, on se sert de la propriété semi-conductrice de certains polymères, permettant ainsi de créer des jonctions analogues aux jonctions p-n, et donc d'en faire des cellules solaires. Le saut a été franchi avec l'idée de mélanger intimement deux matériaux organiques permettant ainsi aux excitons (paires électron-trou créées lors de l'excitation lumineuse) d'être plus facilement séparés aux nombreuses interfaces. Le concept de cellules organique à jonction interpénétrée était né (BulkHeterojunction). Le système de base montré sur la **Figure I-19** est celui où le donneur est constitué par des molécules de fullerène fonctionnalisées et l'accepteur est un polymère dérivé du polythiophène [8].



**Figure I.10.** Cellule organiques

### I.3.3 Caractéristiques électriques d'une cellule PV

Les cellules photovoltaïques sont des générateurs d'énergie électrique de base définis par leurs courbes caractéristiques courant-tension (Figure I.11). Il représente le courant qu'il produit en fonction de la tension du court-circuit au circuit ouvert.



**Figure I.11.** Courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque [13].

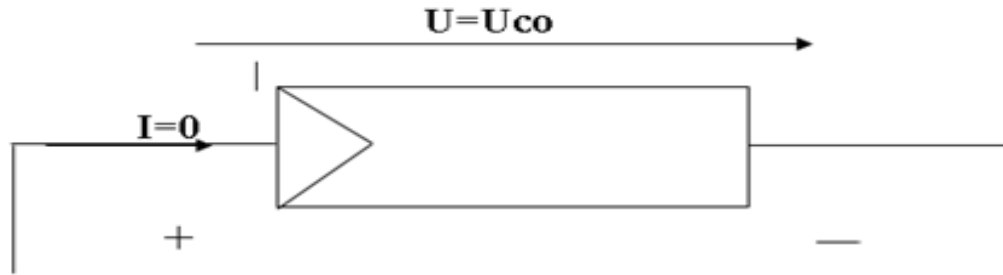
Cette courbe est propre à chaque type de matériau photovoltaïque. Par exemple une cellule en silicium amorphe aura une tension plus élevée qu'une cellule en silicium cristallin, mais son courant sera nettement plus faible en raison de sa moins bonne collecte et de sa faible épaisseur [12]. Cependant, il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ mille fois supérieur à celui du silicium cristallin. Une fine couche de  $0,3 \mu\text{m}$  ( $= 0,0003 \text{ mm}$ ) est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible [13].

### ✚ Points de fonctionnement idéaux

Chaque point de la courbe courant-tension définit un point de fonctionnement de la cellule. Deux points de fonctionnement idéaux (court-circuit et circuit ouvert) doivent être distingués :

- **Tension de circuit ouvert  $U_{co}$**

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule  $P = U * I$  est nulle (voir Figure I.13).



**Figure I.12.** Cellule photovoltaïque en circuit ouvert

- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle positif + est relié au pôle négatif - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule  $P=U*I$  est nulle (voir Figure I.13).

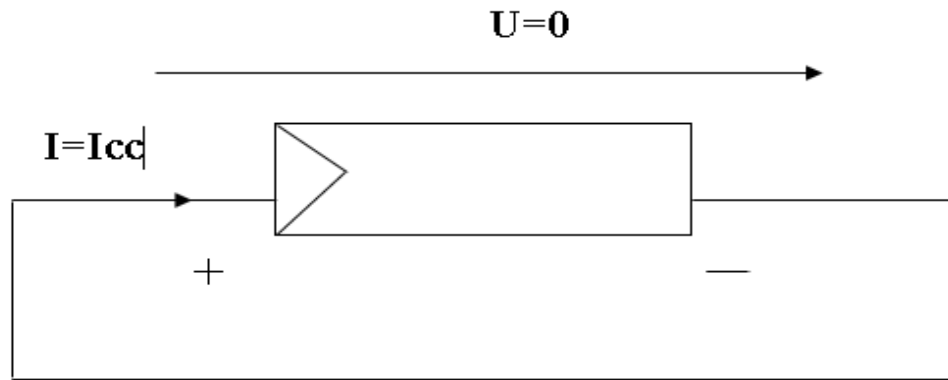


Figure I.13. Cellule photovoltaïque en court-circuit.

- **Facteur de forme FF**

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de forme (facteur de remplissage) ou fill factor (ff). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} * U_{co}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot U_{co}} \quad (I.1)$$

- **Rendement de conversion  $\eta$**

On parle souvent de rendement de conversion pour des cellules photovoltaïques, ce terme correspond à la capacité de la cellule à transformer l'énergie des photons qui la percutent. Ces mesures sont aujourd'hui normalisées. Les cellules solaires sont donc testées par les constructeurs sous un spectre lumineux artificiel correspondant à un spectre solaire typique AM1.5 (soit à l'irradiation totale reçue sur le sol terrestre à une altitude de  $0^\circ$  avec un angle de  $48^\circ$ ) sous une température fixe de  $25^\circ\text{C}$ . Pour simplifier, cette convention a permis de normaliser les rendements donnés dans les notices des capteurs afin de pouvoir les comparer. [14].

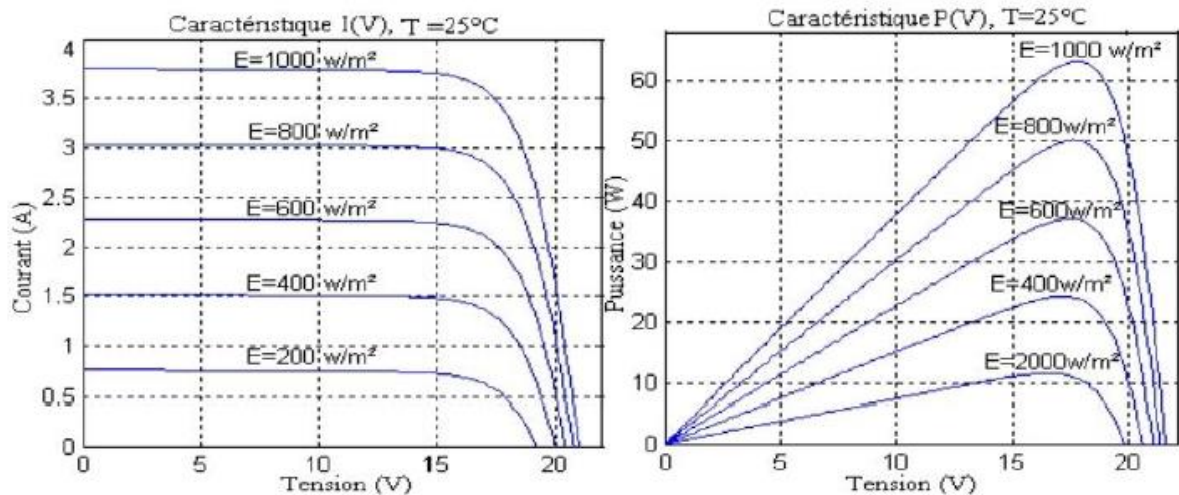
Le rendement  $\eta$  d'un photo-générateur est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par le photo-générateur selon l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{FF \cdot I_{\text{cc}} \cdot V_{\text{co}}}{P_{\text{in}}} \quad (\text{I.2})$$

## I.4 Influence de l'ensoleillement et la température sur le fonctionnement de la cellule PV

### I.4.1 Influence du flux lumineux

La caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement. A une température constante, l'augmentation du flux lumineux (ensoleillement) se traduit par un déplacement de la caractéristique  $I(V)$  suivant le sens positif de l'axe des courants [15].



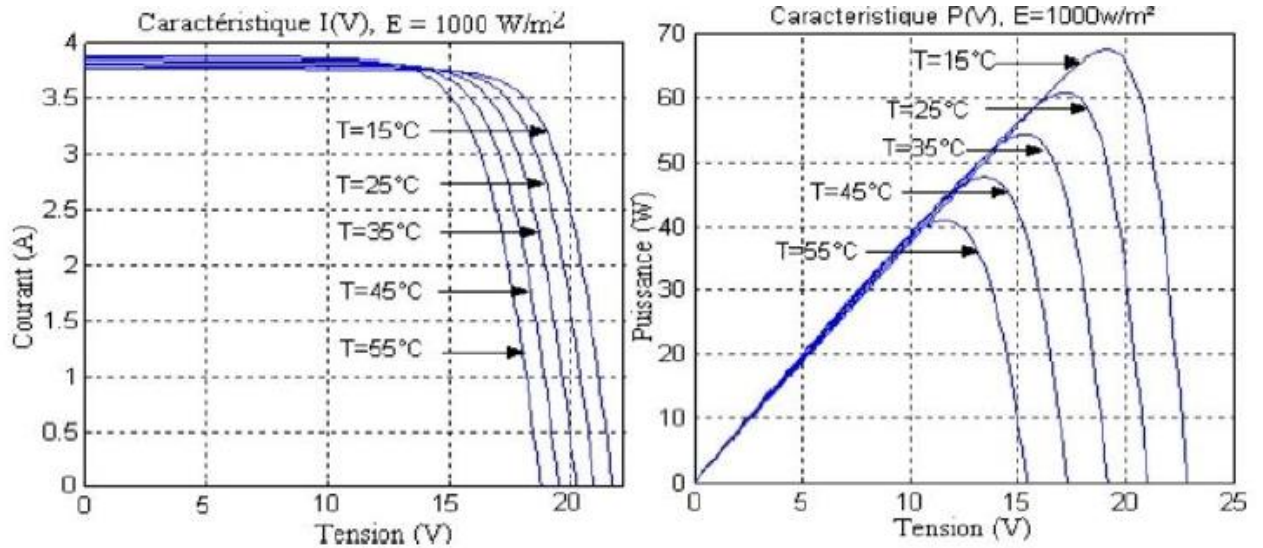
**Figure I.14.** Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un module pour différentes irradiances solaires à 25°C [16].

L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [15].

### I.4.2 Influence de la température

Si la température de la cellule augmente, le photo-courant augmente également due principalement à la diminution du largeur de la bande interdite du matériau.

Cette augmentation est de l'ordre de 0,1% par degré (Kelvin). Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite et entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 mV par cellule [15].



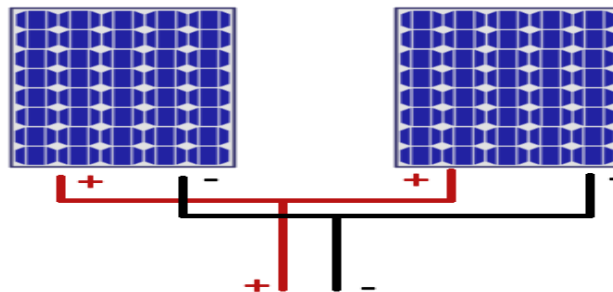
**Figure I.15.** Influence de la température sur la caractéristique I (V) et P(V) pour une irradiation solaire de 1000W/m<sup>2</sup> [16].

## I.5 Association des cellules photovoltaïques

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera.

### I.5.1 Association des cellules photovoltaïques en parallèle

Dans un groupement en parallèle, les cellules sont traversées par la même tension et la caractéristique résultante du groupement en parallèle est obtenue par addition des courants à tension donnée [14].



**Figure I.16.** Association de deux panneaux en parallèle [17].

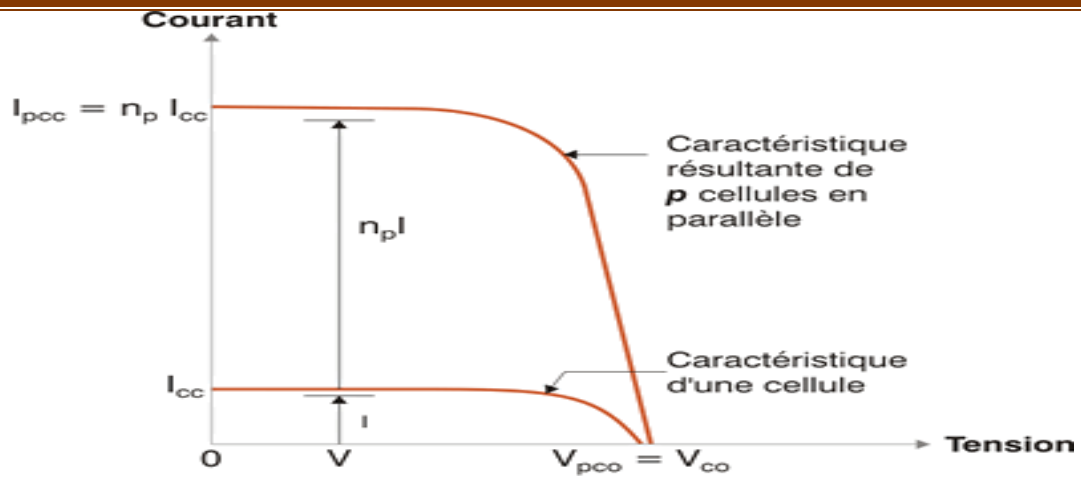


Figure I.17. Caractéristique courant tension du raccordement en parallèle des cellules PV [18].

**I.5.2 Association des cellules photovoltaïques en série**

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [14].

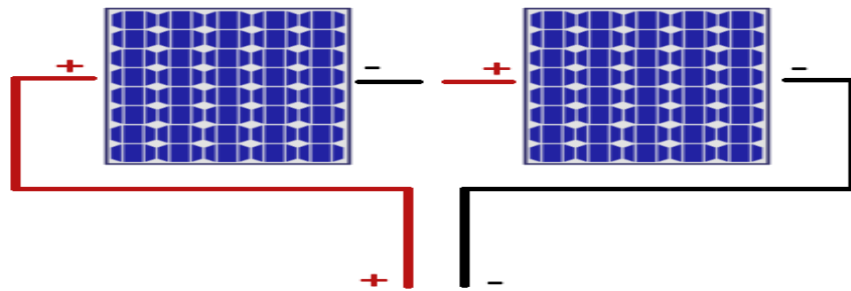


Figure I.18. Association de deux panneaux en série [17].

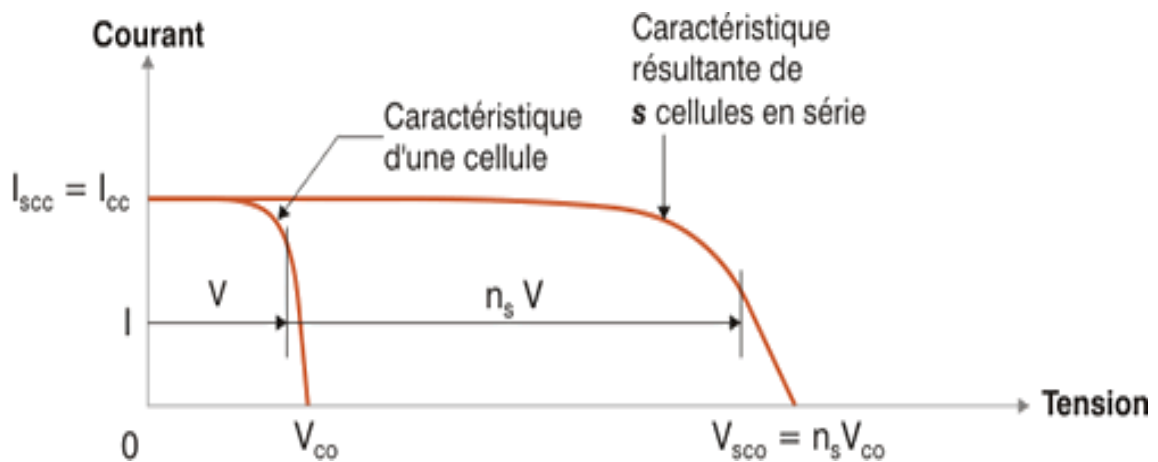
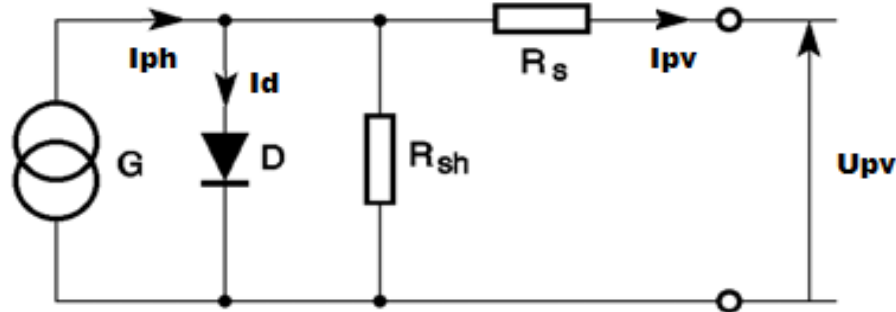


Figure I.19. Caractéristique courant tension du raccordement en série des cellules PV [18].

**I.6 Le modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque**

Les cellules photovoltaïques peuvent être modélisées comme des générateurs de courant. En effet, le courant est constant, pas la tension. Sous forme de schéma électrique, une cellule photovoltaïque peut être représentée comme suit :



**Figure. I.20.** Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque [10].

*G* : est une source de courant parfait.

*I<sub>ph</sub>* : Le photo-courant.

*D* : est une diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un sens.

*R<sub>sh</sub>* : est une résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui interviennent entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

*R<sub>s</sub>* : est une résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance intrinsèque des couches, résistance des contacts) [10].

*I<sub>pv</sub>* : Le courant produit par la cellule photovoltaïque.

*U<sub>pv</sub>* : La tension aux bornes de la cellule photovoltaïque.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur le circuit de la figure I.3 on obtient l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{U_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{U_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \tag{I.3}$$

Avec

$$I_{ph} = (I_{sc, cell} + K_i(T - T_r)) \frac{E}{E_r} \tag{I.4}$$

Et



$$I_0 = \frac{I_{sc,cell} + K_i(T - T_r)}{\exp\left(\frac{V_{oc,cell} + K_v(T - T_r)}{V_m}\right) - 1} \quad (I.5)$$

Avec

$$\Delta T = T - T_r \quad (I.6)$$

Et

$$T = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \cdot E \quad (I.7)$$

$$\frac{V_t = kT}{q} \quad (I.8)$$

D'où :

$I_s$  : Le courant de court-circuit nominal de la cellule [A]

$V_s$  : La tension de circuit ouvert nominal de la cellule [V]

$K_i$  : Le coefficient de température de court-circuit [%/°K]

$K_v$  : Le coefficient de température de circuit ouvert [%/°K]

$V_t$  : La tension thermique [V]

$I_0$  : Le courant de saturation de la diode [A]

$I_{rs}$  : Le courant inverse de saturation de la diode [A]

$k$  : Constant de Boltzmann =  $1.38 \cdot 10^{-23}$  [J/K]

$q$  : La charge élémentaire de l'électron =  $1.602 \cdot 10^{-19}$  [C]

$T$  : La température absolue de la cellule [K]

$T_r$  : La température de référence [K]

$T_a$  : La température ambiante de la cellule [K]

$NOCT$  : La température de fonctionnement nominale de la cellule [K]

$E$  : L'éclairement absolu [ $W/m^2$ ]

$E_r$  : L'éclairement dans les conditions de test standard (STC) [ $W/m^2$ ].

$E_g$  : L'énergie de  $gap$  = 1.12 eV pour le silicium

$n$  : Le facteur d'idéalité de la jonction P-N, sa valeur dépend de la technologie utilisée.

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le principe de conversion de la lumière en électricité et les différentes technologies de la cellule photovoltaïque ainsi ses caractéristiques : courant - tension et puissance- tension qui varient en fonction de la température et d'ensoleillement d'où on a conclu que :

- ✓ La tension de circuit ouvert  $U_{co}$  diminue avec l'augmentation de la température. Par contre, la variation du courant de court-circuit est négligeable.
- ✓ La valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions.

## II.1 Introduction

Selon son application, l'énergie photovoltaïque est soit utilisée directement par la charge, soit stockée temporairement, soit injectée directement dans le réseau. La production de cette énergie est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque (PV) ne coïncide pas toujours avec le point à maximum de puissance.

Les chaînes de conversion d'énergie photovoltaïque fonctionnent sur une large gamme de tensions de sortie, mais ne peuvent fournir une puissance maximale qu'à un point spécifique appelé point de puissance maximale (MPP). Le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépend à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module puisse fournir sa puissance maximale, il faut une adaptation en permanence de la charge. [19]

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) dont le rapport cyclique est commandé par un mécanisme de poursuite « Maximum Power Point Tracking» (MPPT) [19].

## II.2 Connexion directe

Le système le plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un générateur photovoltaïque GPV et d'une charge qui utilise directement l'énergie produite du GPV. Cette énergie est dépendante fortement de l'éclairement, de la température et de la nature de la charge.

La connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre, son coût minimal dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût.

L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de réglage de fonctionnement. Le transfert de la puissance optimale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti.

La connexion directe du générateur photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu. Il faut s'assurer, auparavant, que la charge accepte bien la connexion directe au générateur photovoltaïque : c'est le problème de dimensionnement.

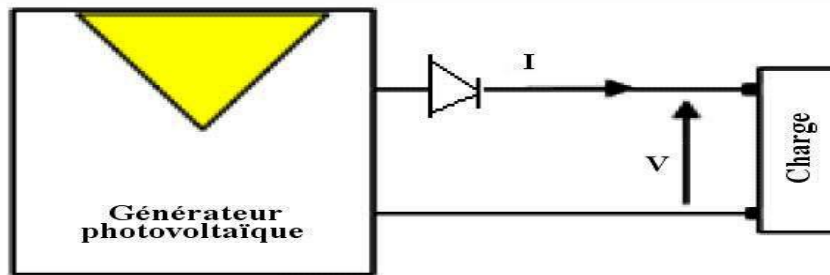


Figure II.1. Principe du couplage direct.

Le point de fonctionnement du GPV résulte de l'intersection entre la caractéristique I(V) du GPV et la caractéristique I(V) de la charge. Comme la montre la figure (II-3). Trois types de charges DC typiques existe :

- Une charge purement résistive.
- Une charge de type source de tension continue.
- Une charge de type source de courant continu.

Sur la Figure II.2, nous avons représenté les caractéristiques I-V et P-V d'un GPV ainsi que les caractéristiques I-V des trois types de charges.

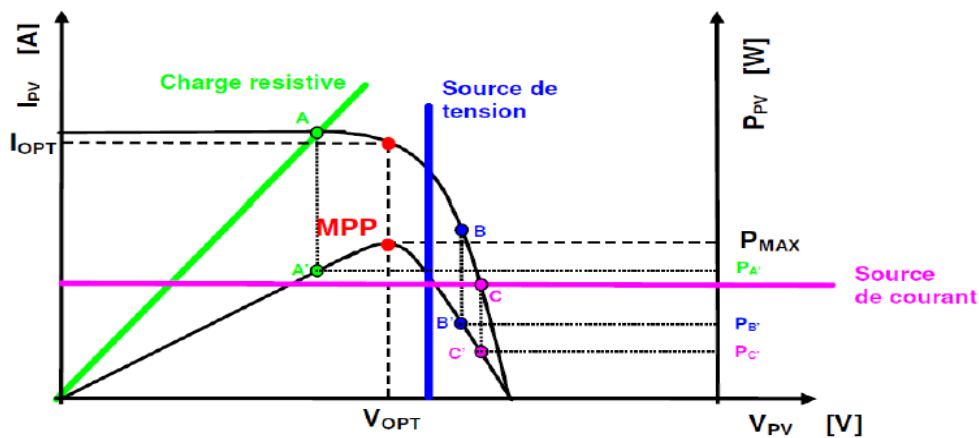


Figure II.2. Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.

Nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale : point M pour un courant optimal ( $I_{OPT}$ ) et une tension optimale ( $V_{OPT}$ ).

Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques I – V du générateur et celles des trois types de charges :

- Point A pour une charge résistive,
- Point B pour une charge de type source de tension et Point C pour une charge en source de courant, correspondants à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible  $P_{OPT}$ .

Donc, une perte d'une partie de la puissance délivrable aux bornes du générateur PV peut se produire, ce qui implique à des pertes de production énergétique importantes. Ceci n'est pas observé, dans tous les cas de connexion directe GPV Charge.

### II.3 Système PV avec commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque.

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque. C'est un système qui contrôle le courant et la tension afin d'obtenir une production d'énergie maximale à chaque période de la journée.

#### II.3.1 Structure du système PV

Le schéma synoptique d'un système photovoltaïque est en général représenté avec une commande MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du GPV, doté d'étage d'adaptation entre le GPV et la charge en sortie. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments. L'adaptateur communément utilisé pour un générateur PV est un convertisseur statique (convertisseur DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit maximale à ses bornes ( $P_{max}$ ).

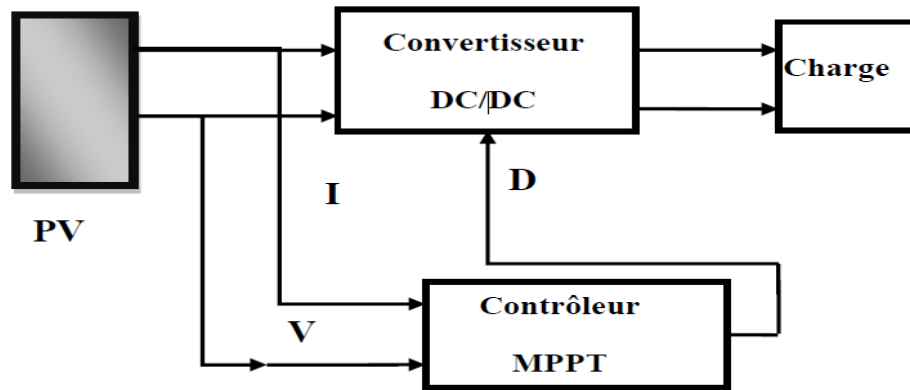


Figure II.3. Système photovoltaïque. [20]

### II.3.1.1 Panneau Photovoltaïque

Le panneau PV ou (champ PV) se compose de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement et température. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [21].

### II.3.1.2 La charge

La charge est l'équipement électrique alimenté par le système, elle peut être de type continue comme des équipements (télécommunication, moteur à courant continu...) ou bien de type alternatif dans les cas d'usage domestique (maison solaire) ce cas nécessite un onduleur.

### II.3.1.3 Convertisseur DC/DC (hacheur)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant 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). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. Il se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ont un bon rendement, ils ne consomment aucune puissance active [22].

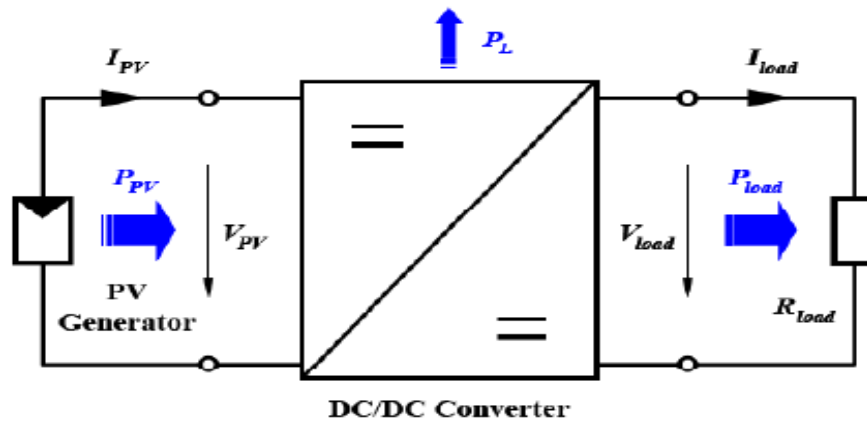


Figure II.4. Convertisseur DC/DC.

On distingue trois types des de convertisseur DC/DC :

- Hacheur abaisseur « Buck Converter ».
- Hacheur élévateur « Boost Converter ».
- Hacheur abaisseur élévateur « Buck-Boost Converter ».

➤ **Hacheur Buck (série)**

Le hacheur série (Figure II.5), hacheur abaisseur ou bien dévolteur est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant

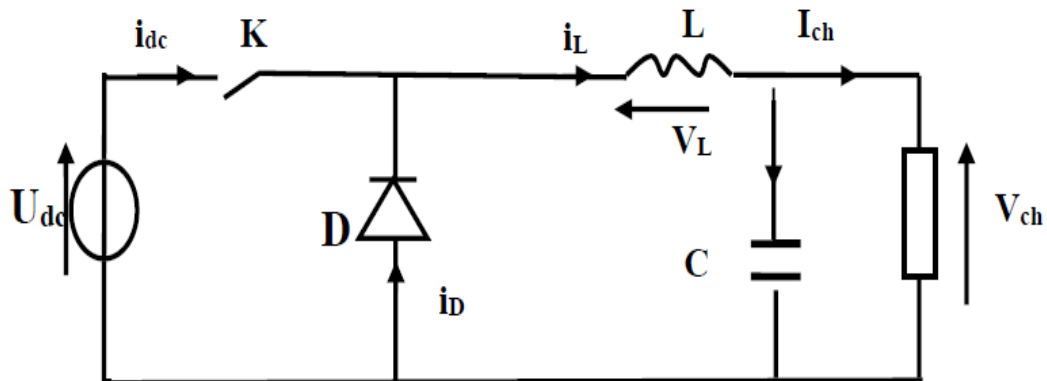


Figure II.5 : hacheur série(Buck).

### ➤ Hacheur Boost (parallèle)

Le hacheur élévateur il permet l'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge afin d'extraire la puissance maximale du générateur et cela en agissant sur le rapport cyclique de l'interrupteur de puissance qui est calculé par une des techniques de maximisation de puissance.

Un convertisseur boost, ou hacheur parallèle, montré sur la Figure II.6, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue

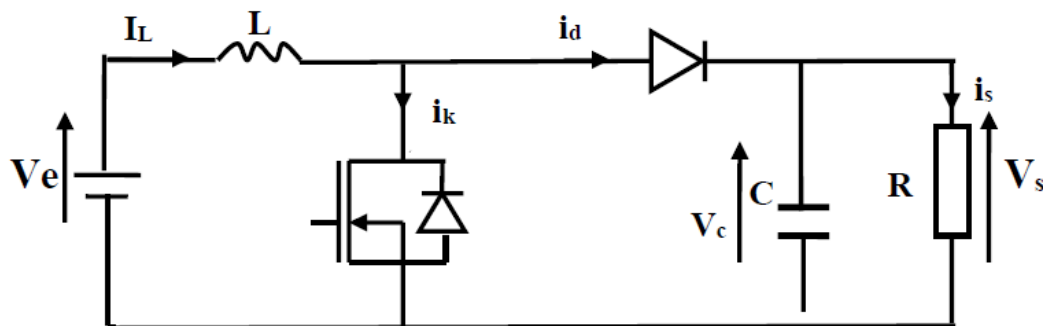


Figure II.6. Hacheur parallèle (Boost).

### ➤ Hacheur Buck-Boost

Hacheur abaisseur-élévateur est aussi appelé dévolteur-survolteur ou de type Buck-Boost (Figure II.7). Le hacheur abaisseur-élévateur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs Buck et boost.

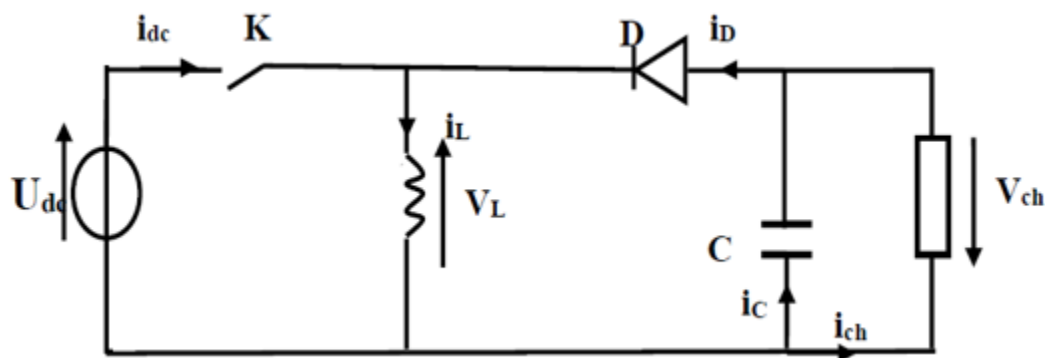


Figure II.7. Hacheur Buck-Boost.



### II.3.1.4 Commande MPPT

La technique MPPT est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Une commande MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque, de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge [23].

Le principe de la commande est de faire varier le rapport cyclique  $D$  automatiquement jusqu'à ce que l'on obtienne la valeur optimale de manière à maximiser la puissance du panneau photovoltaïque. Plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum. [24].

## II.4 Les Différents algorithmes MPPT classique

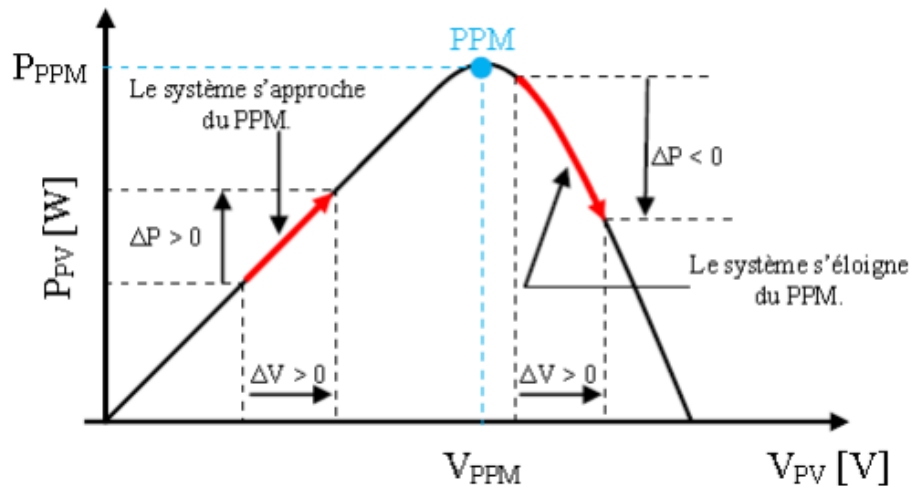
Parmi les techniques de contrôle classiques employées pour la poursuite du point de puissance on trouve :

- Méthode de perturbation et observation.
- Méthode d'incrémentement de l'inductance.

### II.4.1 Méthode Perturbatin et Observation (P&O)

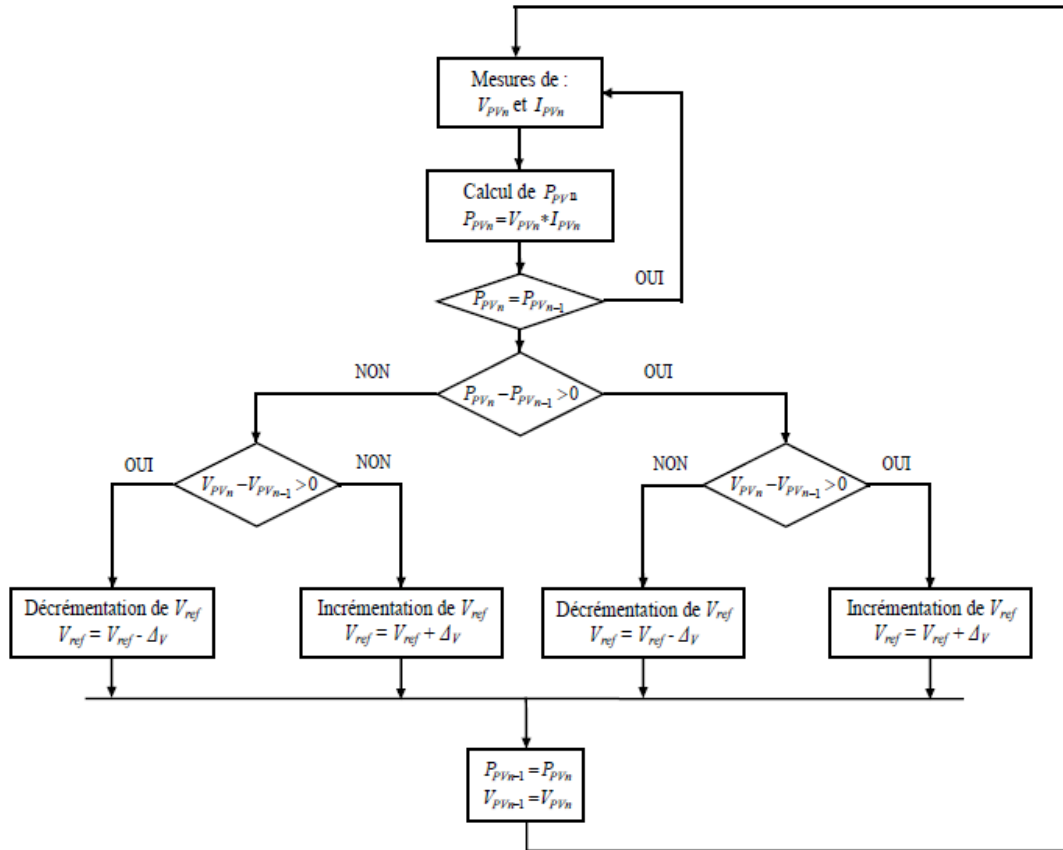
L'algorithme consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte.

Comme illustré à la figure II.9, on peut observer que si une incrémentement positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Au contraire, si la puissance décroît, le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , on peut facilement situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de le faire converger vers le maximum de puissance en imposant une valeur appropriée au courant de sortie du module PV [25].



**Figure II.8.** Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation.

La figure II.10 représente l'algorithme utilisé, associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.



**Figure. II.9 :** Organigramme de l’algorithme P&O.

Le principe de cet algorithme est d’effectuer une perturbation sur la tension du générateur photovoltaïque tout en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le générateur photovoltaïque 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 de puissance maximale (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 [26].

Le système oscille alors autour du MPP, ce qui provoque des pertes de puissance. L’oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la perturbation. Cependant, une taille de perturbation trop petite ralentit considérablement la poursuite du MPP. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité. La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation [26].

### II.4.2 Méthode incrément de conductance (IncCond)

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes

$$G = \frac{I}{V} \quad (\text{II.1})$$

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

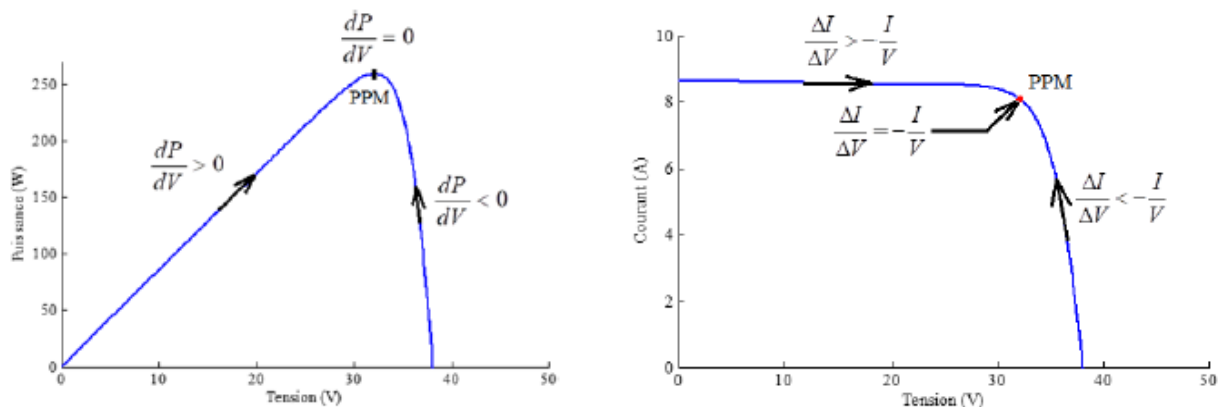
$$dG = \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.2})$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du GPV par rapport à la tension donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite.

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

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

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



**Figure II.10.** Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance  $G$  et de la puissance  $P$ .

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (II.2) et la dérivée de la puissance  $\frac{dP}{dV}$  peut-être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{II.3})$$

D'où, on peut écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance.

Si  $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$  : Le point de fonctionnement est situé à gauche du PPM, donc on augmente la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en diminuant le rapport cyclique  $\alpha$ .

Si  $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$  : Le point de fonctionnement est sur le PPM, donc la tension et le rapport cyclique  $\alpha$  restent constants.

Si  $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$  : Le point de fonctionnement est situé à droite du PPM, donc on diminue la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en augmentant le rapport cyclique  $\alpha$ .

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance  $\frac{I}{V}$  avec celle de l'incrément de conductances  $(\frac{\Delta I}{\Delta V})$ , comme illustre la figure II.12

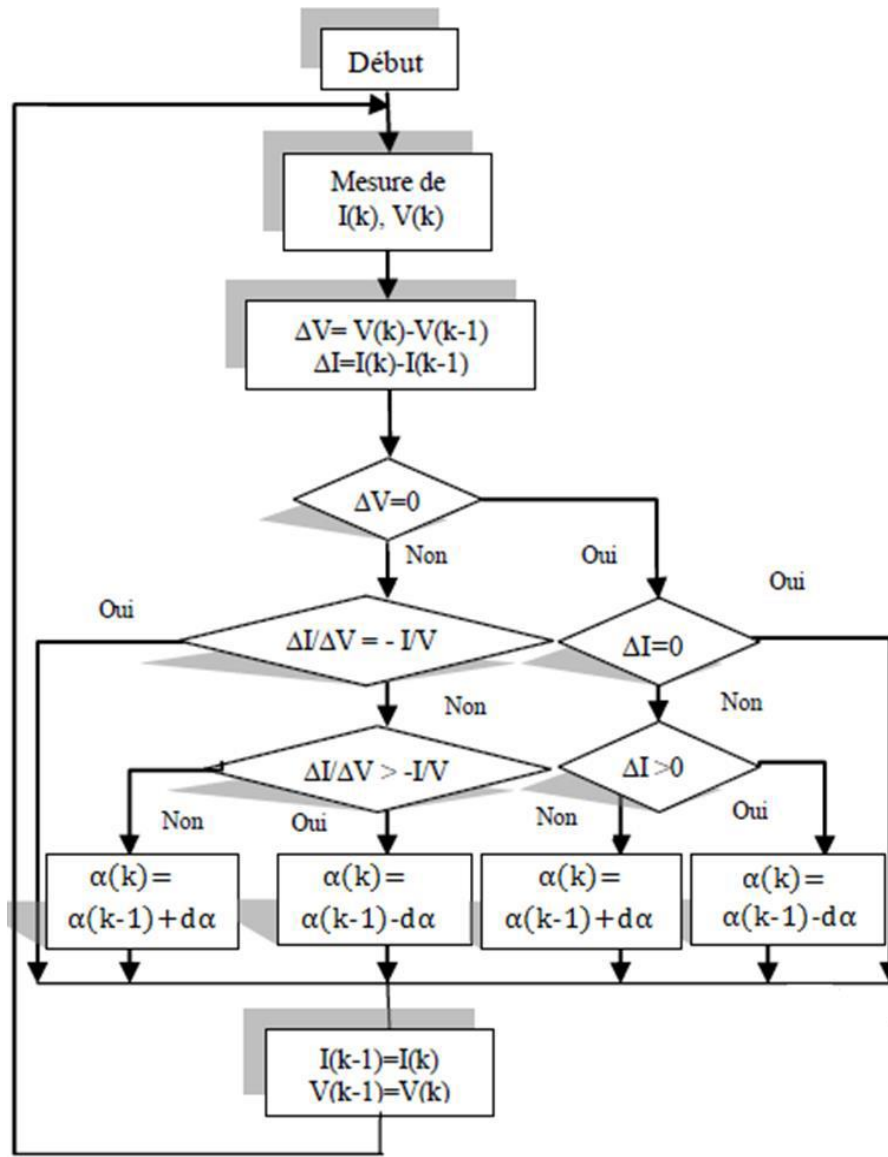


Figure II.11. Organigramme de l'algorithme Inc-Cond [26]

## II.5 Technique moderne de poursuite de Point de puissance maximale

### II.5.1 Commande MPPT à base de réseaux de neurones

Un neurone est une fonction non linéaire, paramétrée, à valeurs bornées. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire ; Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont ou à chacune de ces entrées est associée un poids  $w$ , représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones aval. [27] (voir la Figure II.13)

La nouvelle technique qui choisit la poursuite du point de puissance maximale est la méthode neuronale qui consiste en trois étapes, Nous allons l'appliquer pour approximer les sorties qui sont la puissance maximale (Pmax), le courant et la tension qui correspondent à cette puissance, en fonction des changements d'illuminations et de la température, c'est le suivi de la variation du point de puissance maximale. Où notre système doit pouvoir évoluer, rapidement et efficacement. [28]

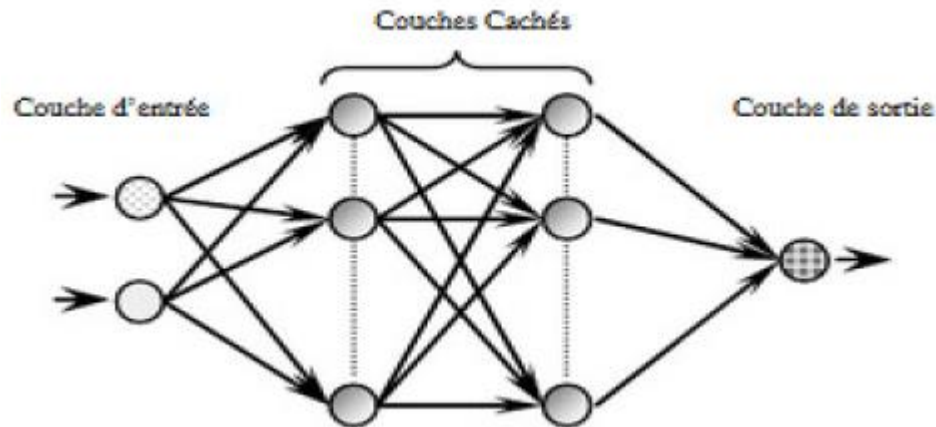


Figure II.12. Exemple de réseau de neurones. [29]

### II.5.2 Commande MPPT à base de la logique floue

Elle est basée sur la théorie de la logique floue, c'est une logique qui substitue à la logique binaire une logique fondée sur des variables pouvant prendre, outre les valeurs (vrai 1) ou (faux 0), les valeurs intermédiaires «vrai » ou « faux » avec une certaine probabilité (un certain degré d'appartenance). [32]

#### II.5.2.1 Théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous est un pas vers un rapprochement entre la précision des mathématiques classiques et le mode réel, c'est le premier rapprochement du concept d'incertitude développé par des chercheurs américains, mais ce n'est qu'en 1965 que le professeur L. Zadeh, automaticien de réputation internationale a proposé les bases théoriques de cette logique dans un article intitulé « fuzzy set » [34].

II.5.2.1.1 Ensemble flou

La théorie des sous-ensembles flous est une théorie mathématique développée pour l'imprécision relative à certaines classes d'objets et sert de fondement à la logique floue.

On note « X » un ensemble de référence ou univers de recherche et « x » un ensemble de « X ». On dit qu'une partie A de l'ensemble de référence X est un ensemble flou lorsqu'elle est définie de la manière suivante alors :

$$A = \{(x, u_A(x)) \mid x \in X\} \tag{III.1}$$

Où  $u_A \rightarrow [0,1]$ , est la fonction d'appartenance d'un ensemble flou « A ».

II.5.2.1.2 Fonction d'appartenance

Chaque sous-ensemble flou est défini par sa « fonction d'appartenance ». Ce dernier permet de mettre en évidence les nuances d'appartenance pour les éléments de l'univers de discours.

*Définition :* Soit X un ensemble. Un sous-ensemble flou A de X est défini par une fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  sur X à valeurs dans l'intervalle [0, 1] [35].

Il existe plusieurs types de fonction d'appartenance, parmi lesquelles on cite les fonctions les plus utilisées :

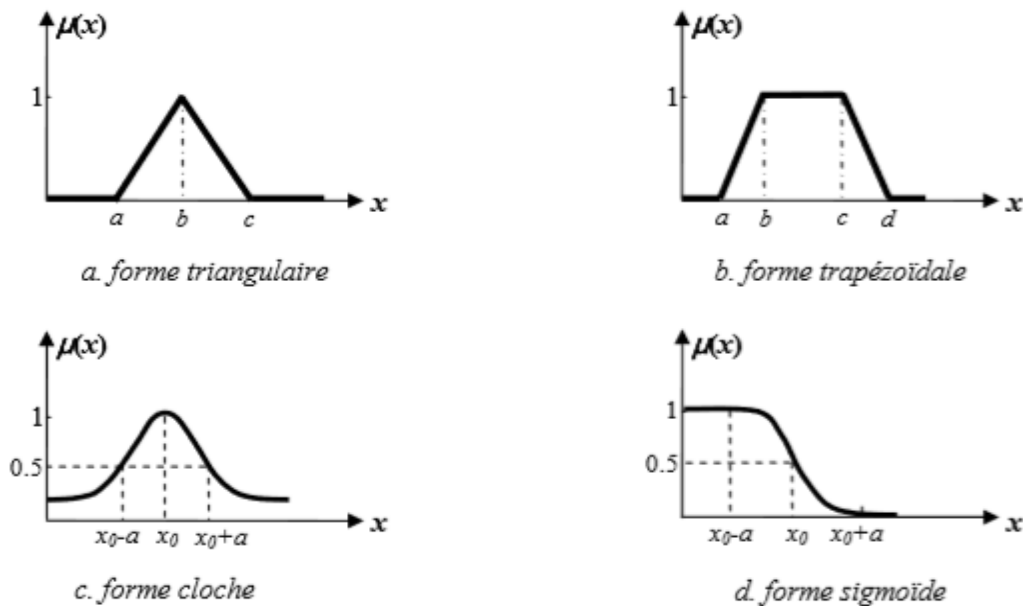


Figure II.13. Les formes de fonction d'appartenance.



### II.5.2.1.3 Raisonnement en logique floue

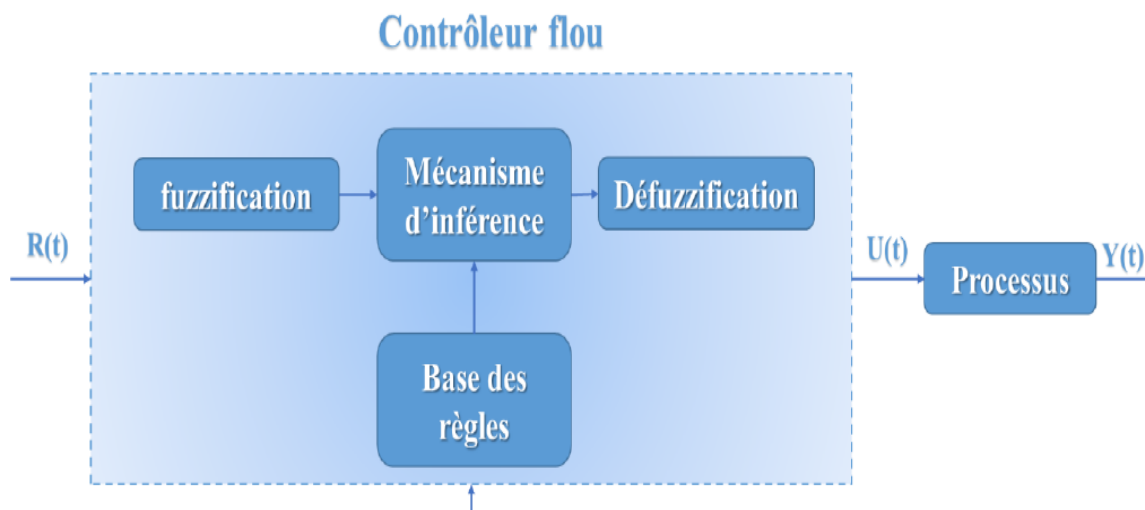
La base utilisée sous forme règle flou, appelée règle d'inférence exprimée par la décision de connaissance humaine sous forme :

*SI* (permisse) *ALORS* (conclusion).

Pour plusieurs conditions nommées prémisses, la combinaison entre elle se fait avec des opérateurs ET, OU, NON.

### II.5.2.2 Structure d'un contrôleur flou

Le contrôleur flou comporte essentiellement quatre parties ; un bloc de fuzzification, une base des règles, un mécanisme d'inférence et un bloc de défuzzification.



**Figure II.14** Structure générale d'un contrôleur flou. [33]

**R(t)** : est le signal de référence.

**U(t)** : est le signal de commande.

**Y(t)** : est la sortie du système à commander.

#### ➤ Fuzzification

L'opération de fuzzification permet d'assurer le passage des grandeurs physiques à l'entrée du régulateur flou en variables linguistiques qui peuvent être traitées par le

mécanisme d'inférence. Il s'agit de calculer les degrés d'appartenance des variables d'entrée aux sous-ensembles qui leur sont associés.

➤ **Base de règle**

Une règle floue peut être définie comme étant l'ensemble d'implications. Elle exprime le lien entre les variables linguistiques d'entrée et celles de la sortie. La forme typique d'une règle floue est :

Si <Conditions liées par des opérateurs flous> Alors <Action > La première partie (conditions de la règle) teste la validité de certaines conditions, et la deuxième (conclusion de la règle) exprime la réaction souhaitée en fonction de la validité de la première partie.

➤ **Le mécanisme d'inférence**

Permet de calculer les ensembles flous associés à la commande, le mécanisme d'inférence calcule le sous-ensemble relatif à la commande du système. Il existe différentes méthodes d'inférence :

- Méthode d'inférence (Max-Min).
- Méthode d'inférence (Max-Produit).
- Méthode d'inférence (Somme-Produit).

➤ **Défuzzification**

Dernière étape de la logique floue, elle a pour objectif de transformer la courbe d'activation finale obtenue lors de l'étape d'agrégation en une valeur réelle.

Plusieurs méthodes sont applicables pour obtenir la valeur retenue de la variable à prédire l'une de ces méthodes les plus utilisées est la méthode de centre de gravité : la sortie correspond à l'abscisse du centre de gravité de la surface de la courbe de résultat.

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les types de convertisseur DC/DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ce convertisseur est utilisé comme un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge. Ensuite nous avons cité les différents algorithmes MPPT classiques et modernes.

Dans le prochain chapitre, nous allons décrire une des techniques de l'intelligence artificielle à savoir la logique floue que nous allons associer à la commande MPPT.

### III.1. Introduction

Le but de la commande MPPT, est d'agir sur le rapport cyclique du convertisseur statique pour atteindre le PPM quel que soit les variations des conditions météorologiques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la simulation d'une chaîne de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT à base de logique flou à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

### III.2. Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque

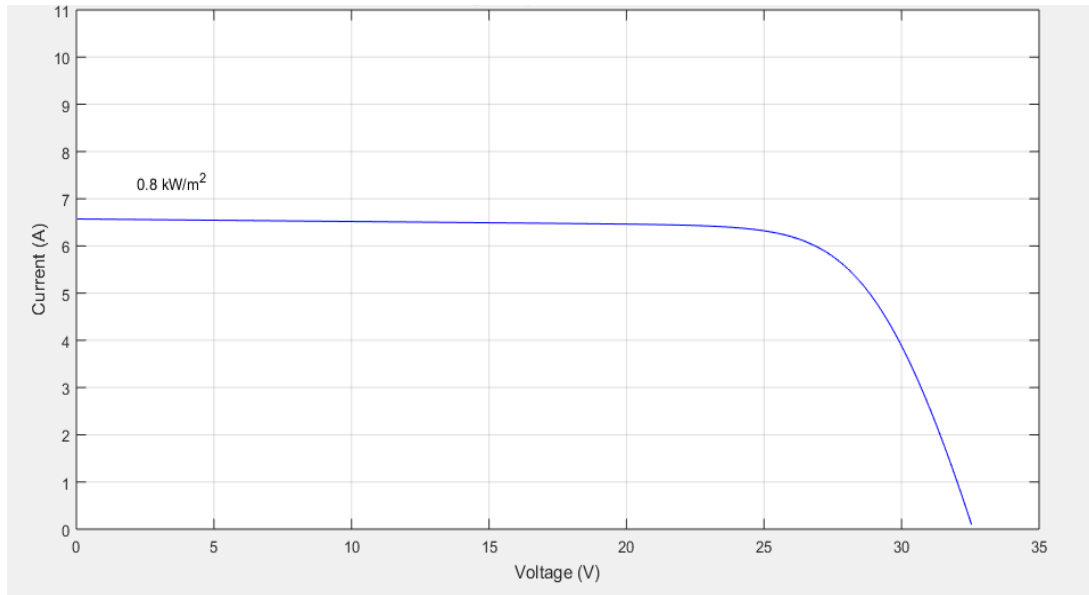
#### III.2.1 Simulation du panneau PV

Pour réaliser la simulation du panneau PV, nous avons choisi un module photovoltaïque Kyocera Solar KC200GT. Ces paramètres sont rassemblés dans le tableau (Tab.III.1)

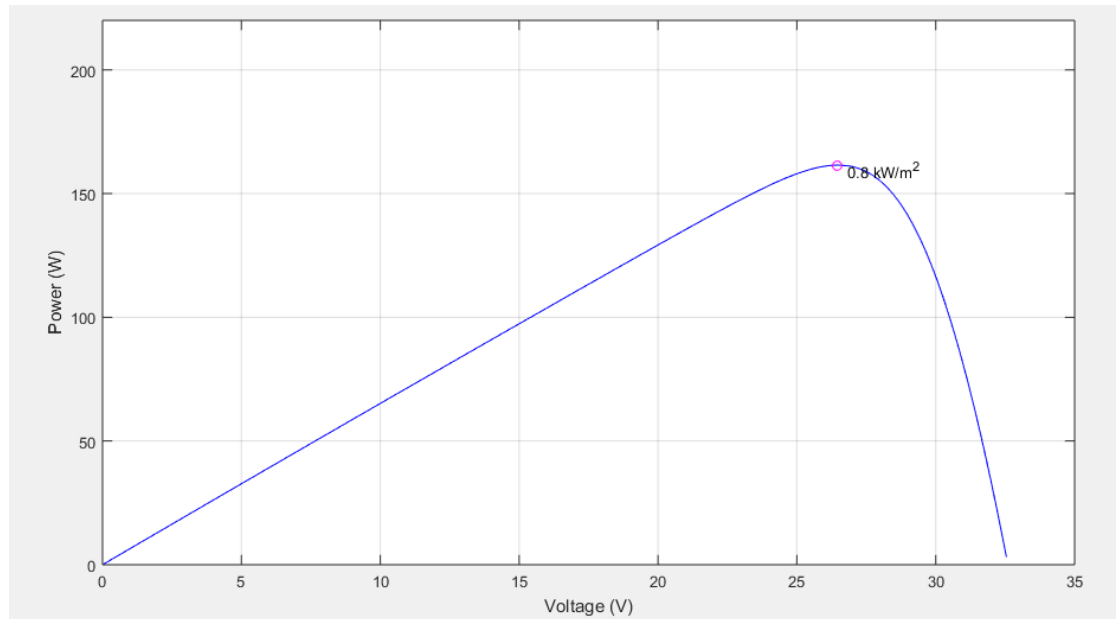
Array data	
Parallel strings	1
Series-connected modules per string	1
Module data	
Module:	Kyocera Solar KC200GT
<input type="checkbox"/> Plot I-V and P-V characteristics when a module is selected	
Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)
200.143	54
Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)
32.9	8.21
Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)
26.3	7.61
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)
-0.35502	0.06

**Tableau.III.1.** Paramètres du module photovoltaïque Risen Energy SYP-85S

Nous pouvons voir sur les figures (Figure.III.1) et (Figure.III.2) les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du panneau photovoltaïque Kyocera Solar KC200GT.



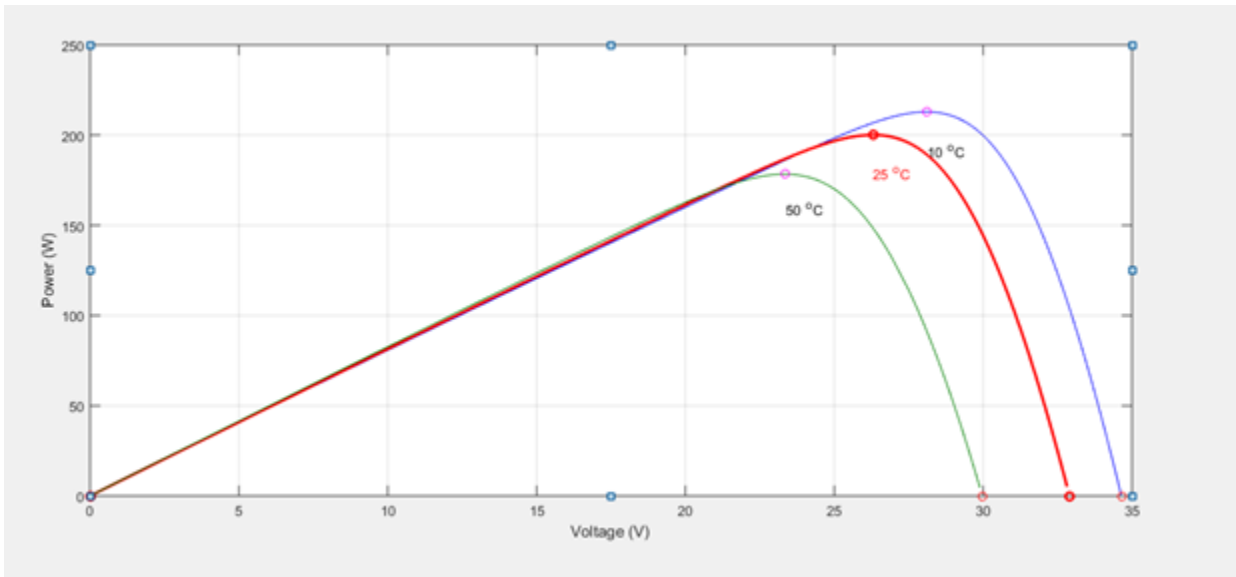
**Figure.III.1.** La caractéristique  $I = f(V)$  en fonction de l'éclairement du générateur PV.



**Figure.III.2.** La caractéristique  $P = f(V)$  en fonction de l'éclairement du générateur PV.

### III.2.1.a Influence de la température sur la caractéristique courant/tension du panneau photovoltaïque

La figure.III.3 illustre l'influence de la température sur les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du panneau photovoltaïque étudié :

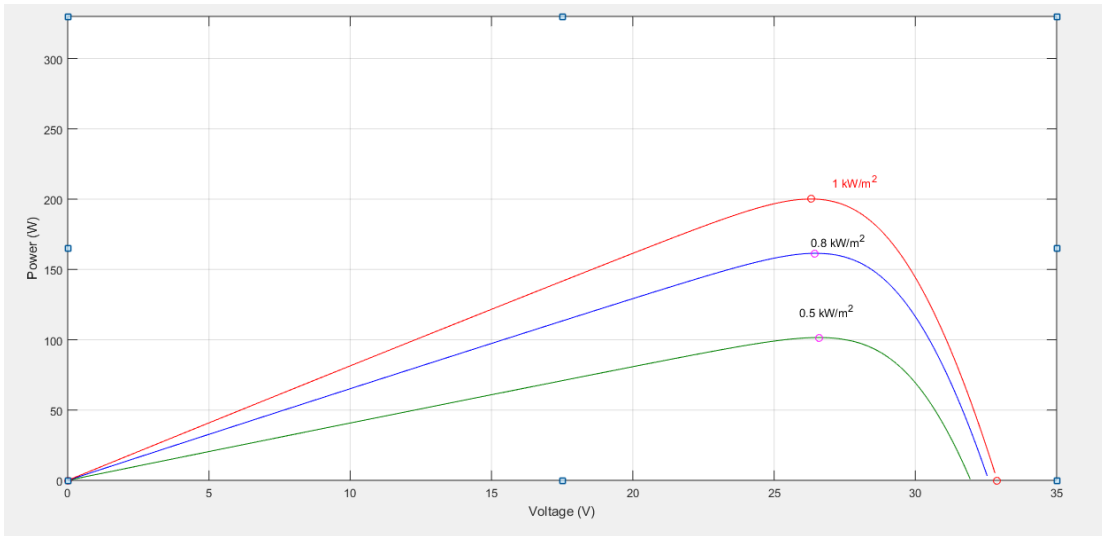


**Figure III.3** Caractéristique puissance- tension à 1000W/m<sup>2</sup> pour plusieurs températures.

D'après la figure III.3, nous constatons que la tension du circuit ouvert diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie du panneau.

### III.2.1.b Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant/tension du panneau photovoltaïque

La figure III.4 illustre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du panneau photovoltaïque étudié :



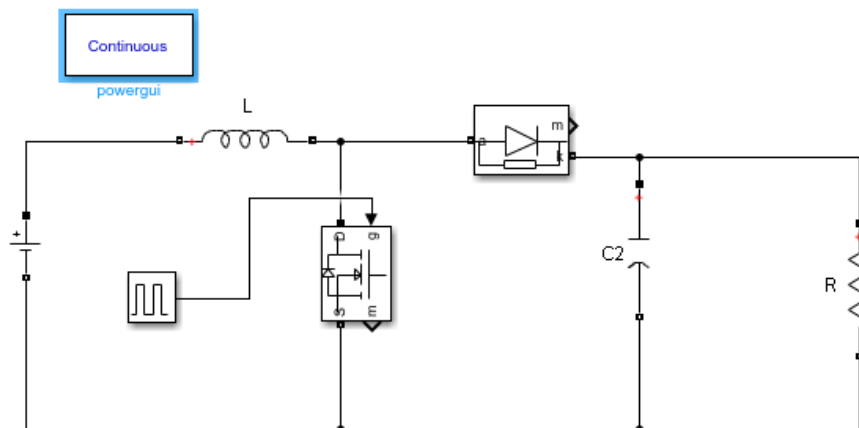
**Figure III.4.** Caractéristique puissance- tension pour différentes valeurs d’éclairement à température constante (25°C).

D’après la figure (III.7), nous constatons que la tension à circuit ouvert est peu sensible à la variation de l’ensoleillement, ce qui engendre une diminution de la puissance maximale.

### III.2.2 Simulation du convertisseur DC/DC

Le type de convertisseur DC/DC que nous avons choisi dans notre étude est le boost.

La figure (Fig.III.8) représente le schéma Simulink du convertisseur BOOST sous le logiciel MATLAB, reliée à une source de tension en entrée ( $V_e = 12\text{ V}$ ) et une résistance en sortie.



**Figure.III.5.** Modélisation d’un Convertisseur BOOST

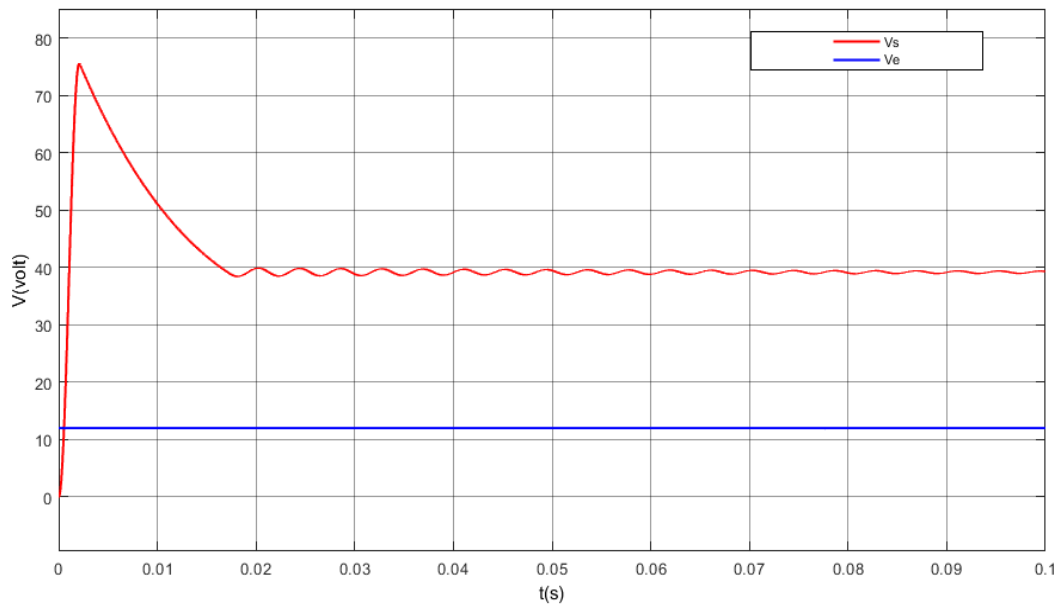
Les paramètres du convertisseur :

$$C1 = 330 \mu F ; C2 = 5 \mu F ;$$

$$L = 120 \mu H \text{ et } R = 50 \Omega$$

Nous avons effectué une simulation à une fréquence  $f = 25.10^3 \text{ Hz}$

Le résultat de simulation du convertisseur survolteur est illustré sur la figure suivante :



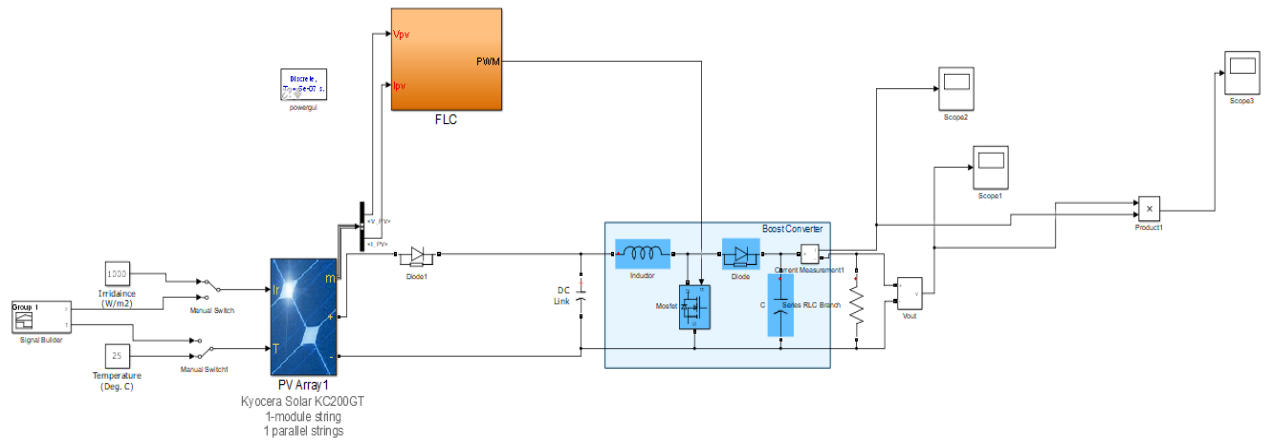
**Figure III.6.** Tension d'entrée et de sortie du convertisseur Boost.

On remarque que la tension d'entrée ( $V_e$ ) est amplifiée en sortie ( $V_s$ ), ce qui exprime le rôle de convertisseur élévateur (BOOST).

### III.2.3 Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT basé sur la logique floue

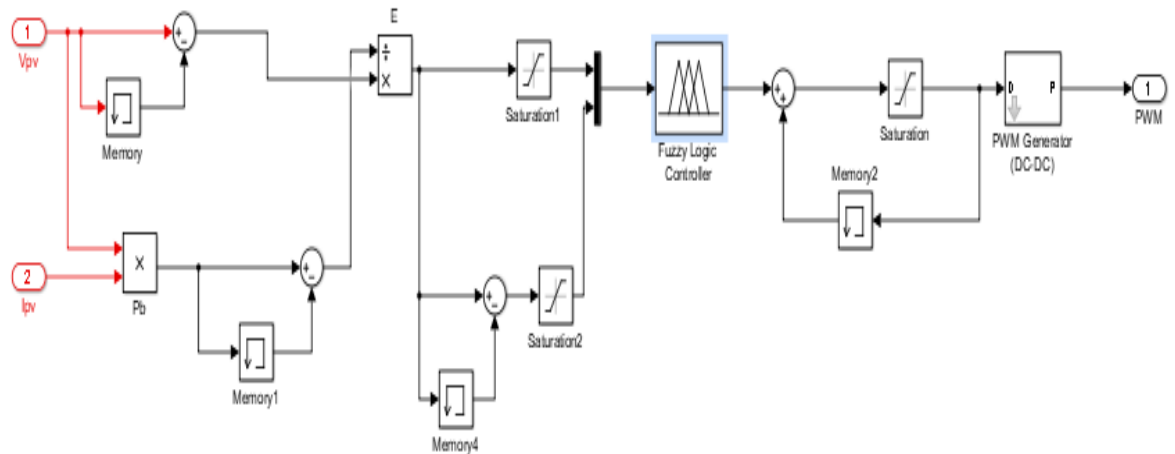
La figure III.7 montre le schéma de simulation du système photovoltaïque global d'un générateur photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation (Boost), commandé par un MPPT à base de la logique floue sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ ).





**Figure III.7.** Schéma de simulation du système (GPV-BOOST-charge) adapté par la technique MPPT floue.

Le sous-système ‘FLC’ a comme entrées : la tension et le courant du générateur photovoltaïque et comme sortie le signal MLI qui commande le hacheur. La figure III.8 montre l’architecture interne de ce sous-système.

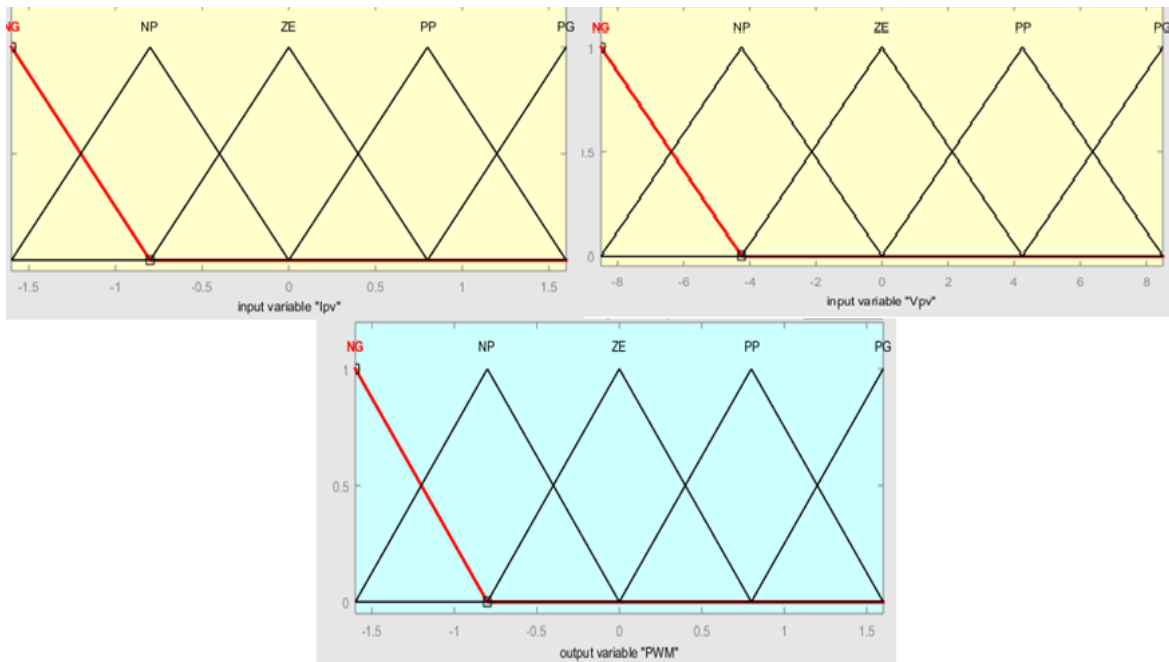


**Figure III.8.** Le schéma Simulink de sous-système FLC.

**a) Fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie**

Le contrôleur flou possède deux variables numériques qui ne sont pas floues. Nous allons les traduire, changer leur valeur en variables de langage floues, et concevoir les entrées floues avec : 05 variables floues pour chaque variable.

La figure suivante montre l'interface d'accueil du fichier FIS :



**Figure III.9.** Fonction d'appartenance de la logique floue.

**b) Règles floues**

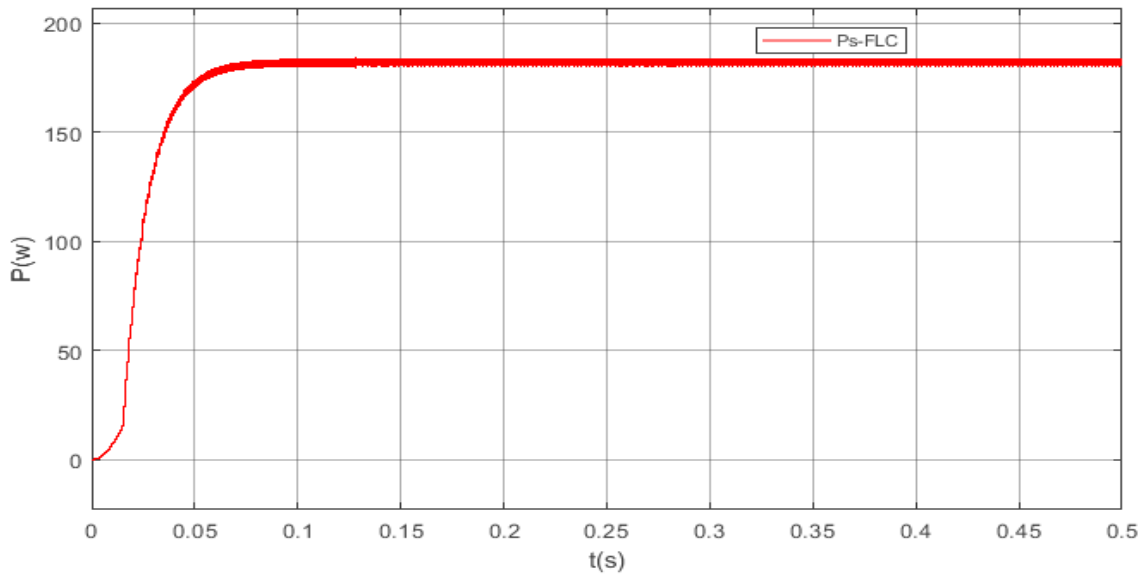
Le tableau suivant donne l'ensemble des règles qui permettent de déterminer le signal de sortie d'un régulateur MPPT à l'aide des deux signaux d'entrées (Ipv et Vpv).

		Ipv				
Vpv		NG	NP	ZE	PP	PG
NG		ZE	ZE	PG	PG	PG
NP		ZE	ZE	PP	PP	PP
ZE		PP	ZE	ZE	ZE	NP
PP		NP	NP	NP	ZE	ZE
PG		NG	NG	NG	ZE	ZE

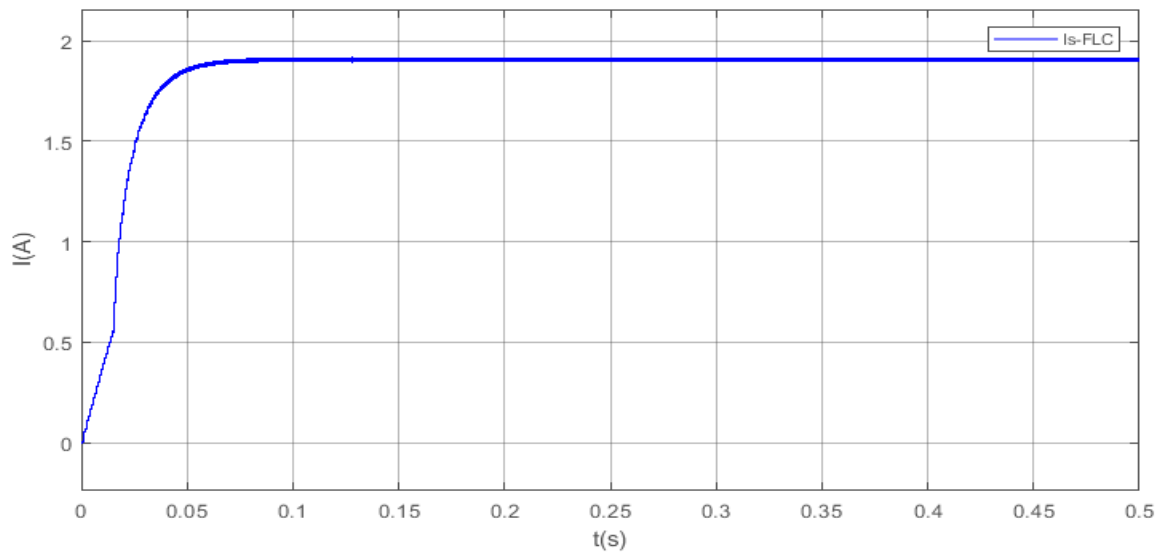
**Tableau III.2.** Règle d'inférence de la commande par logique floue.

### III.4.3.1 Résultats de simulation sous les conditions météorologiques constante

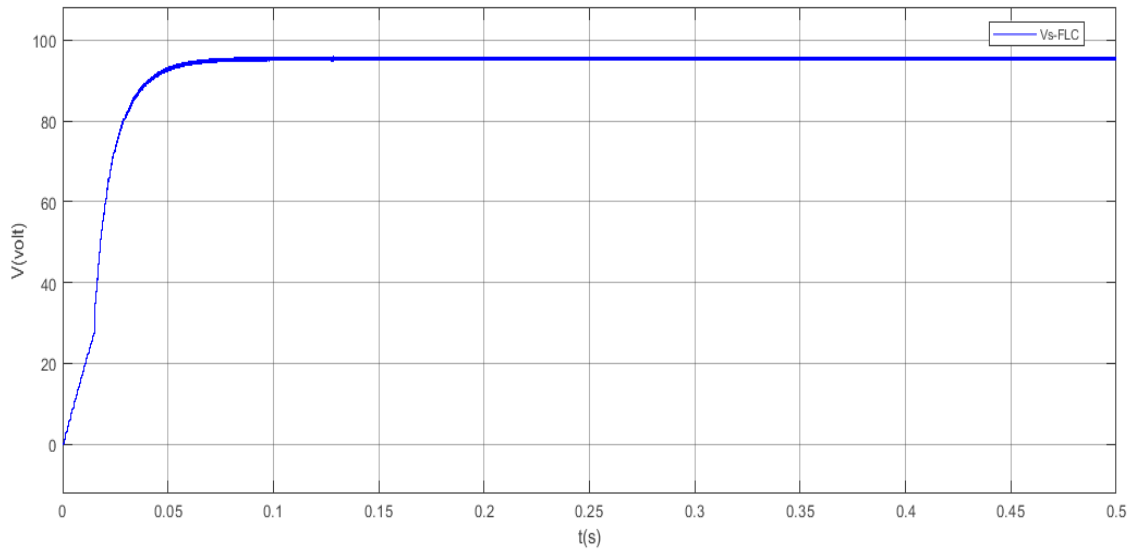
Les résultats de la simulation de l'ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) commandé par un MPPT à base de la logique floue sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement  $1000\text{W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ ) sont illustrés sur les figures ci-dessous :



**Figure III.10.** La puissance en fonction du temps avec la logique floue.



**Figure III.11.** La courant en fonction du temps avec la logique floue.



**Figure III.12.** La tension en fonction du temps avec la logique floue.

Selon la figure (III.10) le point maximum doit atteindre une puissance de  $P_{max} \approx 200W$  pour le bon fonctionnement du panneau PV. D'après la courbe (Figure III.13) obtenue on voit bien que la puissance électrique générée par le panneau solaire est toujours maintenue à sa puissance maximale.

#### III.4.3.2 Simulation du système global sous conditions atmosphériques variables

- **Variation de l'éclairement avec une température constante (25°C)**

Le module photovoltaïque a subi le changement de l'éclairement ( $1000w/m^2$ ,  $800w/m^2$ ,  $500w/m^2$ ) représenté sur la Figure.III.14. En utilisant la même procédure dans des conditions constantes, nous avons représenté la puissance, le courant et la tension de sortie.

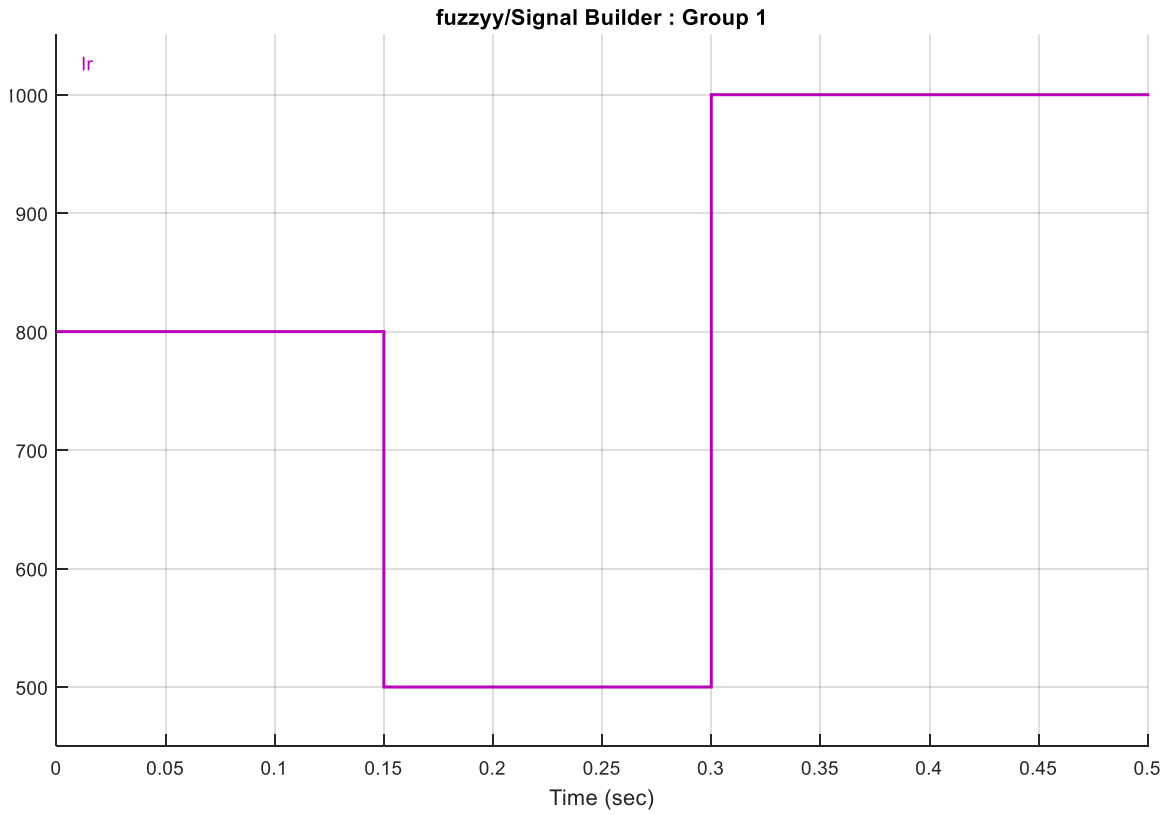


Figure III.13. Variation de l'éclairement en fonction du temps.

Résultats obtenus :

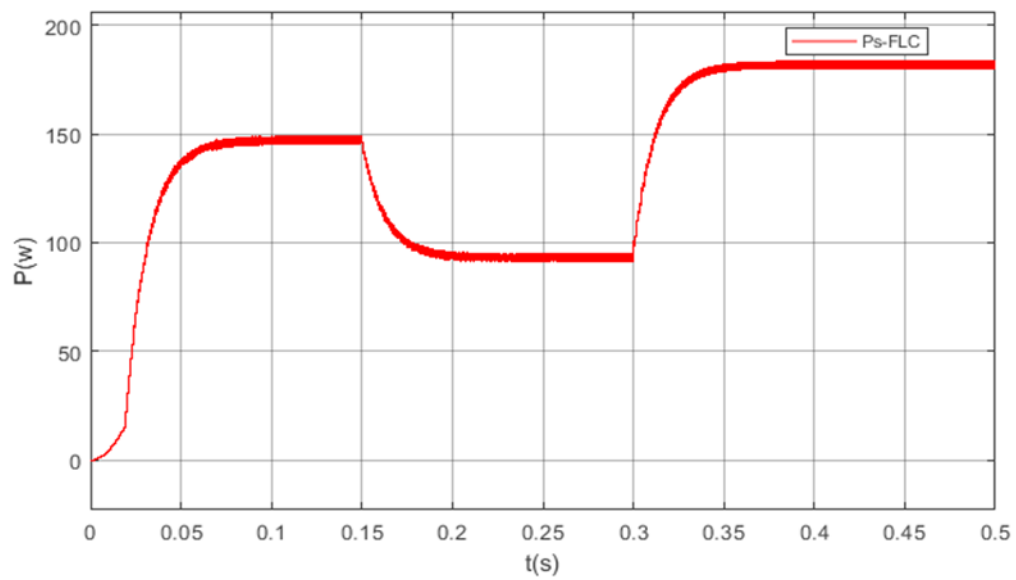


Figure III.14. Puissance en fonction du temps.

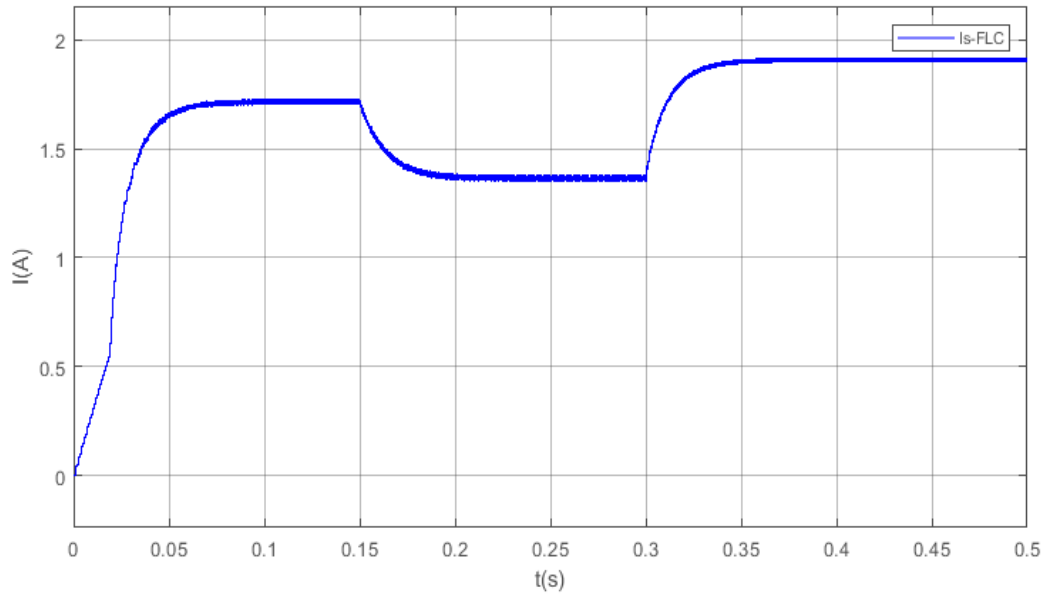


Figure III.15. Courant en fonction du temps

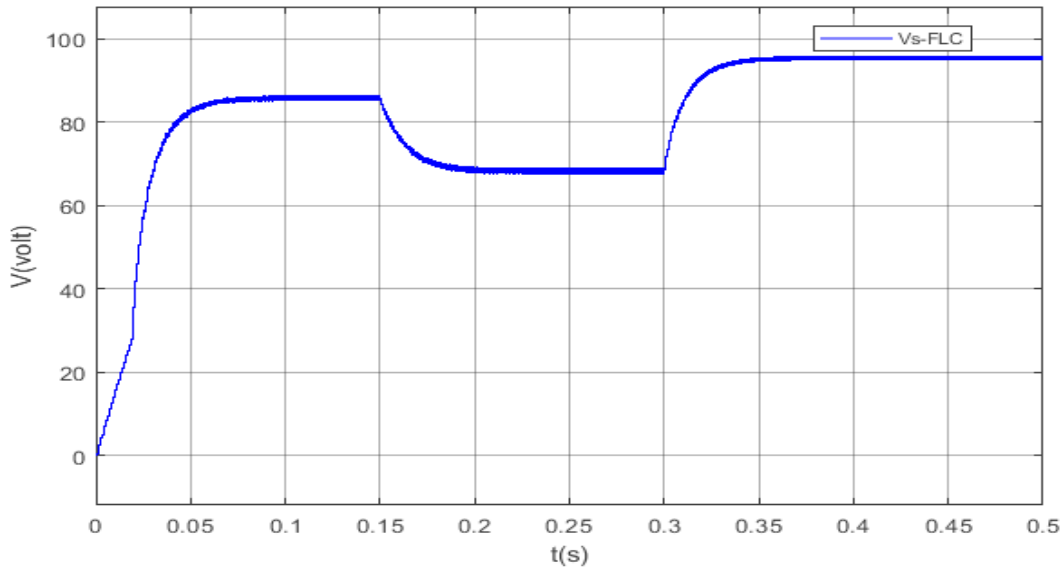


Figure III.16. Tension en fonction du temps

- **Variation de la température avec un éclairage constante (1000w/m<sup>2</sup>)**

Le module photovoltaïque a subi le changement de la température (50°C, 5°C et 25°C) représenté sur la Figure.III.16. En utilisant la même procédure dans des conditions constantes, nous avons exprimé la puissance, le courant et la tension a la sortie du hacheur.

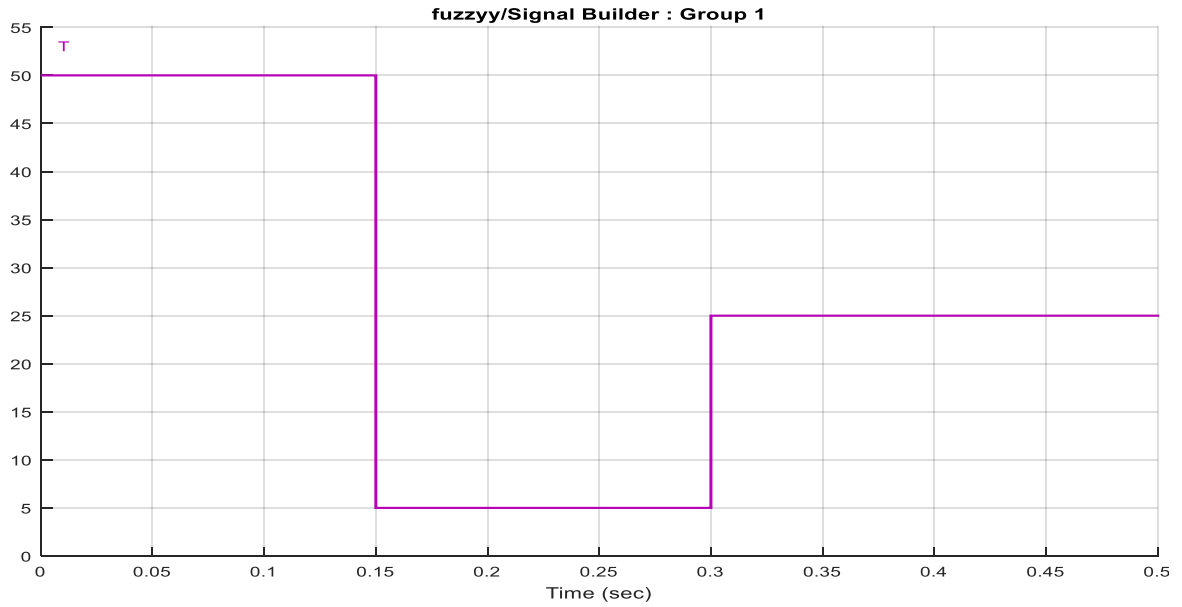


Figure III.17. Variation de la température en fonction du temps.

Résultat obtenu :

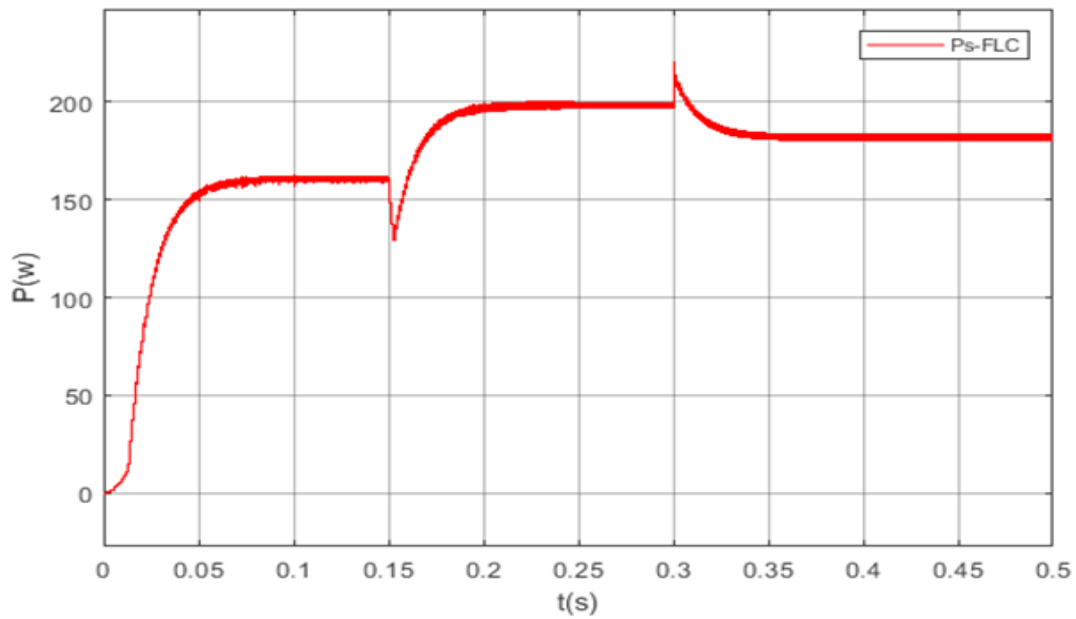


Figure III.18. Puissance en fonction du temps.

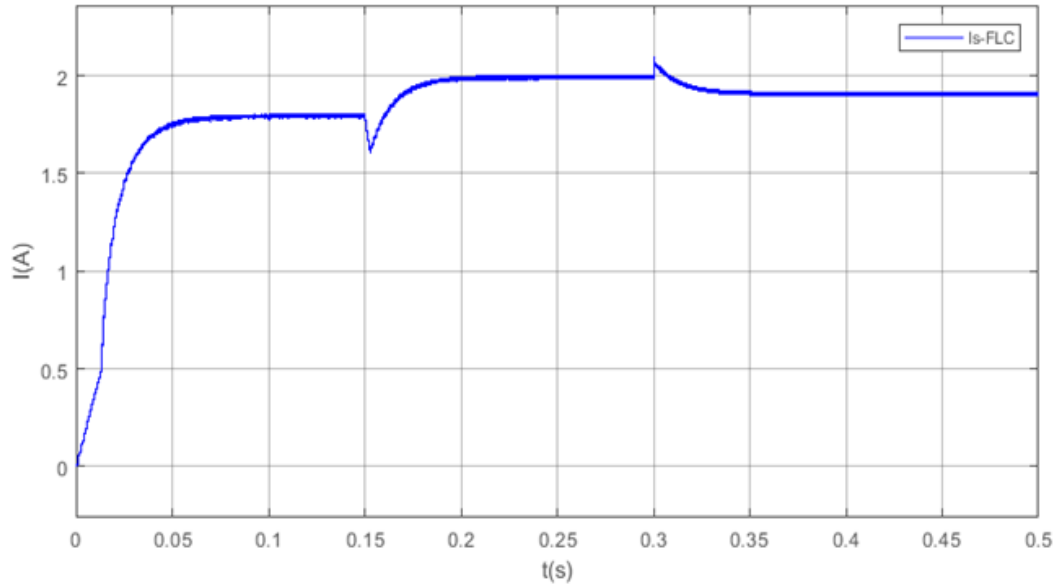


Figure III.19. Courant en fonction du temps.

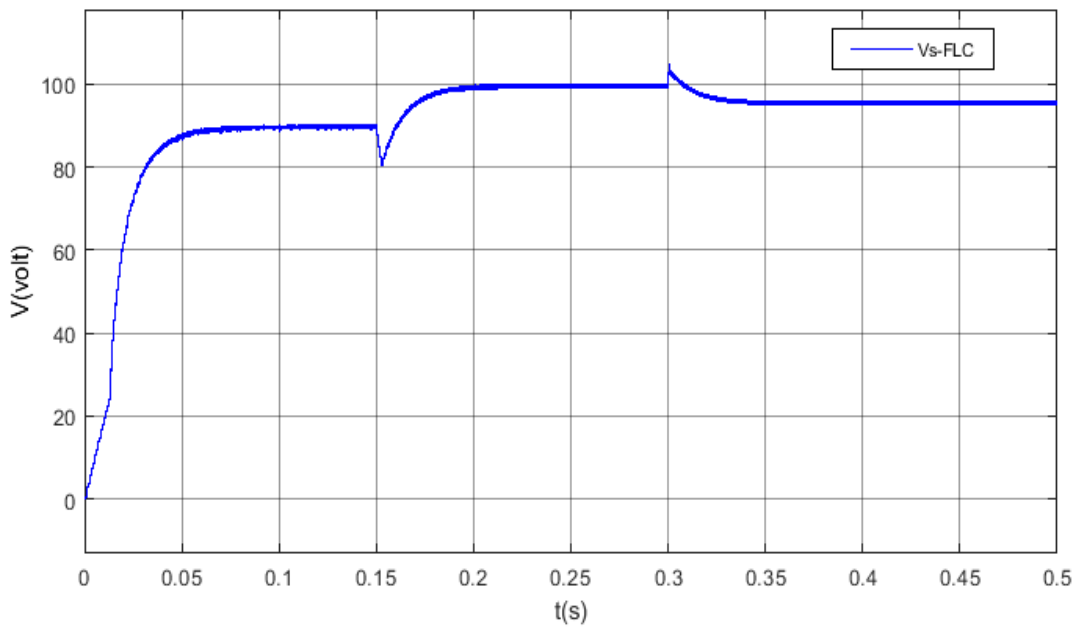


Figure III.20. Tension en fonction du temps.

À partir des résultats obtenus, nous constatons qu’il y a une relation proportionnelle entre le changement d’éclairement et la puissance, la même chose pour le courant et la tension, en revanche la puissance du panneau PV diminue avec l’augmentation de la température et vice



versa. La puissance électrique générée par le panneau solaire est toujours maintenue à sa puissance maximale, quelles que soient les conditions atmosphériques.

### **III.3. Conclusion**

La commande MPPT à base de logique floue est appliquée à un générateur PV. Les résultats obtenus sous l'environnement MATLAB/SIMULINK sont présentés dans ce chapitre.

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

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

L'utilisation de l'énergie solaire semble être une nécessité pour l'avenir. En effet, le soleil est une source d'énergie renouvelable, disponible dans tous les pays, et chaque jour, on apprend à mieux la valoriser.

Afin d'améliorer le rendement des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de commandes MPPT ont été étudiée pour la poursuite du point maximum de puissance.

L'objectif principal de notre travail consiste à mettre en évidence une technique MPPT basée sur l'intelligence artificielle qui est la logique floue, qui aboutit à l'extraction de la puissance maximale à partir du panneau PV.

Pour ce faire, en premier lieu, nous avons présenté quelques généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque, décrit le principe de fonctionnement d'une cellule PV, puis nous avons donné son schéma électrique équivalent basée sur le modèle à une seule diode.

En second lieu, nous avons vue, le schéma synoptique du système PV avec la commande MPPT, puis nous avons cité les différents types de convertisseur DC/DC, nous avons présenté également quelques méthodes MPPT rencontrées dans la littérature classiques : 'P & O' et 'Inc-Cond' et modernes : MPPT à base de réseaux de neurones et MPPT à base de logique flou.

En dernier, nous avons utilisé l'environnement Matlab/Simulink afin de simuler une technique de commande MPPT appliquée au système PV associant un panneau PV, un hacheur Boost et une charge résistive, à savoir la commande à base de logique flou sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement  $1000\text{W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ ) et lors des changements de l'éclairement et de température. Enfin en se basant sur les résultats obtenus à partir des simulations effectuées, nous pouvons conclure que la commande MPPT flou permet la connexion optimale entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge, et l'oblige à toujours fonctionner au point de puissance maximum.

Comme perspectives nous recommandons :

- La réalisation pratique de techniques de maximisation de puissances MPPT ;
- Etude d'autres types des sources énergétiques (Eolienne, hybride, ....etc)

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

[1] Dr S. belaid lalouni, « cours énergie solaire photovoltaïque »2015-2016, université de Bejaia.

[2]<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-deux-formes-du-solaire-le-solaire-photovoltaïque-et-le-solaire-thermique>

[3] Bernard, J. (2011). *Énergie solaire Calculs et optimisation*. Paris (France) : Ellipse Édition.

[4]M.Abdlhak, “Etude et Identification paramétrique d’une cellule photovoltaïque organique,” thèse de magister, 2011.

[5]J. Labbe « l’hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d’électricité pour système photovoltaïque isolés », thèse de doctorat de l’Ecole des Mines de Paris, 21 décembre2006.

[6]M. Sablier, “Spectrométrie de masse - Principe Électricité photovoltaïque marchés et appareillage Par : Électricité photovoltaïque Matériaux et marchés,” *Renewable Energy*, 2

[7] [Buildingindustry.org](http://Buildingindustry.org).

[8]<https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaïques/les-technologies-de-cellules-solaires-photovoltaïques/>.

[9] [photovoltaïque-plastique.com](http://photovoltaïque-plastique.com).

[10]BORNI Abdelhalim: Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire. Mémoire de magister à université Mentouri de Constantine, Mai 2009.

[11]O. Nichipruk,"Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités", Thèse de Doctorat, Institut National des Science Appliquées de Lyon, 2005

## Références bibliographiques

---

[12] Brigand, S. (2011). *Installations solaires photovoltaïques*. Paris (France) : Éditions du moniteur

[13] Labouret, A., Cumunel, P., Braun, J., Faraggi, B. (2010). *Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque*. Paris (France) : DUNOD.

[14][http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaïque-2011/I\\_caracteristique-courant-tension-cellule.php](http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaïque-2011/I_caracteristique-courant-tension-cellule.php)

[15]Maouedj Rachid, "Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzereah. Thèse de Magister de l'université de AbouBeker Belkaid - Tlemcen. 2005.

[16] E. Kechar, E. Azzag, I. Touabia "Influence des rayonnements solaires sur le rendement des panneaux photovoltaïques" .Département d'électrotechnique, Annaba.2020.

[17]<https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/photovoltaïque/schema-panneau-photovoltaïque.html>.

[18]<http://conrad.fr/>.

[19] Mohamed Salah, A. C. (2007). Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques. Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique.

[20]. A.Lyes, "Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque," mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri -Tizi Ouzou 2011.

[21]. Nicolas. (2015). Les différents composants d'une installation solaire autonome. Sources d'alimentation, <http://www.ohm-easy.com/>.

[22]. Cedric, C. (2008). Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.

## Références bibliographiques

---

[23] V.Salas, E.Olias, A.Barra do,A. Lazaro, Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol: 90, N°11, pp: 1555–1578, 2006.

[24]. Redha, R, & Chenni, R. (2011). Amélioration de la commande P&O par une détection synchrone du courant de batterie. Département d'Electrotechnique, université d'Adrar.

[25] Naffouti, S. (2012). Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque [Mémoire de projet de fin d'étude, Université de Monastir, Tunisie].

[26] Chermitti, A., Boukli-Hacene, O., Mouhadjer, S. (Septembre 2012). Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 53– No.14

[27] M.F. Shraif, « Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique », Thèse Université Paul Sabatier, 2002.

[28] S. NAOUAL, "Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur," université Ferhat Abbas de Sétif mémoire de magister, département d'électrotechnique 2010

[29]Introduction aux Réseaux de Neurones <http://www.morere.eu/spip.php?article19>.

[30]K. Sundareswaran, V. Vigneshkumar and S. Palani. "Application of acombined particle swarm optimization and perturb and observe method for MPPT in PV systems under partial shading conditions", Renewable Energy 75 (2015) 308-317.

[31]K. Mohamed, G. Amar " La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques " Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016

[32]SADOUNI, R.Cours : Commande Intelligente (Spécialité : Master 2\_Automatique et Systèmes).December 2019 At : Université de Ghardaia - ALGERIA.Voir le site :<https://www.researchgate.net/publication/338517191>

## Références bibliographiques

---

[33] Faucher, J, «les plans d'expériences pour le réglage et commande à base logique floue». Thèse de Doctorat, Institut national Polytechnique de Toulouse. Spécialité : Génie Electrique et Automatique.

[34] Yubazaki, N., Otani, M., Ashida, T., & Hirota, K. (1995, March). Dynamic fuzzy control method and its application to positioning of induction motor. In Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. (Vol. 3, pp. 1095-1102). IEEE.

[35] Pierre, S. (2002). Asservissement par Logique Floue, Cours, Ecole d'Ingénieure de Genève, Laboratoire d'Automatique

[36] Ramalu T, Radzi MAM, Zainuri MAAM, Wahab NIA, Rahman RZA. Dual-Fuzzy Based MPPT for Dual-Load Operation with Photovoltaic SEPIC Converter. 2015 10th Asian Control Conf., 2015. <https://doi.org/10.1109/ascc.2015.7244411>

[37] Lagorce, J. (2011). Modélisation, dimensionnement et optimisation des systèmes d'alimentation décentralisés à énergie renouvelable - application des systèmes multi-agents pour la gestion de l'énergie [Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France].

[38] Aziz, A. (2006). Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques. Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France.

## Résumé

La MPPT ou bien *Maximum Power Point Tracking* est une stratégie de commande permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Un générateur photovoltaïque est un générateur dont la caractéristique I-V est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. La commande MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le générateur photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge.

Dans ce mémoire, au début nous allons présenter quelques généralités et notions sur les systèmes photovoltaïques, puis nous allons présenter et simuler le modèle du générateur photovoltaïque. Après nous allons relier le générateur avec une charge via un convertisseur statique (DC-DC). Enfin, nous allons implémenter la commande MPPT à base de la **logique floue** dans le convertisseur statique afin d'extraire la puissance maximale.

La **logique floue** est une forme de logique qui traite un raisonnement approximatif plutôt que fixe et exact, donc la commande ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système, tandis que sa simplicité lui donne un avantage dans le suivi de son MPP dans des conditions atmosphériques à variation rapide.

## Abstract

The MPPT (Maximum Power Point Tracking) is a control allowing to track, as its name shows, the point of maximum power of a nonlinear electric generator. The I-V curve of a photovoltaic generator is strongly nonlinear. Consequently, for the same radiance, the power delivered will be different depending on the load. The MPPT command allows to control the static converter connecting the load and the PV generator so as to permanently supply the maximum power to the load.

In this work, at the beginning we have presented generalities and notions on photovoltaic systems, and then we presented and simulated the model of the photovoltaic generator. After we connected the generator with a load via a static converter (DC-DC). Finally, we implemented the MPPT control based on fuzzy logic in the static converter and see the simulation results.

Fuzzy logic is a form of logic that processes approximate reasoning rather than fixed and exact reasoning, so the command does not require exact knowledge of the mathematical model of the system, while its simplicity gives it an advantage in tracking the MPP under rapidly varying atmospheric conditions.