

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

**Université A. MIRA-BEJAIA**  
**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie électrique**



## **Mémoire de fin d'étude**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Thème

---

# **Optimisation d'un système photovoltaïque par la logique floue**

---

**Présenté par :**

**BELLIL Abderrahmane**

**YAGOUNI Yacine**

**Encadré par :**

**Mme C.SERIR**

**Examineurs :**

**Mme S. BELAID**

**Mr Y.ZEBBOUJ**

**Année Universitaire : 2019/2020**

## *Remerciements*

*Nous tenons à remercier, tout d'abord, le dieu le plus puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour achever ce travail.*

*Nos plus vifs remerciements s'adressent à notre promotrice Mme C. Serir pour sa patience, son orientation et ses remarques constructives, pour la confiance et l'intérêt qu'elle a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail*

*Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de notre travail.*

*Nous tenons aussi à remercier profondément tous les enseignants du département de génie électriques qui nous ont donné de leurs savoir et nous ont soutenu tout au long de notre parcours universitaire.*

## *Dédicaces*

*Je voudrais dédier ce travail*

*A la mémoire de ma mère*

*A mon père*

*Et mes frères,*

*A toute la famille.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de  
mes études*

*Bellil Abderrahmane*

## *Dédicace*

*Après des longues années d'étude nous voici enfin près au défi de la vie professionnelle.*

*Je dédie ce travail avec un sentiment très profond à mes chers parents, que dieu les protège, pour leurs soutient morale et financier durant tous mon parcours d'étude et de m'avoir encouragé avec tous les moyens qui puisse exister pour donner le meilleur de moi-même et arriver là où je suis aujourd'hui.*

*Je pris le bon dieu de les bénir, veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.*

*A mon frère Nassim, mes cousins, mes oncles et pour mon très chère ami Tarik qui a été toujours présent pour moi.*

*A tous mes amis, mes collègues et tous ce qui ont collborer de près ou de loin a la réussite de modeste travail*

*A la mémoire de Yagouni Nourdine martyre de la cause berbère 28 Avril 2001 .*

*Yagouni Yacine*

## *Sommaire*

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Nomenclature**

**Introduction générale..... 1**

### *Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques*

I.1. Introduction ..... 3

I.2. L'énergie renouvelable ..... 3

I.3 l'énergie solaire..... 3

I.3 .1 Définition..... 3

I.3.2 Rayonnement solaire ..... 4

I.4.3 Les type de rayonnement ..... 5

I.3.4 Gisement solaire en Algérie..... 6

I.4 L'énergie solaire photovoltaïque..... 7

I.5. Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque ..... 8

I.6 Cellule photovoltaïque..... 8

I.6.1 Principe de fonctionnement ..... 9

I.6.2 Types de cellules photovoltaïques ..... 10

1.6.3 Regroupement des cellules photovoltaïques ..... 11

I.7 Générateur photovoltaïque..... 13

I.8 Implantation du champ de modules ..... 13

I.9 Protection des modules photovoltaïques ..... 14

I.10 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque..... 15

I.10.1 Avantage ..... 15

I.10.2 Inconvénients..... 15

I.11 Conclusion..... 15

### ***Chapitre II : Modélisation et simulation du système photovoltaïque***

II.1 Introduction.....	16
II.2. Connexion directe source-charge .....	16
II.3. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge .....	17
II .4 le modèle électrique du panneaux PV utilisé .....	17
II .4.1 Modèle à une diode .....	18
II .4.2 Détermination des Paramètres du modèle à une diode.....	19
II.5 Simulation du panneau photovoltaïque.....	21
II .5.1 Caractéristique de $I_{pv}(V_{pv})$ ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , $T_c = 25^\circ\text{C}$ ).....	21
II .5.2 : Caractéristique de $P_{pv}(V_{pv})$ ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , $T_c = 25^\circ\text{C}$ ).....	22
II.6 L'influence de la température et de l'ensoleillement .....	22
II.6.1 L'influence de la température.....	22
II .6.2 L'influence de l'ensoleillement.....	24
II.7 Modélisation du hacheur survolteur.....	25
II.8 Conclusion .....	26

### ***Chapitre III : Optimisation du système photovoltaïque***

III.1 Introduction.....	27
III.2. Principe de la recherche du point de puissance maximal .....	27
III.3 Techniques de poursuite du point de puissance maximale.....	29
III.3.1 Les méthodes indirectes .....	29
III.3.2 Les méthodes directes .....	30
III.4 La méthode de Perturbation et d'Observation (P&O) .....	30
III.5. Méthode à base de Logique floue (FLC).....	35
III.5.1. Introduction.....	35
III.5.2 Principe de la logique floue .....	35
III.5.3. Ensembles flous .....	36

## ***Sommaire***

---

III.5.4 Variables linguistiques .....	37
III.5.5. Fonctions d'appartenance .....	37
III.5.6 Opérateurs de la logique floue .....	38
III.5.7 Domaine d'application.....	39
III.5.9 Description d'un régulateur flou.....	39
III.5.10. Application de la commande par la logique floue .....	40
III.6 Etude comparative entre MPPT P&O et MPPT flou .....	44
III.7 Commande MPPT PI-floue .....	45
III.8 Etude comparative entre la commande MPPT floue et la commande MPPT PI -floue...	47
III.9 Test de robustesses .....	48
III.10 conclusion .....	51
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>52</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>53</b>

**Liste des tableaux**

**Chapitre I :**

**Tableau I.1 :** Avantages et inconvénients des cellules solaires à base de silicium..... 11

**Chapitre II :**

**Tableau II.1 :** Paramètres du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110..... 20

**Tableau II.2 :** Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110. .... 21

**Chapitre III :**

**Tableau III.1 :** les modes de perturbation de la commande P&O .....31

**Tableau III.2 :** Table des règles de décision à cinq classes ..... 42

**Tableau III.3 :** Comparaison des performances des algorithmes étudiés ..... 47

**Tableau III.4 :** Comparaison des performances des algorithmes étudiés pendant des conditions variables..... 50

### Liste des figures

#### Chapitre I :

<b>Figure I.1</b> : Energie photovoltaïque.....	4
<b>Figure I.2</b> :Réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque .....	5
<b>Figure I.3</b> :Les différents rayonnements solaires .....	5
<b>Figure I.4</b> :Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.....	6
<b>Figure I.5</b> :Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu .....	7
<b>Figure I.6</b> :Cellule photovoltaïque. ....	9
<b>Figure I.7</b> :: Production d'électricité par la séparation électron-trou .....	10
<b>Figure I.8</b> : (a) mono-cristallines (b) poly-cristallines (c) amorphes .....	10
<b>Figure I.9</b> : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série .....	12
<b>Figure I.10</b> : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle.....	12
<b>Figure I.11</b> : Constitution d'un générateur photovoltaïque .....	13
<b>Figure I.12</b> : Protection des modules photovoltaïques .....	14

#### Chapitre II :

<b>Figure II.1</b> : connexion directe entre un GPV et une charge. ....	16
<b>Figure II.2</b> : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge. ....	17
<b>Figure II.3</b> : Schéma équivalent du modèle à une diode.....	18
<b>Figure II.4</b> : Schéma de simulation global du panneau photovoltaïque.....	21
<b>Figure II.5</b> : Caractéristique de $I_{pv}(V_{pv})$ ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , $T_c = 25^\circ\text{C}$ ). ....	21
<b>Figure II.6</b> : Caractéristique de $P_{pv}(V_{pv})$ ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , $T_c = 25^\circ\text{C}$ ). ....	22
<b>Figure II.7</b> : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ .....	23
<b>Figure II.8</b> : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ .....	23
<b>Figure II.9</b> : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ .....	24
<b>Figure II.10</b> : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ .....	24
<b>Figure II.11</b> : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost) .....	25
<b>Figure II.12</b> : Schéma d'un hacheur boost à $t \in [0, \alpha. T]$ . ....	25
<b>Figure II.13</b> : Schéma d'un hacheur boost à $t \in [\alpha. T, T]$ . ....	26

## Liste des figures

---

### Chapitre III :

<b>Figure III.1 :</b> Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque .....	28
<b>Figure III.2 :</b> Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal .....	29
<b>Figure III.3 :</b> Principe de la P&O.....	31
<b>Figure III.4 :</b> Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.....	32
<b>Figure III.5 :</b> Caractéristique (P-V) de l'algorithme P&O.....	33
<b>Figure III.6 :</b> L'allure de la puissance photovoltaïque par la commande P&O .....	33
<b>Figure III.7 :</b> Zoom de L'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent.....	34
<b>Figure III.8 :</b> Zoom sur le temps de réponse par la commande P&O .....	34
<b>Figure III.9 :</b> Classification selon la logique classique (booléenne).....	35
<b>Figure III.10 :</b> Classification selon la logique floue .....	36
<b>Figure III.11 :</b> Comparaison entre un ensemble classique et un ensemble flou .....	36
<b>Figure III.12 :</b> Les différentes formes de la fonction d'appartenance .....	37
<b>Figure III.13 :</b> Fonction d'appartenance singleton. ....	37
<b>Figure III.14 :</b> Intersection des sous-ensembles flous.....	38
<b>Figure III.15 :</b> Union des sous-ensembles flous .....	38
<b>Figure III.16 :</b> Illustration de l'opération NON. ....	39
<b>Figure III.17 :</b> Schéma synoptique général d'un contrôleur flou .....	40
<b>Figure III.18 :</b> Structure d'un contrôleur MPPT flou.....	40
<b>Figure III.19 :</b> Fonction d'appartenance du contrôleur flou (entrées, sortie).....	41
<b>Figure III.20 :</b> L'allure de la puissance photovoltaïque par la commande FLC.....	43
<b>Figure III.21 :</b> Zoom de L'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent.....	43
<b>Figure III.22 :</b> Zoom sur le temps de réponse par la commande FLC .....	44
<b>Figure III.23 :</b> Allure de la puissance photovoltaïque (commande P&O et FLC) .....	44
<b>Figure III.24 :</b> Zoom de L'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent.....	45
<b>Figure III.25 :</b> L'allure de la puissance photovoltaïque par la commande PI-FLC .....	46
<b>Figure III.26 :</b> Zoom de L'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent.....	46
<b>Figure III.27 :</b> Zoom sur le temps de réponse par la commande PI-FLC .....	46
<b>Figure III.28 :</b> Allure de la puissance photovoltaïque par la commande FLC et PI-FLC.....	47
<b>Figure III.29 :</b> Temps de réponse et le rendement des algorithmes étudiés.....	48
<b>Figure III.30 :</b> la variation brusque d'ensoleillement. ....	49
<b>Figure III.31 :</b> Allure de la puissance photovoltaïque pour un ensoleillement variable. ....	49

## *Liste des figures*

---

<b>Figure III.32</b> : Zoom sur la puissance photovoltaïque Lors d'une diminution d'ensoleillement .....	49
<b>Figure III.33</b> : Zoom sur la puissance photovoltaïque Lors d'une augmentation d'ensoleillement .....	50

## *Nomenclature*

---

### *Symboles*

$N_s$	Nombre de cellules associées en séries
$N_p$	Nombre de cellules associées en parallèles
$V_{coLa}$	tension en circuit ouvert (V)
$I_{ccLe}$	courant de court-circuit (A)
$I_{PV}$	Courant photovoltaïque (A)
$V_{PV}$	Tension photovoltaïque (V)
$I_s$	Courant de saturation de la diode (A)
$q$	Charge d'un électron $1.6.10^{-19}$
$A$	Coefficient d'idéalité de la diode.
$K$	Constante de Boltzmann $1.38.10^{-23}$ (J / K).
$n$	Le rendement de conversion d'énergie
$V_m$	Tension optimale (au point de puissance maximale) (V)
$I_m$	Courant optimum (au point de puissance maximale) (A)
$P_{max}$	Puissance maximale pouvant fournir le générateur (W)
$T_c$	Température de la jonction de la cellule
$T_a$	La température ambiante.
$V_d$	La tension aux bornes de diode (V)
$I_{ph}$	Courant produit par la photopile (A)
$I_s$	Courant de saturation (A)
$R_{sh}$	Résistance shunt
$R_s$	Résistance série
$I_d$	Courant de diode (A)
$I_{sh}$	Le courant shunt (A)
$T_{cref}$	Température de référence
$E_{ref}$	Ensoleillement de référence
$P1, P2, P3, P4$	Paramètres constants
$E_g$	L'énergie de gap
$E$	irradiation solaire
$\alpha$	Le rapport cyclique du hacheur

## ***Nomenclature***

---

$I_{ch}$  Courant aux bornes de la charge (A)

$V_{ch}$  Tension aux bornes de la charge (V)

## ***Abréviations***

PV Photovoltaïque

GPV Générateur Photovoltaïque

STC Conditions de fonctionnement standard

PPM Point de puissance maximale

MPPT Maximum Power Point Tracking

DC Courant Continu

DC/DC Convertisseur continu continu

P&O Perturbation et observation

FLC fuzzy logic control

$\mu A$  Fonction d'appartenance

PI Proportionnel intégrale

### *Introduction générale*

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. [7]

Par opposition, une énergie dite renouvelable doit se régénérer naturellement et infiniment, l'énergie issue du soleil répond actuellement à ces critères à la fois d'abondance à la surface terrestre et de régénération infinie à notre échelle. [23] Afin d'exploiter cette énergie solaire, des systèmes photovoltaïques offrent la possibilité de la conversion de rayonnement solaire en énergie électrique. Mais outre un coût souvent excessif dans les conditions actuelles, ce développement est encore freiné par de nombreux problèmes techniques, tels que le faible rendement de conversion, le manque d'optimisation du traitement de cette énergie vu son comportement aléatoire ainsi que l'adaptation de cette source.

La production d'électricité par le générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, à la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil. Du fait du caractère non linéaire de la caractéristique (courant-tension) des panneaux photovoltaïques, et pour une gestion optimale de l'énergie disponible à leurs sorties, les techniques d'optimisation MPPT (Maximum Power Point Tracking), de régulation et de contrôle permettent d'augmenter le rendement énergétique de l'ensemble de l'installation photovoltaïque, en transférant à la charge la puissance électrique maximale disponible issue du générateur photovoltaïque, et ce quelles que soient les variations de l'ensoleillement et de la température.[8]

Dans ce présent travail, nous nous intéressons à l'optimisation de la puissance de générateur photovoltaïque essentiellement en utilisant la commande par logique floue.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les systèmes Photovoltaïques.

## *Introduction générale*

---

Le deuxième chapitre sera consacré pour l'étude des éléments du système photovoltaïque, la modélisation mathématique des éléments qui le constituent et les différentes caractéristiques du générateur photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter deux techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT P&O et commande MPPT flou pour l'optimisation de la puissance des générateurs photovoltaïques. Une étude comparative entre ses deux méthodes MPPT sera présentée pour tester leurs performances, Afin d'améliorer la commande floue avec l'emploi d'un régulateur PI

En fin, nous allons terminer notre travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble de cette étude.

### **I.1. Introduction**

Le soleil est une source d'énergie renouvelable qui permet de fabriquer l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques, l'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables les plus efficaces que l'être humain a pu évoluer pour remettre en cause la domination des énergies produites à partir des fossiles comme les hydrocarbures (pétrole, charbon, gaz naturel) ainsi que l'énergie nucléaire.

Dans ce chapitre nous allons donner un aperçu général sur l'essentiel des connaissances requises à la compréhension de système photovoltaïque.

### **I.2. L'énergie renouvelable**

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique). Aujourd'hui, on assimile souvent par abus de langage les énergies renouvelables aux énergies propres. [1]

Les différents types d'énergies renouvelables sont :

- L'énergie éolienne.
- L'énergie hydraulique.
- L'énergie géothermique.
- L'énergie biomasse.
- L'énergie solaire.

### **I.3 L'énergie solaire**

#### **I.3.1 Définition**

L'énergie solaire représente une alternative aux énergies fossiles habituelles. Disponible en grande quantité à notre échelle et répartie sur toute la surface de la terre, elle permet de récupérer jusqu'à  $1000\text{W/m}^2$  dans les zones tempérées. Que l'on soit en milieu urbain ou au contraire, en site isolé, cette énergie peut être récupérée et utilisée sous forme thermique ou électrique, il existe différents types d'énergies solaires [3] :

a) **L'énergie passive** : Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.

b) **L'énergie solaire thermique** : Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique (chaleur).

c) **L'énergie thermodynamique** : Cette énergie est l'un des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température qui va produire de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée.

d) **L'énergie photovoltaïque** : Énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron.

Dans notre travail, nous nous intéressons particulièrement à l'énergie solaire photovoltaïque.



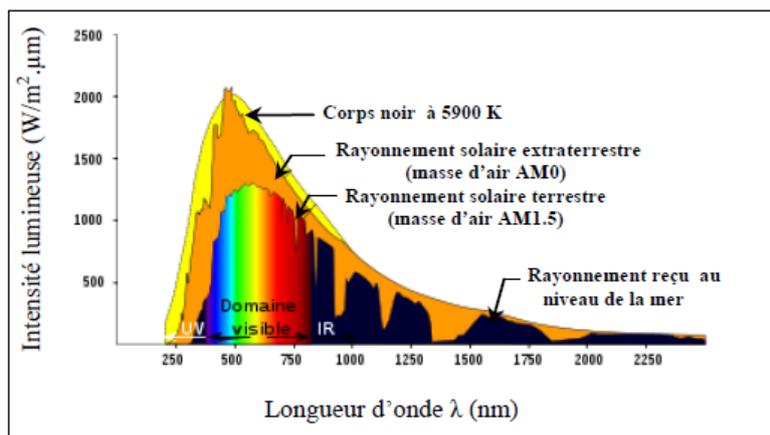
**Figure I.1** : Energie photovoltaïque

### I.3.2 Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.106 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.106 GW, c'est pour cela que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergies non-renouvelables.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnements électromagnétiques compris dans une longueur variant de 220 à 10000 nm, l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

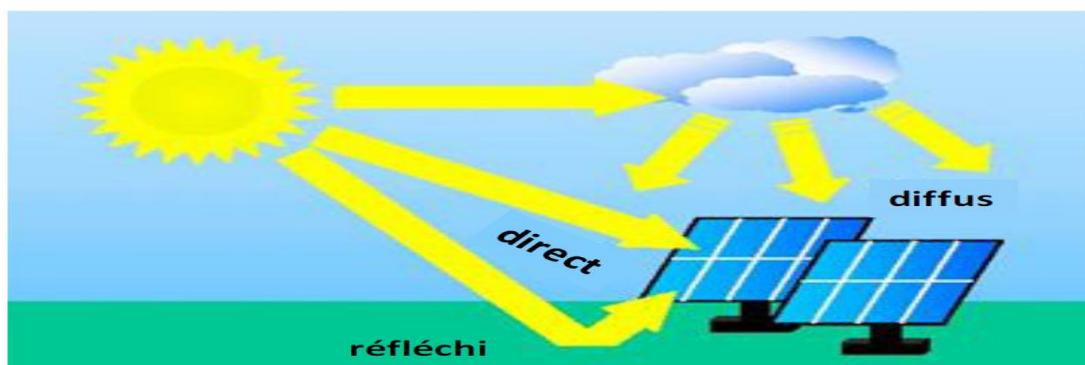
- 9 % dans la bande des ultraviolets (< à 400 nm).
- 47 % dans la bande visibles (400 à 800 nm).
- 44 % dans la bande des infrarouges (> à 800 nm) [4]



### I.3.3 Les type de rayonnement [6]

On définit quatre types de rayonnement (voir Figure I.3) :

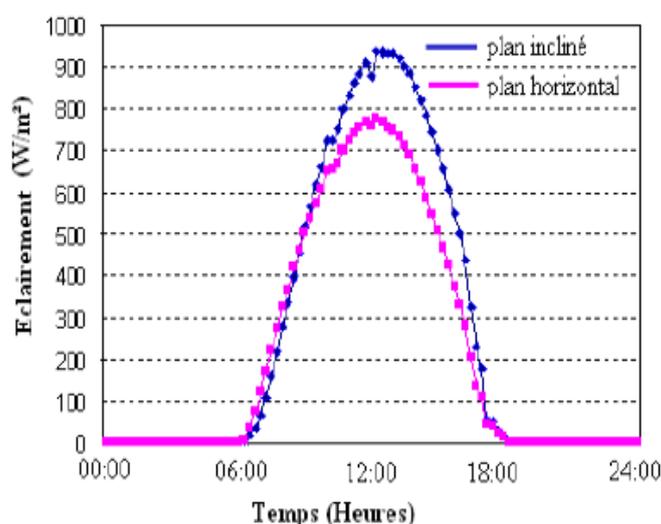
- Le rayonnement direct** : Est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.
- Le rayonnement diffus** : Est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.
- Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol** : Est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- Le rayonnement global** : Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.



L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons.

Dans la figure (I.4) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du lever au coucher du soleil.



**Figure I.4** : Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné. [6]

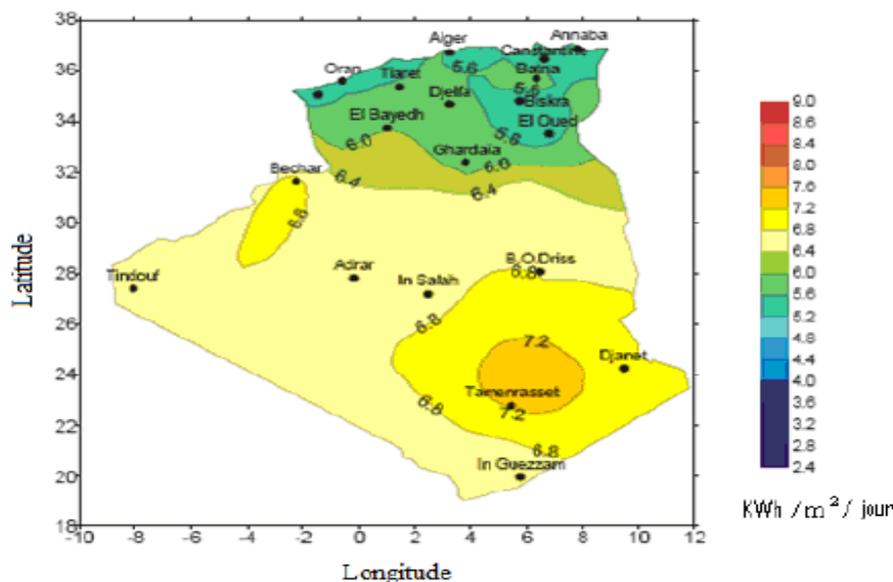
### I.3.4 Gisement solaire en Algérie

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exacte possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. [8]

L'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres énergies solaire, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental.

Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement

La figure (I.5) montre l'irradiation globale moyenne annuelle reçue sur plan incliné à la latitude du lieu.



**Figure I.5 :** Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu (moyenne annuelle)

Cette énergie est une source d'énergie non polluante qui répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture

Dans le cadre de la concrétisation du programme national algérien des énergies renouvelables, Le ministère de l'énergie prévoit le lancement d'un méga projet, appelé TAFOUK1, pour la réalisation de centrales solaires photovoltaïques d'une capacité totale de 4.000MW sur la période 2020-2024. L'objectif de ce projet est de satisfaire la demande nationale en énergie et de préserver nos ressources fossiles. [9]

D'autres projets d'une capacité de 200 MW par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030.

### I.4 L'énergie solaire photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » est un mot latin, « photon » signifie lumière et « VOLTA » nom de famille du physicien italien (Alessandro VOLTA) qui donne son nom à l'unité de mesure de la tension électrique. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par

ALEXANDRE EDMOND BECQUEREL qui a démontré qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en énergie électrique. Cependant, à cette époque, il n'y avait pas d'utilisation pratique de cette découverte. En 1905, Albert EINSTEIN a écrit que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes et que la collision entre les photons et les atomes peuvent faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre la création d'un courant électrique [10]. Cette conversion se fait en présence de cellules solaires qui nécessitent étude et compréhension.

### **I.5. Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque [11].**

- 1839 : le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : trois chercheurs américains, Chaplin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

### **I.6 Cellule photovoltaïque**

La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui représente l'élément de base dans un générateur photovoltaïque, quand elle est exposée à la lumière elle génère de l'électricité. Cette énergie est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque, qui est rapporté par Edmond Becquerel en 1839 [12]

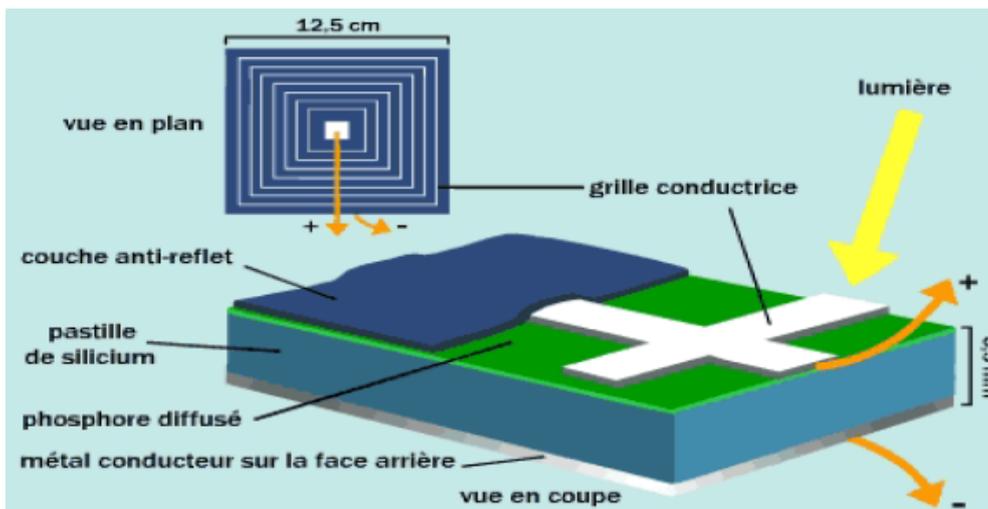


Figure I.6 : Cellule photovoltaïque.

### I.6.1 Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau 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. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction P-N a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule [13], voir la figure (I.7).

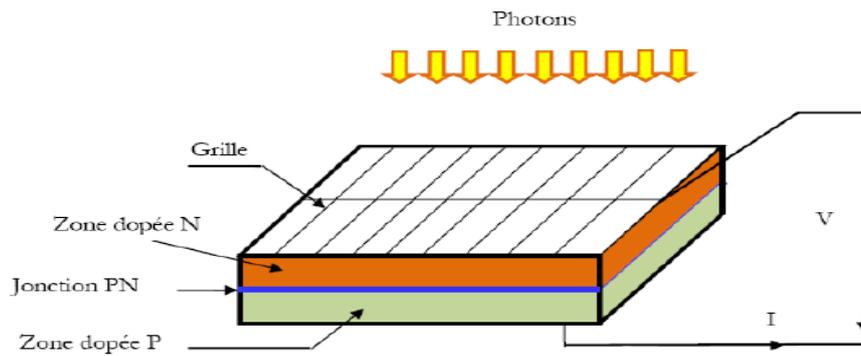


Figure I.7 : Production d'électricité par la séparation électron-trou

### I.6.2 Types de cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs types de cellules qui se différencient par les matériaux utilisés pour les construire. En dehors du prix, le choix d'un type de cellule n'a que peu de conséquences pour l'utilisateur, la principale différence sera la surface qui, à puissance égale, pourra varier du simple au double.

✓ **Les cellules au silicium monocristallin :**

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

✓ **Les cellules au silicium poly- cristallin :**

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, Cependant leur rendement est plus faible : (11% -13%).

✓ **Les cellules au silicium amorphe :**

Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires ou encore les montres.

Cette figure ci-dessous représente les différents types de cellules :

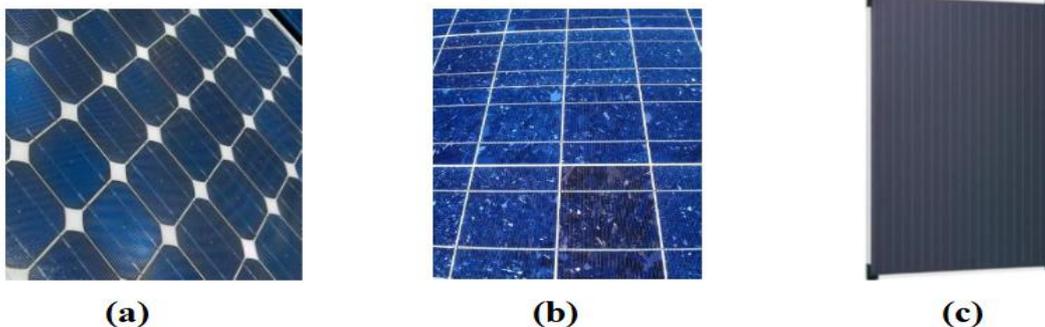


Figure I.8: Types de cellules photovoltaïques ((a) mono-cristallines (b) poly-cristallines (c) amorphes)

Le tableau suivant résume les principaux avantages et inconvénients de différentes catégories des cellules [14] :

**Tableau I.1** : Avantages et inconvénients des cellules solaires à base de silicium.

Matériau de la cellule	Avantages	Inconvénients	Principales utilisations
<b>Cellule en Silicium Amorphe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très faibles épaisseurs.</li> <li>- Fonctionne avec un faible éclairement et sous ombrage Partiel.</li> <li>- Moins sensible aux températures élevées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rendement faible en plein soleil.</li> <li>- Dégradation sous lumière (instabilité dite de Staebler-Wronski).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Appareils électroniques.</li> <li>-Intégration dans le bâtiment</li> </ul>
<b>Cellule en Silicium Monocristallin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très bon rendement.</li> <li>- Le plus retrouvé sur le marché mondial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût élevé.</li> <li>- Sensible à la température élevée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Appareils électroniques.</li> <li>-Intégration dans le bâtiment</li> </ul>
<b>Cellule en Silicium polycristallin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon rendement de conversion, environ 100 w/m<sup>2</sup>.</li> <li>- Lingot moins cher à produire.</li> <li>- Le moins sensible à la température élevée.</li> <li>- Adapté à la production à grande échelle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rendement faible sous un faible éclairement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dans les zones chaudes pour toits, façades et générateurs</li> </ul>

### 1.6.3 Regroupement des cellules photovoltaïques

#### ➤ Regroupement en série

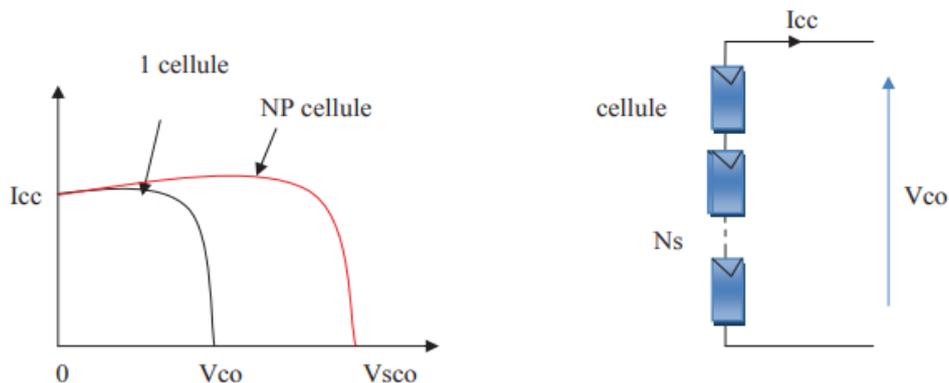
Une association de ( $N_s$ ) cellule en série figure (I.9) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électrique d'une association série de ( $N_s$ ) cellules [15].

$$V_{coNs} = N_s \cdot V_{co} \quad (1.1)$$

$$I_{cc} = I_c \quad (1.2)$$

$V_{coNs}$ : La somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{ccNS}$ : courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.



**Figure I.9** : Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série

### ➤ Regroupement en parallèle

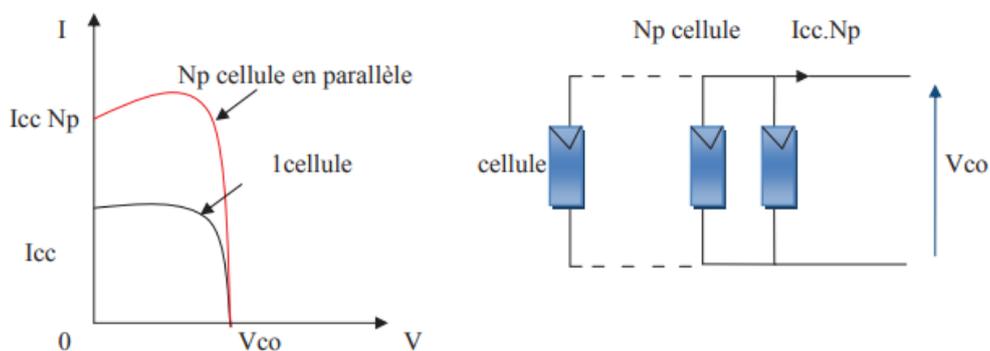
Une association parallèle de (NP) cellule figure (I. 10) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [15]

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{cc} \quad (1.3)$$

$$V_{co} = V_{coNp} \quad (1.4)$$

$I_{ccNp}$ : La somme des courants de court circuit de (NP) cellule en parallèle

$V_{coNp}$ : Tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle



**Figure I.10** : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle

### I.7 Générateur photovoltaïque [2]

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et en parallèle, elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire, elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit.

Pour produire davantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module photovoltaïque complet (générateur d'énergie). Ainsi, la connexion en série de cellules identiques permet d'augmenter la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est possible et souvent utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées afin d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande.

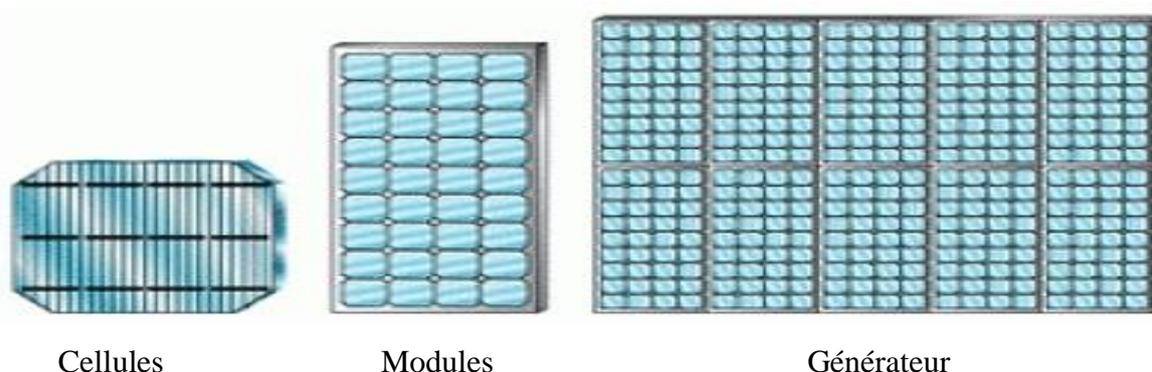


Figure I.11 : Constitution d'un générateur photovoltaïque.

### I.8 Implantation du champ de modules [18]

Pour choisir l'implantation du panneau solaire, quatre éléments sont à considérer :

- ✓ *L'orientation du champ de modules* : favoriser au maximum une orientation sud dans l'hémisphère Nord.
- ✓ *L'inclinaison des modules* : l'inclinaison optimale est généralement celle qui permet d'optimiser la production des panneaux solaires pendant le mois le moins ensoleillé. pour les régions tempérées où l'hiver est la plus mauvaise période l'inclinaison choisie est souvent la latitude plus 10°.

- ✓ **L'ombre portée sur le champ de modules** : un relevé de profils d'ombre sur le site est primordial au démarrage du projet afin de contrôler la qualité de l'ensoleillement.
- ✓ **La distance module – batteries** : En courant continu basse tension, les chutes de tension peuvent être importantes. Une distance importante entre les modules et la batterie peut rendre nécessaire la pose de câble de sections importantes (10 ou 16 mm<sup>2</sup> voire plus). Il faut donc limiter au maximum la distance entre le champ de modules et les usages en courant continu.

### I.9 Protection des modules photovoltaïques [16]

Il faut que toutes les photopiles soient éclairées de la même façon. En effet, une photopile ombragée ou même partiellement voit sa tension et surtout son intensité baisser considérablement.

Une perte de puissance risque de provoquer une polarisation inverse avec dissipation d'énergie dans la diode défailante. Pour limiter la perte de puissance, on utilise une diode bypass qui se place en dérivation de la cellule pour ne pas limiter le courant de situation de déséquilibre.

De même, si tout le module est à l'ombre, une batterie bien chargée pourrait débiter dans celui-ci, ce qui serait dangereux pour la structure de photodiode quasiment incapable de dissiper de l'énergie. On introduit une diode anti-retour sur la borne + du module pour être à l'abri d'un tel ennui.

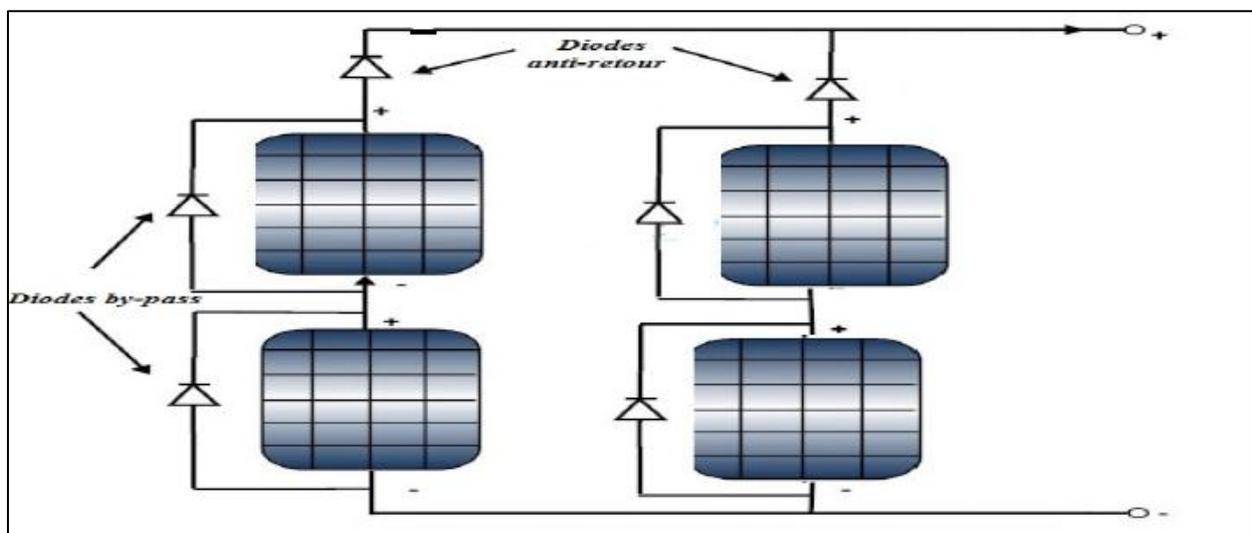


Figure I.12 : Protection des modules photovoltaïques

### **I.10 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque**

#### **I.10.1 Avantage**

Les avantages de l'électricité solaire photovoltaïque sont multiples :

- La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- L'électricité solaire photovoltaïque a pour qualité sa fiabilité, la durée de vie des capteurs supérieure à 25 ans, son autonomie, son faible impact sur l'environnement.

#### **I.10.2 Inconvénients**

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût d'investissement des panneaux des photovoltaïques et des capteurs est élevé.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Pollution à la fabrication.

### **I.11 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons effectué un prélude sur l'énergie solaire. Là où nous avons présenté d'une manière profonde les différentes définitions de ce domaine. Nous avons initié par définir les énergies renouvelables et ses types puis entamé une recherche générale sur l'énergie solaire ainsi, expliqué les différentes configurations des systèmes photovoltaïques, ses composants et la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Dans la suite de ce travail nous allons faire une étude sur la modélisation et simulation d'un système photovoltaïque.

### II.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont reconnus par leur fonctionnement en large gamme de tension et courant de sortie, mais ils ne peuvent délivrer une puissance maximale. En effet, les variations climatiques qui influent sur la caractéristique  $I(V)$  entraînent la fluctuation de la puissance maximale. Pour cela il existe plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le MPP.

Dans ce chapitre nous présentons la modélisation d'un générateur PV à une diode, en suite nous étudierons l'influence des conditions météorologiques (températures et l'ensoleillement) sur le comportement du générateur PV, ainsi nous procédons à la modélisation du convertisseur DC/DC de type boost.

### II.2. Connexion directe source-charge

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un générateur photovoltaïque et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et le très faible degré de fiabilité, dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. Figure II.1 montre ce cas de connexion. Si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, la batterie pourrait donc se décharger sur le générateur photovoltaïque et en plus l'endommager irréversiblement, Ainsi, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. Cette configuration est illustrée à la Figure II.1.

L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de puissance maximale disponible aux bornes du générateur photovoltaïque vers la charge n'est pas non plus garanti [19].

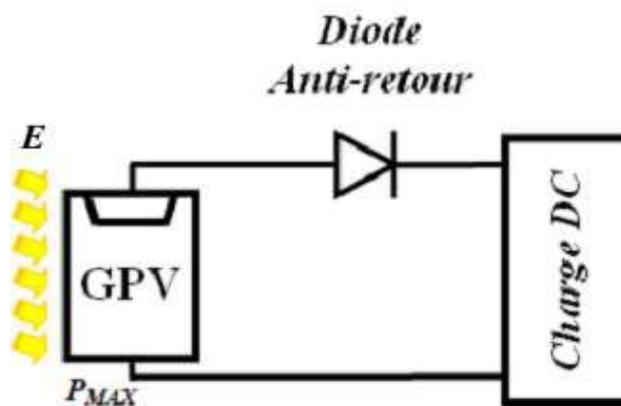


Figure II.1 : connexion directe entre un GPV et une charge.

### II.3. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec de point de puissance maximum PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau de l'ensoleillement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme décrit dans la Figure II.2.

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible [19].

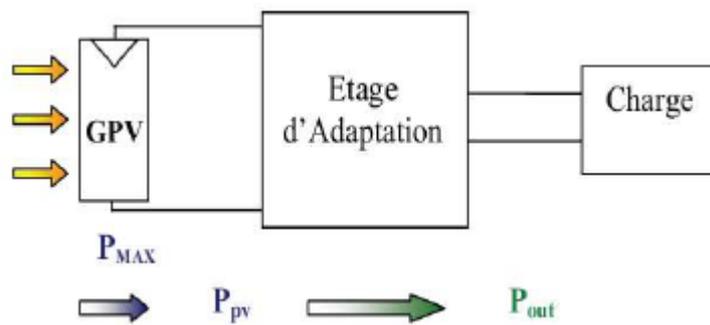


Figure II.2 : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge.

Le Rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quelques soient l'ensoleillement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation.

La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter. Elle peut être survolteur (boost).ou dévolteur. (Buck)

L'adaptateur utilisé dans notre étude est un convertisseur statique DC/DC (hacheur) de type survolteur (boost).

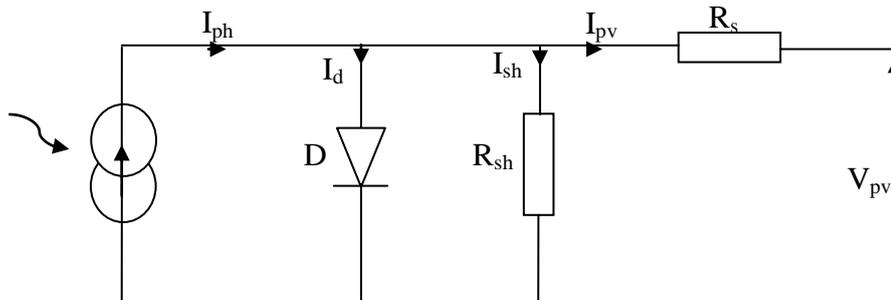
### II .4 Le modèle électrique du panneau PV utilisé

Pour optimiser le générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie soutirée, on doit adapter la caractéristique non linéaire (courant-tension) du générateur photovoltaïque

au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque [2].

### II .4.1 Modèle à une diode

Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes à des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante) [18].



**Figure II.3** : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode [2]

➤ Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

Tel que :

$I_{pv}$  : Le courant délivré par le module.

$I_{ph}$  : Photo courant.

$I_d$  : Courant de diode.

$I_{sh}$  : Le courant shunt.

➤ Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{ph} = P_1 E \left[ 1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right] \quad (\text{II.2})$$

Tel que :

$E_{ref}$  : Ensoleillement de référence

$T_c$  : Température absolue de la cellule

$T_{cref}$  : Température de référence

➤ Le courant de la diode est donné par [2]:

$$I_d = I_s e^{\frac{q(V + R_s I_{pv})}{A n_s K T_j}} - 1 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$$I_s = P_4 T_c^3 e^{\left(\frac{E_g}{KT_c}\right)} \quad (II.4)$$

Avec :

$$E_g = 1.1eV$$

$E_g$  : L'énergie de gap (paramètre caractéristique du matériau, pour le Silicium).

$I_s$  : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité.

➤ Le courant de la résistance shunt est donné par [2] :

$$I_{sh} = \frac{(V + R_s I_{pv})}{R_{sh}} \quad (II.5)$$

Tel que :

$R_s$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contacte).

$R_{sh}$  : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

D'ou l'expression de la caractéristique courant-tension (I-V) qui est donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = P_1 E \left[ 1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - P_4 T_c^3 e^{\left(\frac{E_g}{KT_c}\right)} e^{\left(\frac{q(V + R_s I)}{AKT_c} - 1\right)} \quad (II.6)$$

#### II.4.2 : Détermination des Paramètres du modèle à une diode [18]

Les sept paramètres constants P1, P2, P3, P4, le facteur d'idéalité A et les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  du modèle du générateur PV sont déterminés part une résolution numérique (méthode Newton Raphson).

$$\left( \begin{array}{l} I_{pv}(V_{oc}) = 0 \\ I_{pv}(0) = I_{cc} \\ I_{pv}(V_m) = I_m \\ \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_m + \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \\ P_{pv} = P_m \quad V_{pv} = V_m \quad \text{et} \quad I_{pv} = I_m \end{array} \right) \quad (II.7)$$

Où les coefficients  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  et  $A$  sont donnés par :

$$\left( \begin{array}{l} P_1 = 0.00345 \\ P_2 = \frac{P_4}{V_{oc}} \\ P_3 = \ln \left[ \frac{I_{cc}(1+P_1) - I_m}{P_1 + I_{cc}} \right] \\ P_4 = \ln \left( \frac{1+P_1}{P_1} \right) \\ A = \frac{\ln \left( \frac{P_3}{P_4} \right)}{\ln \left( \frac{V_m}{V_{oc}} \right)} \end{array} \right. \quad (\text{II.8})$$

Dans ce travail, nous avons utilisé le panneau SIEMENS SM 110-24 de 110 W.

Le tableau (II. 1) donne les paramètres électriques de panneaux utilisé dans les conditions standards :

**Tableau II.1** : Paramètres du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110

Puissance max du panneau $P_m$	110W
Courant au point de puissance max $I_m$	3.15A
Tension au point de puissance max $V_m$	35V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	3.45A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	43.5V
Coefficient d'incrémention du courant $I_{cc}(a_{cc})$	1.4mA/°C
Coefficient d'incrémention de la tension $V_{oc}(\beta_{oc})$	-152 mV/°C

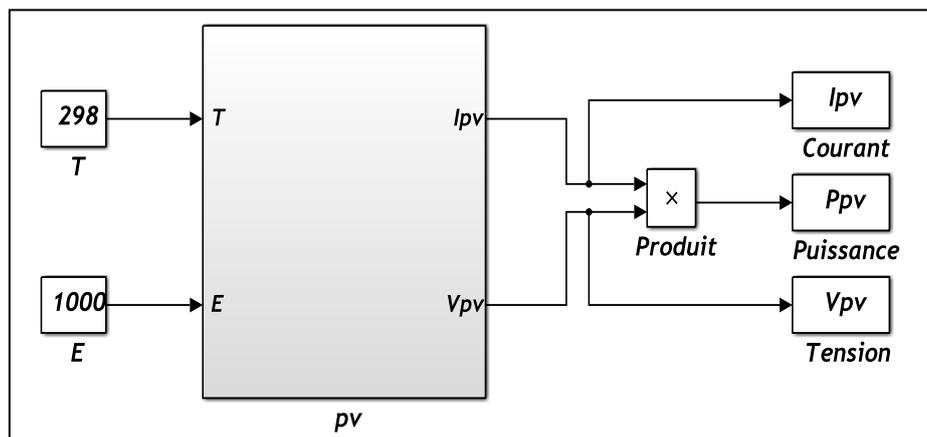
Les valeurs des paramètres du modèle à une diode sont données dans le tableau (II. 2) :

**Tableau II.2 :** Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110.

$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$A$	$R_{sh}$	$R_s$
0.00345	$0.58.10^{-5}$	$-0.336.10^{-4}$	31.2367	1	0.614	151

### II.5 Simulation du panneau photovoltaïque

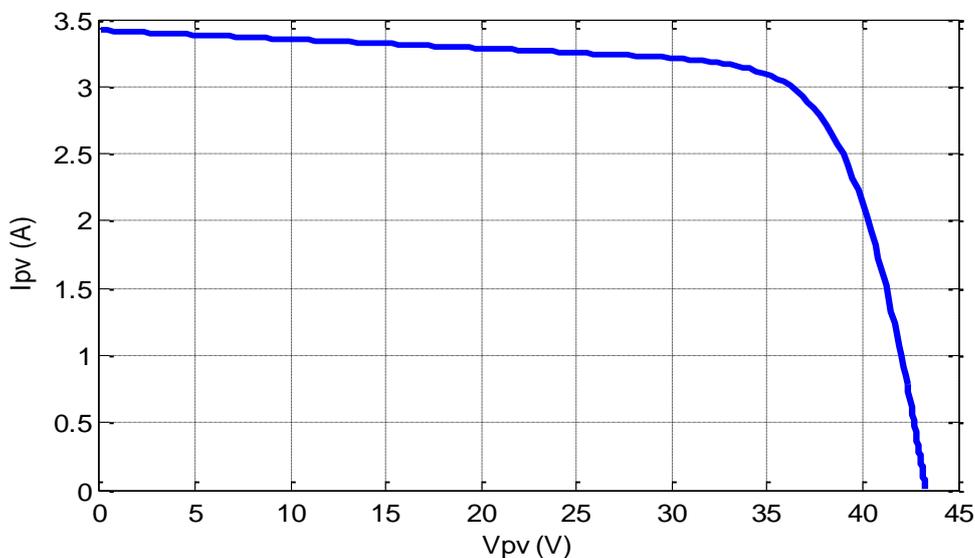
Dans l’environnement Matlab-Simulink, on a réalisé le schéma bloc du générateur photovoltaïque de type SIEMENS SM 110, la figure (II.4) représente le schéma de simulation du module photovoltaïque.



**Figure II.4 :** Schéma de simulation du panneau photovoltaïque

#### II .5.1 Caractéristique de $I_{pv}(V_{pv})$ ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , $T_c = 25^\circ\text{C}$ )

La figure (II.5) représente la Caractéristique de  $I_{pv}(V_{pv})$  d’un panneau photovoltaïque de types SIEMENS SM 110 dans des conditions constantes d’ensoleillement et de température.



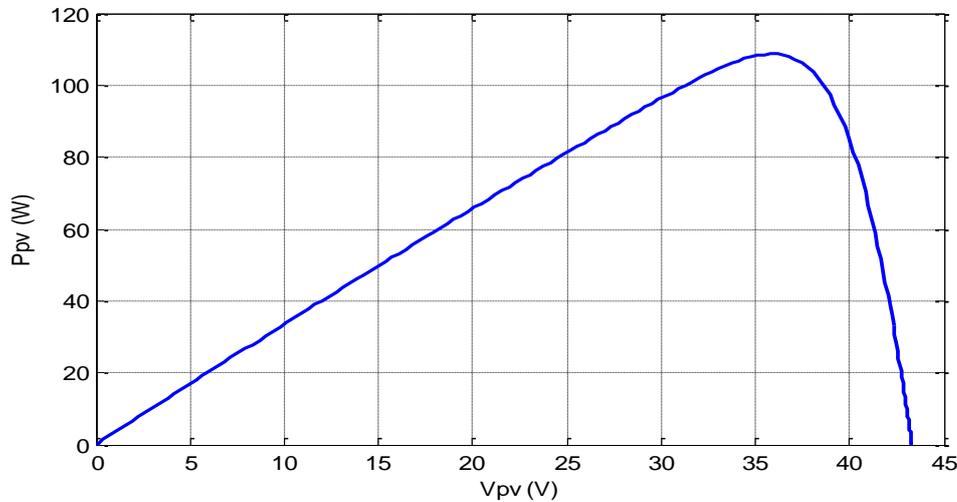
**Figure II.5 :** Caractéristique de  $I_{pv}(V_{pv})$  ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_c = 25^\circ\text{C}$ ).

### II .5.2 : Caractéristique de Ppv(Vpv) (E = 1000 W/m2, Tc = 25°C)

La puissance délivrée par le module a pour expression :

$$P = V I \quad (II.9)$$

Pour chaque point, on peut calculer la puissance P et tracer la Caractéristique de Ppv(Vpv) comme le montre la figure (II.6).



**Figure II.6** : Caractéristique de Ppv (Vpv) (E = 1000 W/m2, Tc = 25°C).

On remarque d'après La caractéristique (courant-tension) que le module photovoltaïque possède trois zones de fonctionnement qui sont :

La zone (1) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, (Le module se comporte comme un générateur de courant)

La zone (2) : La tension est presque constante, et le courant vari. (Le module se comporte comme un générateur de tension).

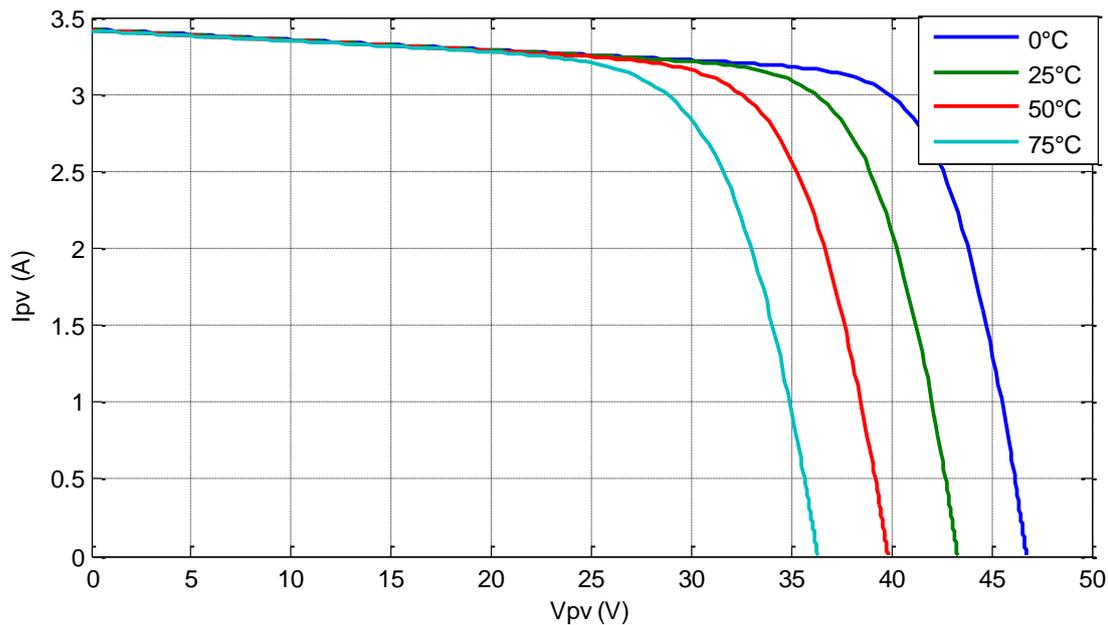
La zone (3) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

## II.6 L'influence de la température et de l'ensoleillement

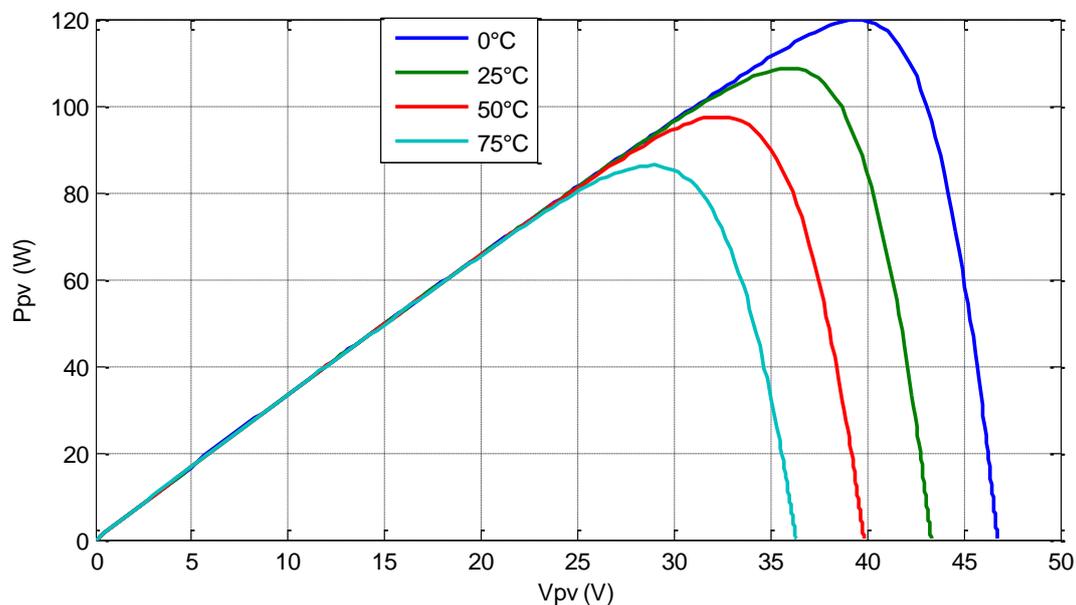
### II.6.1 L'influence de la température

Pour le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque, la cellule PV doit s'exposer au rayonnement solaire. Ceci provoque un échauffement et la température agit sur les différentes caractéristiques de la cellule.

On fixe l'ensoleillement à 1000 W/m2 et on fait varier la température de 0°C jusqu'à 75°C, les allures obtenues sont présentées en dessous :



**Figure II.7 :** Influence de la température sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$



**Figure II.8 :** Influence de la température sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$

On remarque que la tension de circuit ouvert diminue, lorsque la température augmente. Par contre le courant de court-circuit est faiblement dépendant de la température, cela se traduit par une baisse de puissance.

### II .6.2 L'influence de l'ensoleillement

On applique une température  $T=25^{\circ}\text{C}$  maintenue constante et l'on fait varier l'ensoleillement de  $400\text{ W/m}^2$  jusqu'à  $1000\text{ W/m}^2$ , les résultats obtenus sont illustrés par les figures suivantes.

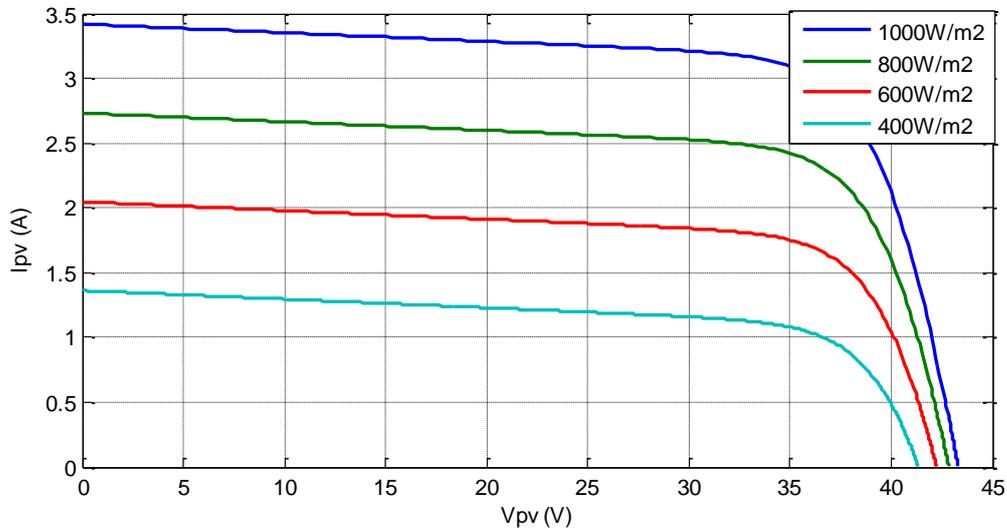


Figure II.9 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$

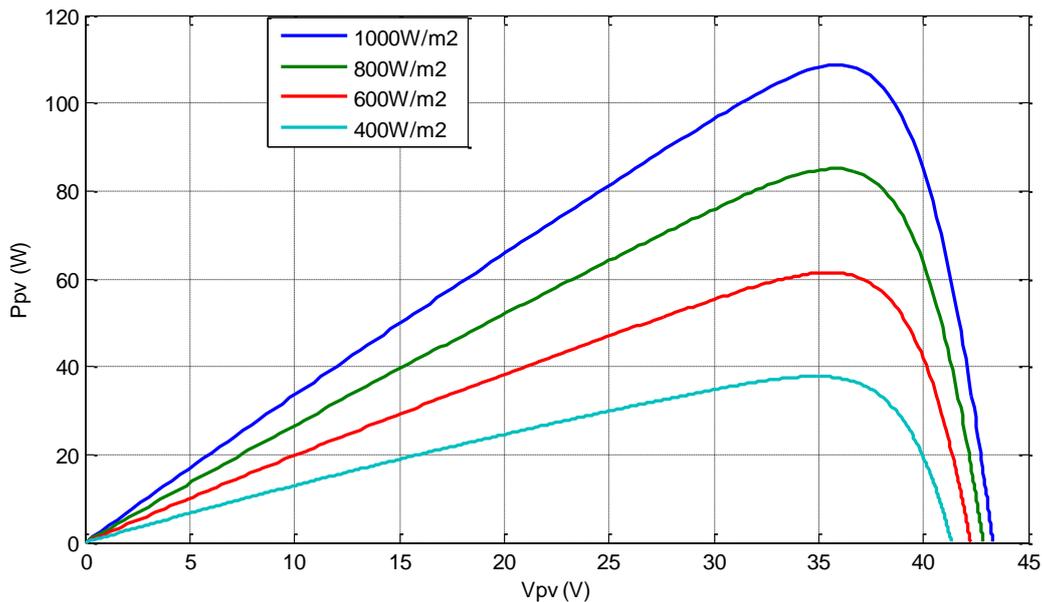


Figure II.10 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$

La variation de l'ensoleillement influe sur le courant de court-circuit qui diminue quand l'ensoleillement diminue, par contre la tension à circuit ouvert est peu sensible à cette variation, ce qui engendre une diminution de la puissance maximale.

## II.7 Modélisation du hacheur survolteur [18]

La figure (II.11) représente le circuit électrique d'un hacheur survolteur, il est constitué d'un interrupteur de puissance (K), une inductance (L), une diode (D), et un condensateur (C).

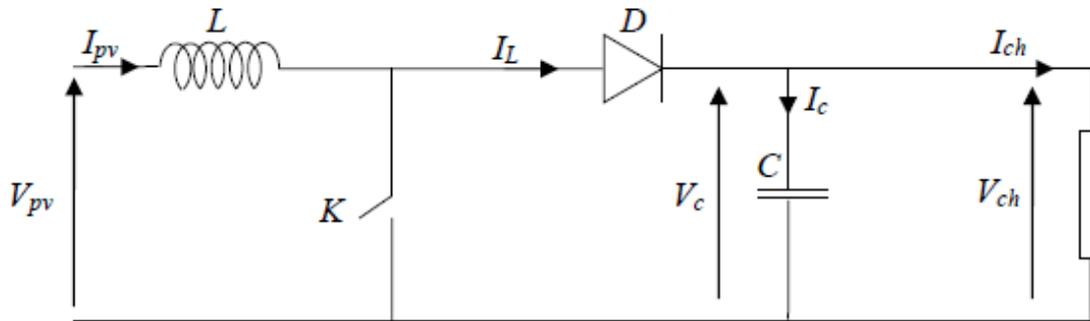


Figure II.11 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost)

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, comporte deux étapes.

**1ere étape :** L'interrupteur est fermé (passant) et la diode bloquée, cette phase dure de 0 à  $\alpha \cdot T$ , sachant que le rapport cyclique  $\alpha$  est compris entre 0 et 1. Le condensateur C est supposé initialement chargé, il fournit de l'énergie à la charge et un courant  $I_C$  circule dans cette dernière :

$$I_L = 0 = I_C + I_{Ch} \quad (\text{II.10})$$

$$V_{PV} = V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.11})$$

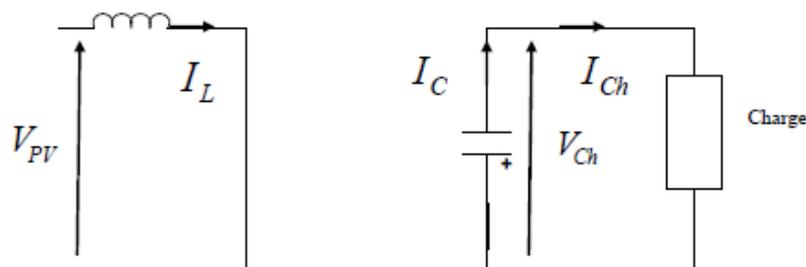
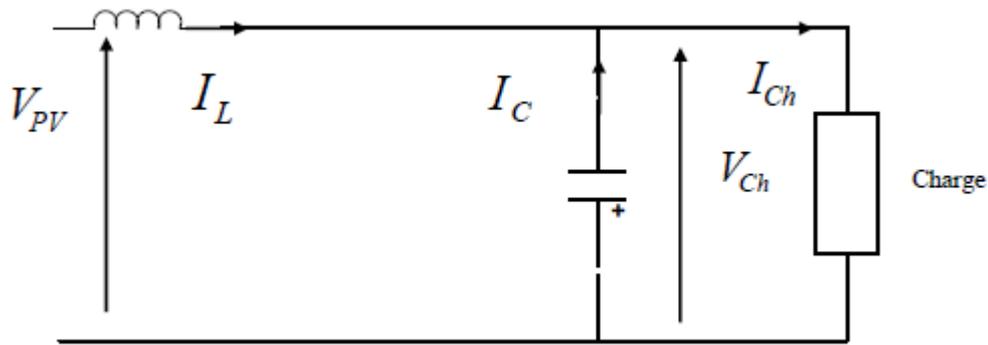


Figure II.12 : Schéma d'un hacheur boost à  $t \in [0, \alpha \cdot T]$ .

**2ème étape :** L'interrupteur est ouvert (bloqué), la diode est passante, cette phase dure de  $\alpha \cdot T$  à T.

$$I_L = I_C + I_{Ch} \quad (\text{II.12})$$

$$V_{PV} = V_L + V_{Ch} \quad (\text{II.13})$$



**Figure II.13** : Schéma d'un hacheur boost à  $t \in [\alpha. T, T]$ .

On en déduit la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes :

$$V_{PV} = L \frac{di_L}{dt} + V_{Ch}(1 - \alpha) \quad (\text{II.14})$$

$$I_{Ch} = I_L(1 - \alpha) - C \frac{dV_{Ch}}{dt} \quad (\text{II.15})$$

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes constitutions d'un système photovoltaïque ainsi que la modalisation du générateur PV

De plus, nous avons présenté le comportement de notre système et ses performance sous l'influence de différents conditions atmosphérique à savoir l'influence du de l'ensoleillement et la température.

Par ailleurs, en a fait une modalisation du convertisseur DC/DC de types survolteur, et cela pour pouvoir établir la condition de fonctionnement adéquat nécessaire à son couplage avec le générateur photovoltaïque.

Finalement, et vu l'influence des facteurs climatique a savoir de l'ensoleillement et la température sur le rendement du générateur PV nous présentons dans le chapitre suivant les différents méthodes pour la recherche et la poursuite du point de puissance maximale (mppt) essentiellement la MPPT perturbation et d'observation (P&O) et la MPPT logique flou.

### III.1 Introduction

La caractéristique de la cellule solaire I-V est non-linéaire et change avec l'ensoleillement et la température. Il y a un point unique sur la courbe (P-V), appelé le point de la puissance maximale (MPP), auquel le système PV fonctionne avec un rendement maximum et produit sa puissance maximale. Le point de la puissance maximale peut être situé, par des modèles de calcul. Par conséquent les techniques de poursuite de point maximum de puissance (MPPT) sont nécessaires pour maintenir le point du fonctionnement du panneau photovoltaïque à son MPP.

Dans ce chapitre nous intéressons à deux méthodes pour la recherche de point de puissance maximale (La méthode perturbation et observation (P&O) et la méthode par contrôleur logique flou), en suite en va améliorer les résultats avec l'emploi d'un régulateur PI.

### III.2. Principe de la recherche du point de puissance maximal

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé [21]. La technique de suivi du point à puissance maximal a été développé depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. [21]

La Figure III.1 représente la Chaîne de conversion PV avec le contrôleur MPPT. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, 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. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du hacheur en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier ( $I_{PV}$  et  $V_{PV}$  et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. Plusieurs algorithmes sont présents dans la littérature, nous présentons quelques-uns plus loin dans ce chapitre.

La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur DC/DC commandé par une MPPT. Il peut être représenté par le schéma de la Figure III.1.

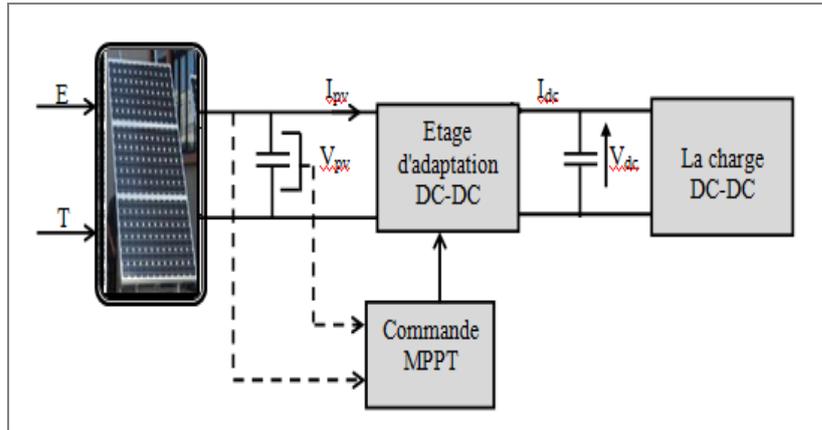
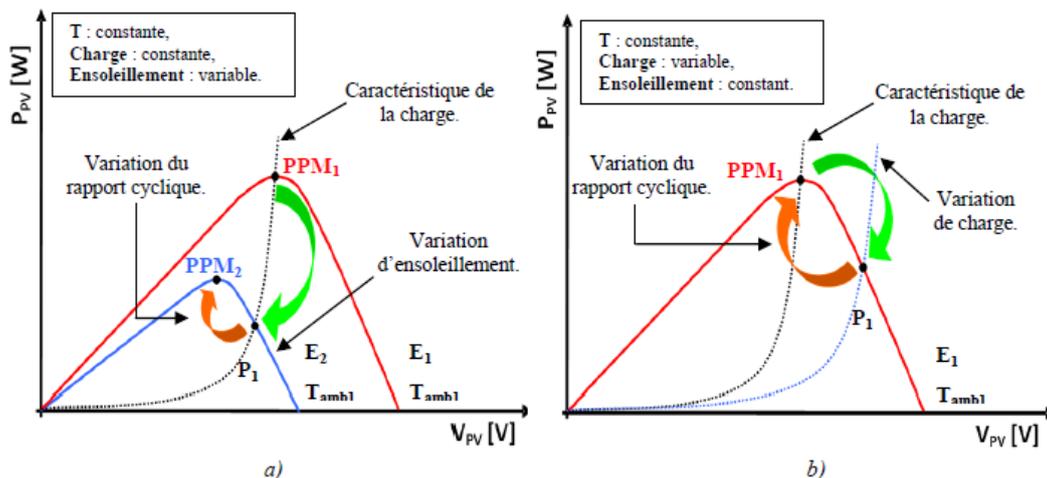


Figure III.1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

La figure III.2 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du générateur photovoltaïque (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du générateur photovoltaïque [23].



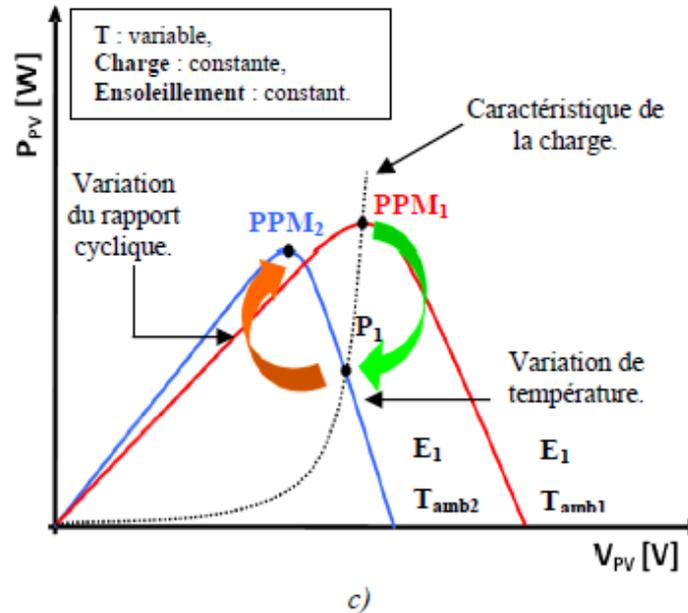


Figure III.2 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal [23]

- a) suite à une variation d'ensoleillement,
- b) suite à une variation de charge,
- c) suite à une variation de température

### III.3 Techniques de poursuite du point de puissance maximale

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas d'un panneau photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. Ces dernières années plusieurs dispositifs ont été développés, aussi élaborés les uns que les autres [22].

Il existe deux catégories de de poursuite du point de puissance maximale. : Les méthodes indirectes et les méthodes directes. [22]

#### III.3.1 Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de

déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser. Parmi elles, on peut citer :

- la méthode d'ajustement de courbe,
- la méthode "look-up table"
- la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur,
- la méthode de court-circuit.

#### **III.3.2 Les méthodes directes**

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de perturbation et d'Observation (P&O), l'incrément de conductance algorithme basé sur la logique floue et mode glissant.

#### **III.4 La méthode de Perturbation et d'Observation (P&O)**

La méthode de perturbation et d'observation est une approche itérative largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{PV}$  et  $I_{PV}$  respectivement puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte.

Le principe des commandes MPPT de type P&O 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. Ainsi, comme l'illustre la figure (III.3), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [23].

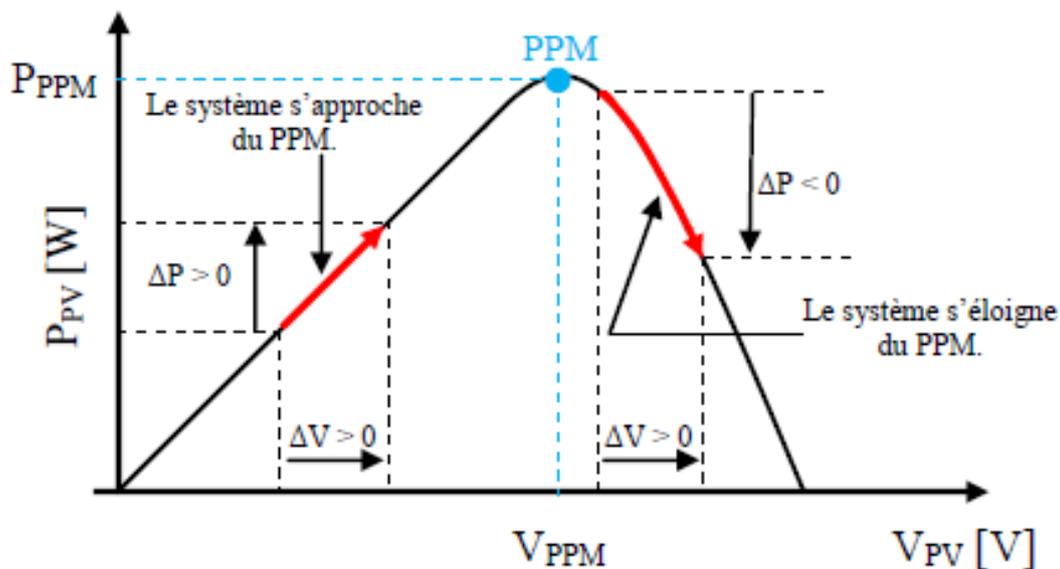


Figure III.3 : Principe de la P&O [23]

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP. Le Tableau III.1 et la Figure III.3 résume le principe de fonctionnement de cette méthode.

Tableau III.1 : Les modes de perturbation de la méthode P&O.

Perturbation	Changement de puissance	Perturbation suivante
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure suivante :

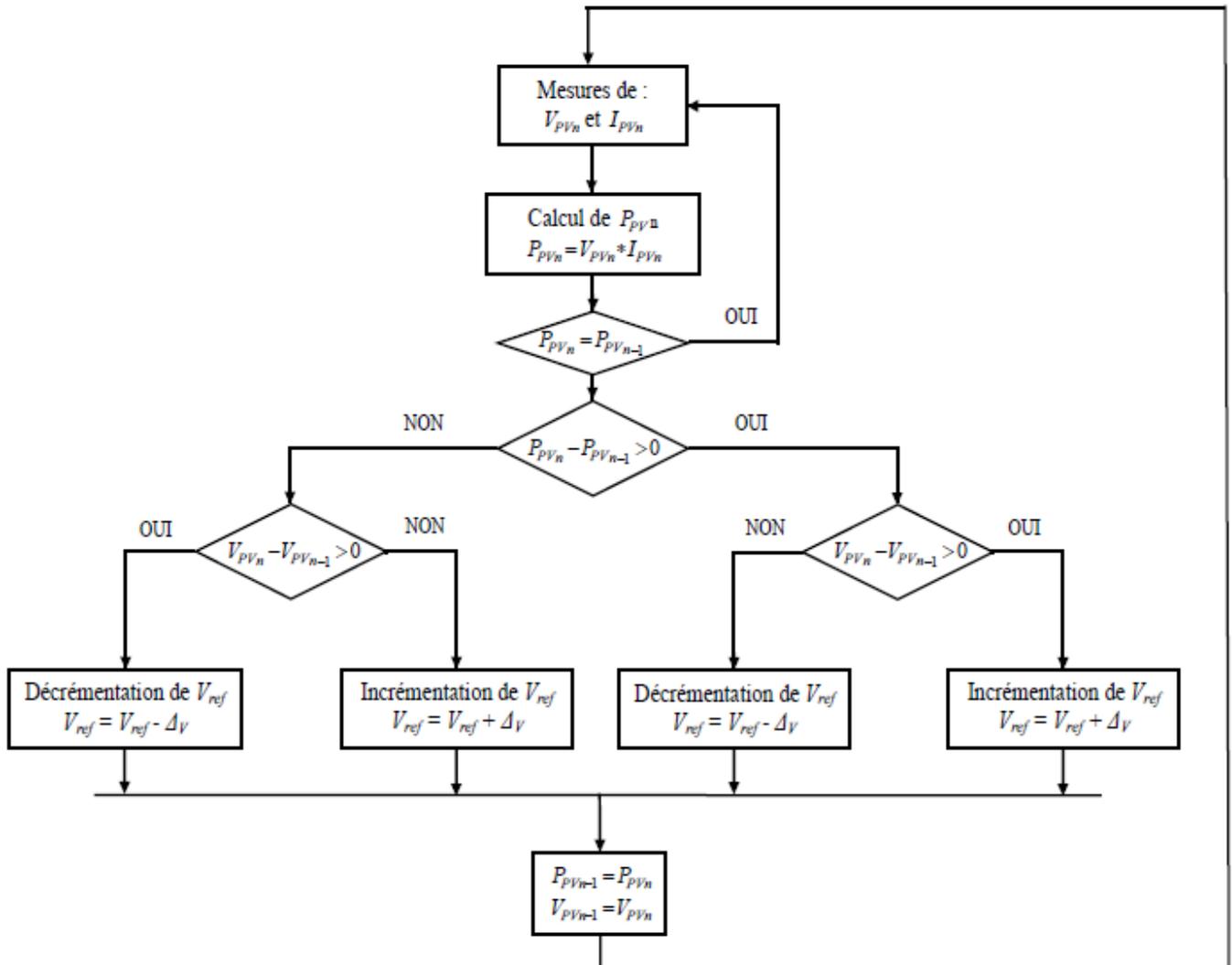
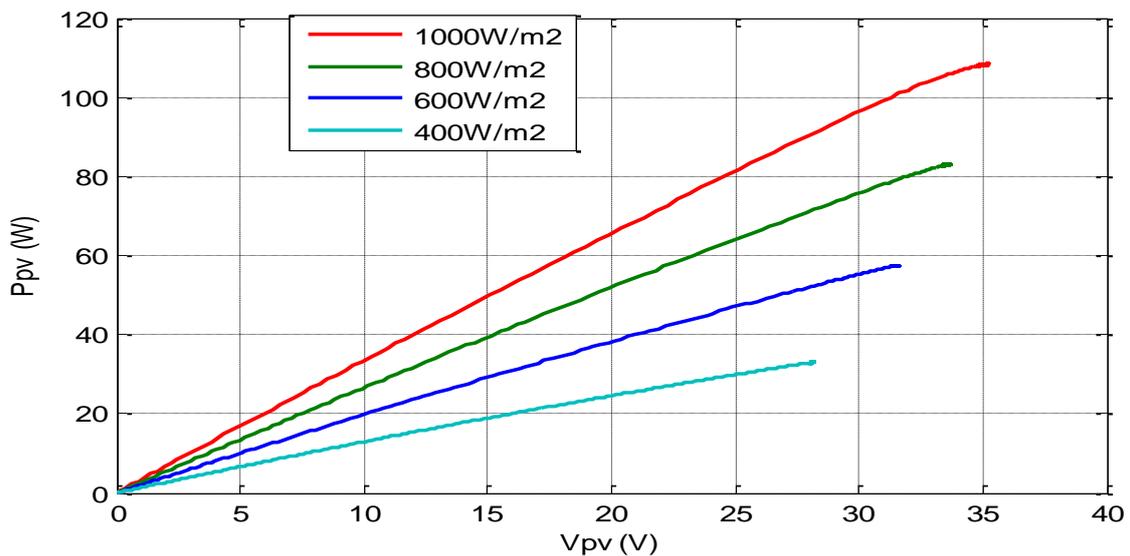


Figure III.4 : Organigramme de la méthode Perturbation et Observation [23]

L'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension des panneaux photovoltaïques) sont nécessaires pour déterminer la puissance du générateur photovoltaïque à chaque instant.

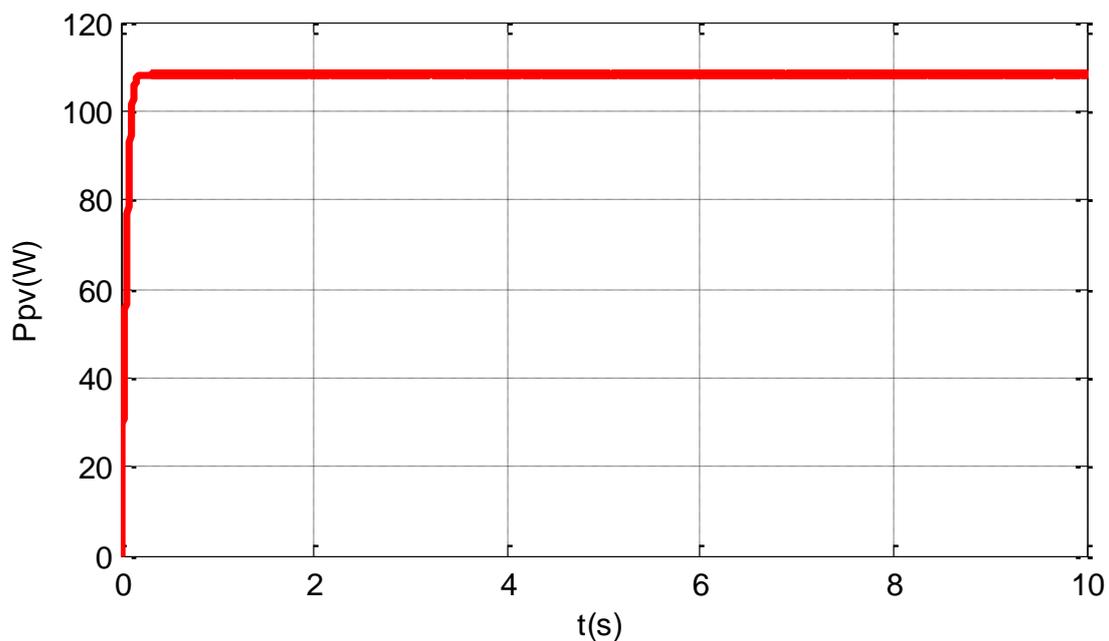
Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation (sous Matlab/Simulink), du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque de type Siemens SM110-24, avec l'application de l'algorithme P&O.



**Figure III.5.** Caractéristique (P-V) de l'algorithme P&O

Quand le point de puissance maximale est atteint, la commande MPPT maintient le point de fonctionnement à ce dernier (Figure III.5).

Nous présentons ci-dessous (sous Matlab/Simulink) l'allure de la puissance d'un panneau photovoltaïque de type Siemens SM110-24, avec l'application de l'algorithme P&O.



**Figure III.6 :** L'allure de la puissance photovoltaïque par la commande P&O

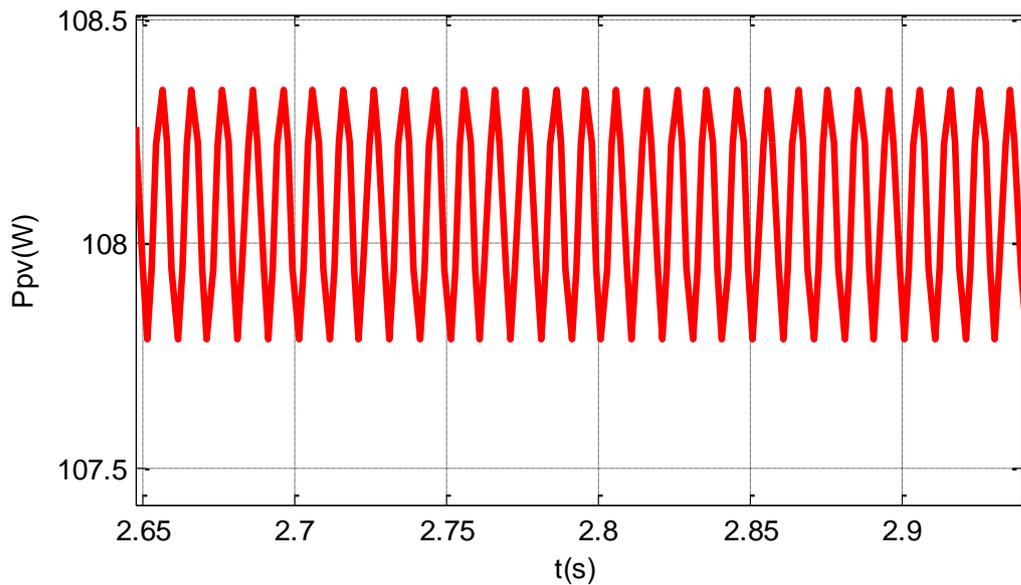


Figure III.7 : Zoom sur L'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent par la commande P&O

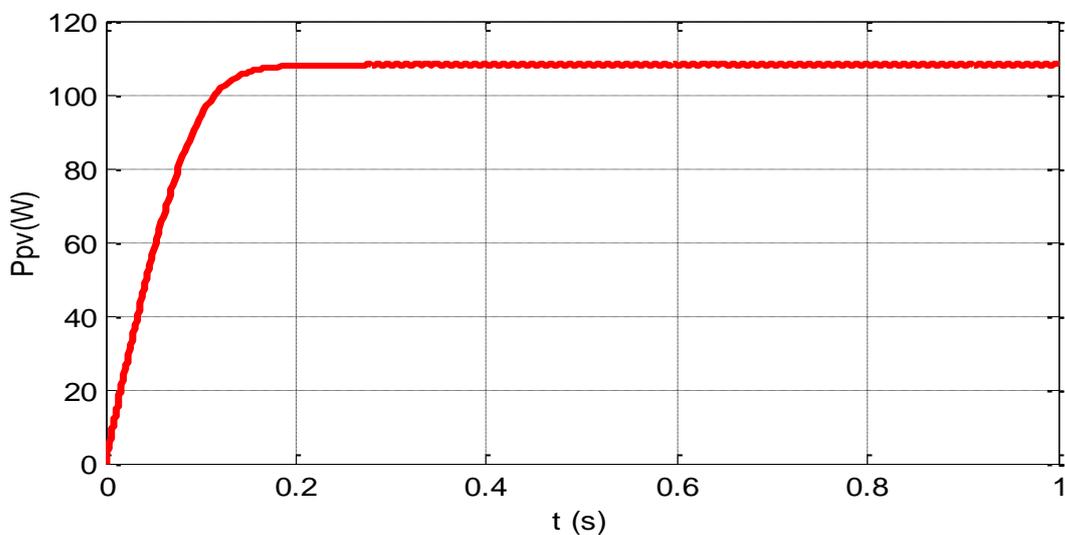


Figure III.8 : Zoom sur le temps de réponse par la commande P&O

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée vu sa simplicité, cependant elle présente quelques problèmes. En effet, il arrive que l'algorithme de P&O diverge de point de puissance maximale en cas de fluctuation très rapide de l'ensoleillement. Même en cas de conditions d'exploitation constantes, on observe des variations de la tension et de courant ce qui engendre des oscillations au tour de point de puissance maximale.

### III.5. Méthode à base de Logique floue (FLC)

#### III.5.1. Introduction

La logique floue a fait son apparition en 1965 avec les travaux de L. Zadeh, ce dernier a formalisé la représentation et le traitement de connaissances imprécises ou approximatives afin de traiter des systèmes de grande complexité ou mal connus [24]. Dès 1974, la logique floue a connue des applications au niveau des systèmes de réglage et de contrôle ; la première implantation d'un contrôleur flou a été appliquée par l'équipe du professeur Madani sur une machine à vapeur au Queen Mary Collège de Londres [26].

#### III.5.2 Principe de la logique floue

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous qui mettent en évidence la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis, ce qui n'est pas possible avec les théories mathématiques classiques. [26]

Donc l'idée de la logique floue est de transmettre cette richesse de raisonnement humain à un ordinateur. Cette logique peut être considérée comme une technique puissante pour le traitement de connaissances incertaines.

Pour simplifier le principe de la logique floue, on présente un exemple simple [20], qui consiste à la classification des personnes en trois ensembles « jeune », « entre deux âges », « âgé ».

Selon la logique classique, qui n'admet pour variables que les valeurs 0 et 1, une telle classification pourrait se faire comme le montre la Figure III.9. Toutes les personnes âgées de moins de 30 ans sont alors considérées comme appartenant à l'ensemble « Jeune » et toutes les personnes âgées de plus de 50 ans comme appartenant à l'ensemble « Âgé ».

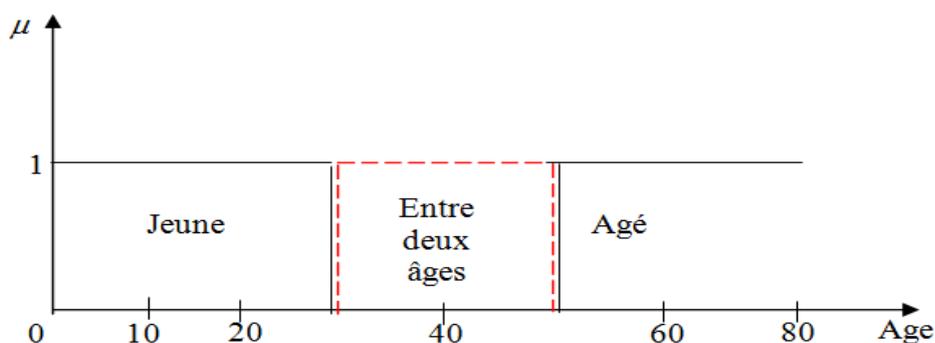
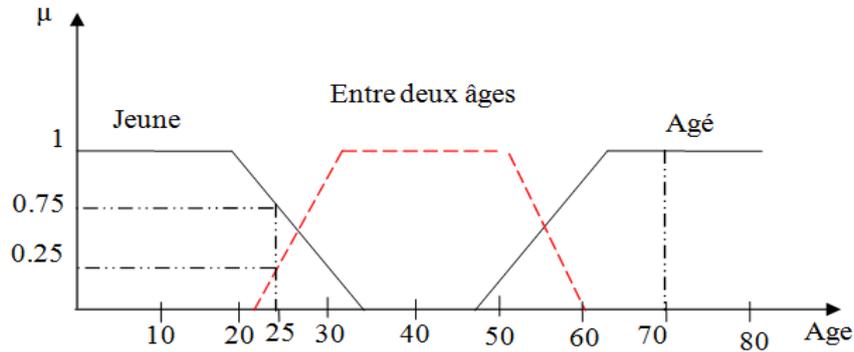


Figure III.9 : Classification selon la logique classique (booléenne) [20]

La logique floue, dont les variables peuvent prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1, on parle alors de fonction d'appartenance, la Fig.III.10 montre une classification possible pour l'exemple précédent :

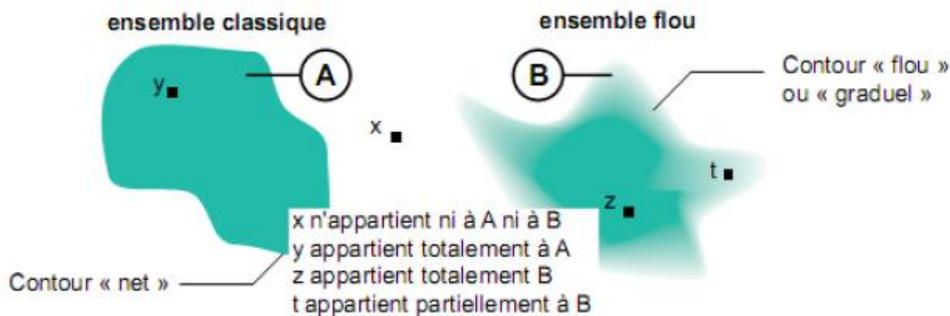


**Figure III.10 :** Classification selon la logique floue [20]

Une personne de 25 ans appartient à l'ensemble « jeune » avec une valeur de la fonction d'appartenance  $\mu=0.75$  et à l'ensemble « entre deux âges » avec  $\mu=0.25$  par contre, une personne de 70 ans appartient avec une valeur  $\mu=1$  à l'ensemble « âgé ».

**III.5.3. Ensembles flous [17]**

Dans la théorie classique des ensembles, c'est la fonction caractéristique qui définit l'ensemble. Cette fonction ne prend que les deux valeurs discrètes 0 (l'élément n'appartient pas) ou 1 (appartient à l'ensemble). Alors qu'en logique floue, il peut admettre les deux propositions avec un degré de vérité pour chacune (voir figure III.11). L'idée est de remplacer l'ensemble binaire {0,1} par un intervalle [0 1] ceci permet des graduations dans l'appartenance d'un élément à une situation, ce qui permet la modélisation de l'observation humaine exprimée par des expressions linguistiques



**Figure III.11 :** Comparaison entre un ensemble classique et un ensemble flou. [17]

### III.5.4 Variables linguistiques

Une variable linguistique est un triplet  $(x, U, \mu_A(x))$  dans lequel  $x$  est une variable définie sur un ensemble de référence  $U$ . L'ensemble  $(x) = \{A1, A2, \dots\}$  fini ou infini, contient des sous-ensembles flous de  $U$ , utilisable pour caractériser  $x$  [8].

### III.5.5. Fonctions d'appartenance

Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques (normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours), il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe [25]. Les Fonctions d'appartenance peuvent prendre plusieurs formes, les plus utilisées sont :

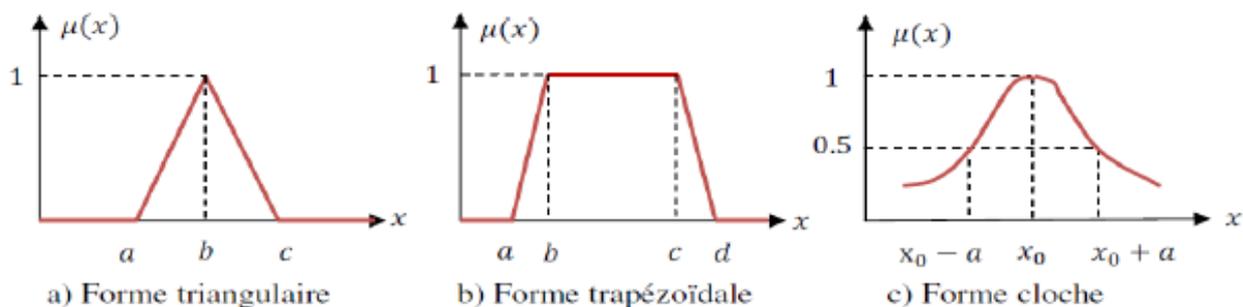


Figure III.12 : Les différentes formes de la fonction d'appartenance

Pour certaines situations, les fonctions d'appartenance sont égales à l'unité pour une seule valeur de la variable et égale à 0 pour les autres comme le montre la Figure III.13. Elles prennent alors le nom de « fonction d'appartenance singleton ».

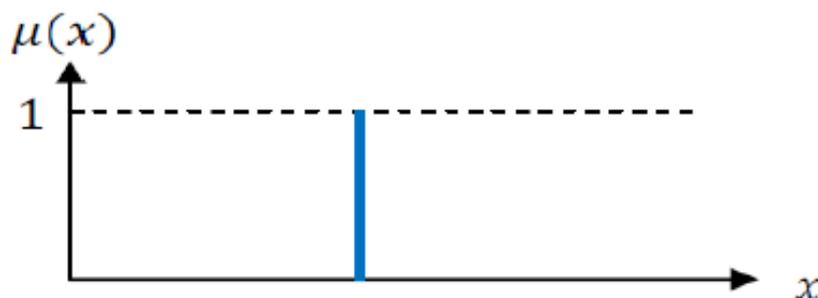


Figure III.13 : Fonction d'appartenance singleton.

### III.5.6 Opérateurs de la logique floue [17]

- **Opérateur ET (Intersection floue)**

L'opérateur ET correspond à l'intersection de deux ensembles A et B. Dans le cas de la logique floue, l'opérateur ET est réalisé dans la plupart des cas par la fonction du minimum, qui est appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(x)$  des ensembles A et B (voir figure III.14) :

$$\mu_{A \cap B}(X) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}$$

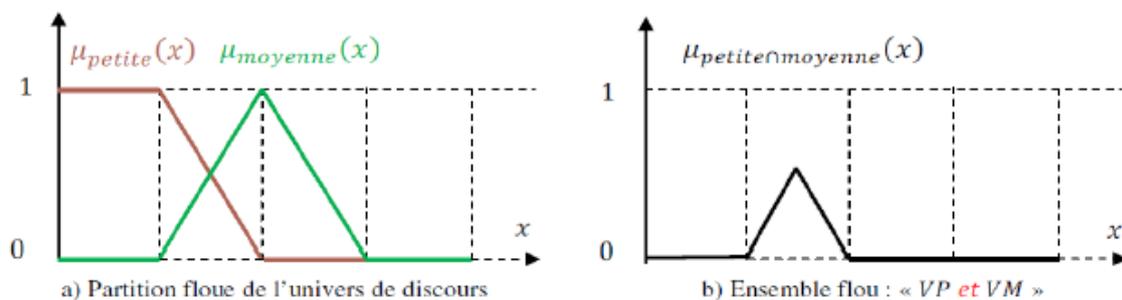


Figure III.14 : Intersection des sous-ensembles flous

- **Opérateurs OU (Union floue)**

L'opérateur ou correspond à l'union de deux ensemble A et B. Dans le cas de la logique floue, l'opérateur OU souvent par la fonction du maximum, qui est appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(x)$  des ensembles A et B (voir figure III.15) :

$$\mu_{A \cup B}(X) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}$$

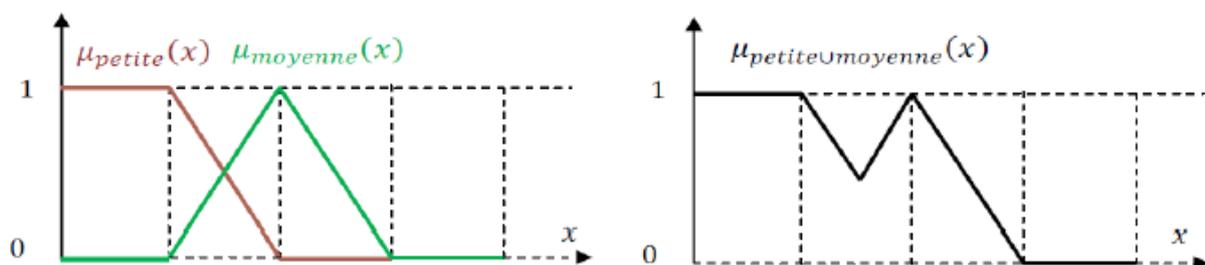


Figure III.15 : Union des sous-ensembles flous

- **Opérateur NON (complément)**

L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation :

$$\mu^-_A(x) = 1 - \mu_A(x)$$

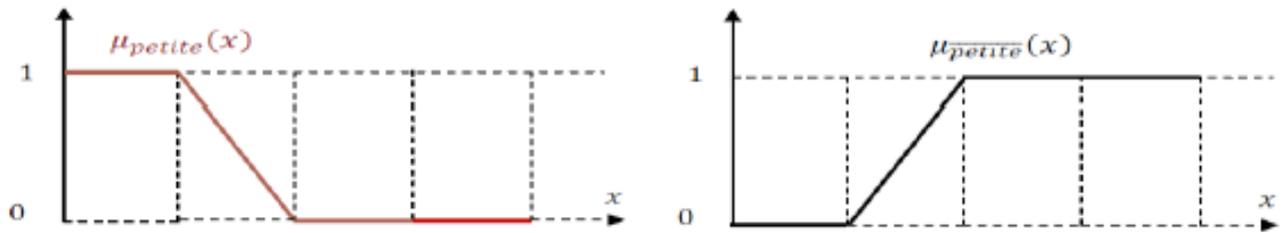


Figure III.16 : Illustration de l'opération NON.

### III.5.7 Domaine d'application [17]

L'approche de traitement des problèmes par la logique floue est différente de celle adoptée, à priori dans une démarche scientifique. Elle est beaucoup plus pragmatique que déterministe. La décision en logique floue est basée sur la notion d'expertise qui permet de quantifier le flou à partir de connaissance à priori ou acquise antérieurement. Les domaines d'application de la logique floue dans un processus de prise de décision s'imposent dans les cas suivants :

- ✓ Pour les systèmes complexes dans lesquels la modélisation est difficile ou impossible.
- ✓ Pour les systèmes contrôlés par des experts humains.
- ✓ Quand l'observation humaine est à l'origine d'entrées ou des règles de contrôle.

### III.5.9 Description d'un régulateur flou : [18]

Le schéma synoptique général d'un système flou est illustré par la figure (III.17). Quel que soit le type d'application, on retrouve généralement la même configuration répartie en quatre blocs :

- Une interface de fuzzification à l'entrée.
- Une base de règles.
- Un mécanisme d'inférence.
- Une interface de défuzzification à la sortie.

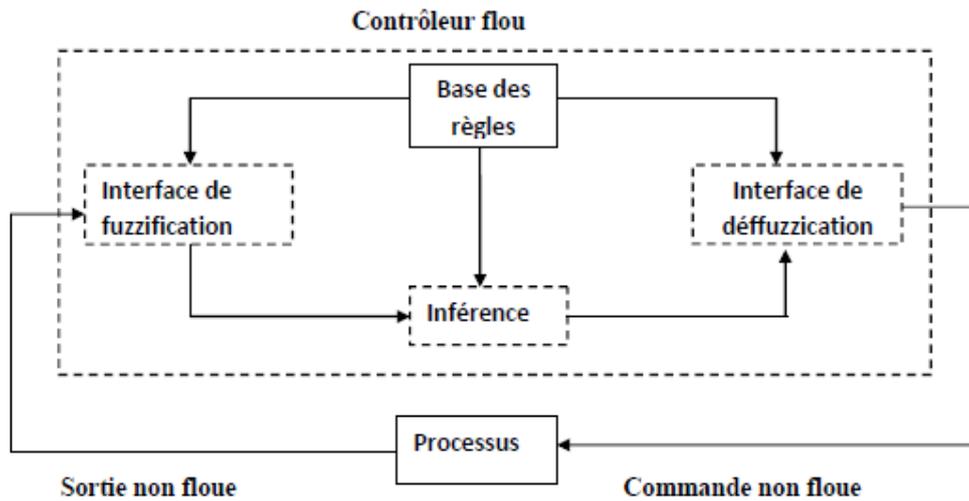


Figure III.117 : Schéma synoptique général d'un contrôleur flou

- une base des règles, qui contient la définition des termes utilisés dans la commande et les règles caractérisant la cible de la commande et décrivant la conduite de l'expert ;
- une logique de prise de décision, qui transforme à l'aide des techniques de raisonnement flou la partie floue issue l'inférence de fuzzification, en une nouvelle partie floue ;
- une interface de fuzzification, laquelle permet de transformer les grandeurs mesurées d'entrée en des grandeurs floues ;
- une interface de défuzzification à la sortie, laquelle détermine une action précise à partir des descriptions floues des variables de sortie.

### III.5.10. Application de la commande par la logique floue

Dans ce travail, on présente la commande MPPT a base de la logique floue pour minimiser les oscillations de la méthode perturbation et observation (P&O) qui induits des pertes importants de puissance et pour améliorer la réponse de la commande.

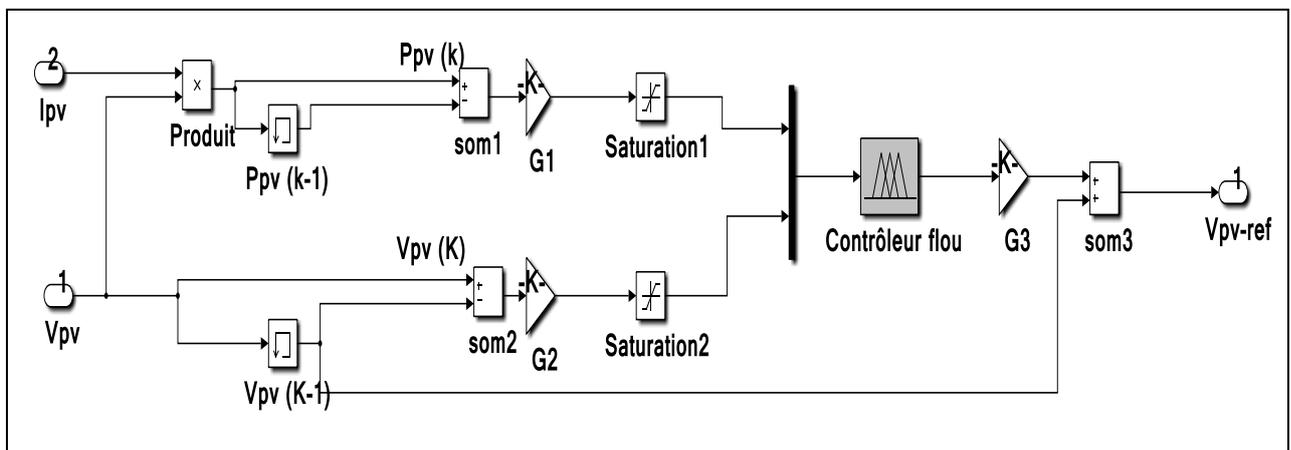


Figure III.18 : Structure d'un contrôleur MPPT flou.

### ➤ 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.

La figure (III.18) représente La structure du contrôleur par logique floue appliqué au système photovoltaïque. Il reçoit comme entrées la variation de la tension et de la puissance de générateur photovoltaïque  $\Delta V_{pv}$ ,  $\Delta P_{pv}$  telle que :

$$\Delta P_{PV} = P_{PV}[K] - P_{PV}[K - 1] \quad (III.1)$$

$$\Delta V_{PV} = V_{PV}[K] - V_{PV}[K - 1] \quad (III.2)$$

Pour la sortie le contrôleur flou détermine l'incrément optimal qui doit être ajouté à la tension de fonctionnement pour extraire le point de puissance maximal, cette sortie est utilisée pour calculer le rapport cyclique du convertisseur DC/DC.

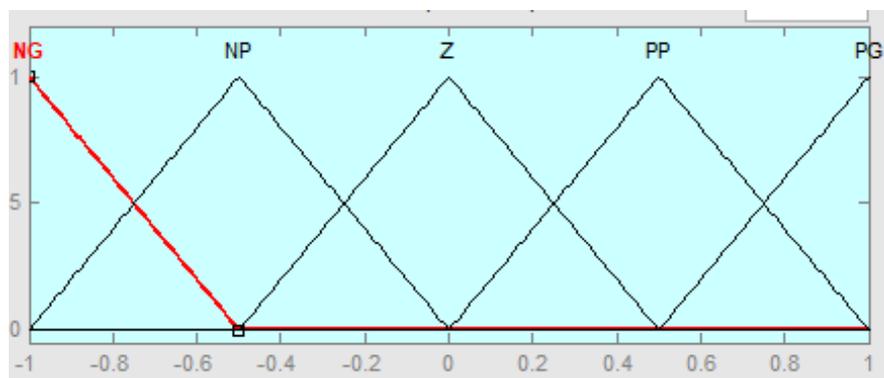
$$\Delta V_{PV.ref}[K] = V_{PV}[K - 1] - \Delta V_{PV.ref}[K - 1] \quad (III.3)$$

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq sous-ensembles flous.

Les sous-ensembles flous sont notés comme suit :

**NG** : négatif grand, **NP** : négatif petit, **Z** pour le zéro, **PP** : positif petit, **PG** : positif grand.

La figure (III.19) représente la fonction d'appartenance de ces cinq sous-ensembles flous :



**Figure III.19** : Fonction d'appartenance du contrôleur flou (entrées, sortie).

### ➤ Inférence floue

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrée par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain, en traduisant simplement des remarques de bon sens.

Pour le réglage par logique floue, on utilise en général une des méthodes suivantes : méthode d'inférence MAX-MIN (méthode de MAMDANI) et méthode de SUGENO.

La table des règles du contrôleur flou, appliquée pour le fonctionnement en MPPT de notre système photovoltaïque est donnée dans le **Tableau (III.2)**.

**Tableau III.2 :** Table des règles de décision à cinq classes

$\Delta P_{PV}$	NG	NP	Z	PP	PG
$\Delta V_{PV}$					
NG	PG	PP	Z	NP	NG
NP	PG	PP	Z	NP	NG
Z	NG	NP	Z	PP	PG
PP	NG	NP	Z	PP	PG
PG	NG	NP	Z	PP	PG

#### ➤ Defuzzification

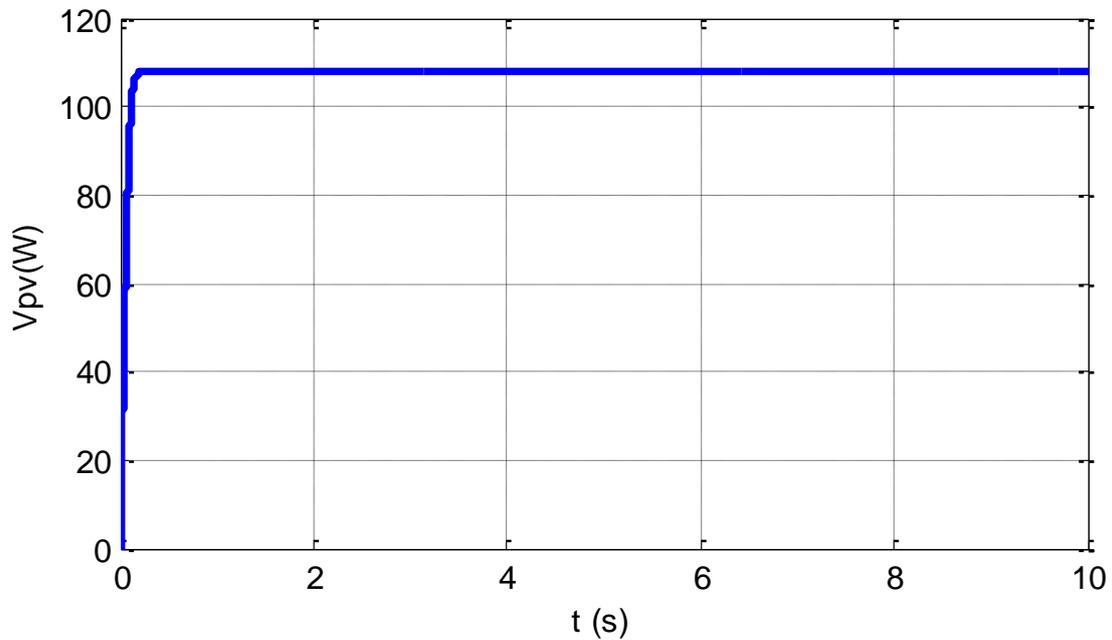
Cette étape sert à convertir la conclusion résultante du le mécanisme d'inférence en une variable physique applicable sur le système à commander.

On a utilisé la défuzzification par centre de gravité qui est la méthode la plus utilisée. Son principe est l'extraction barycentrique de la commande, qui consiste à faire la moyenne des valeurs du référentiel pondérées par leurs degrés d'appartenance

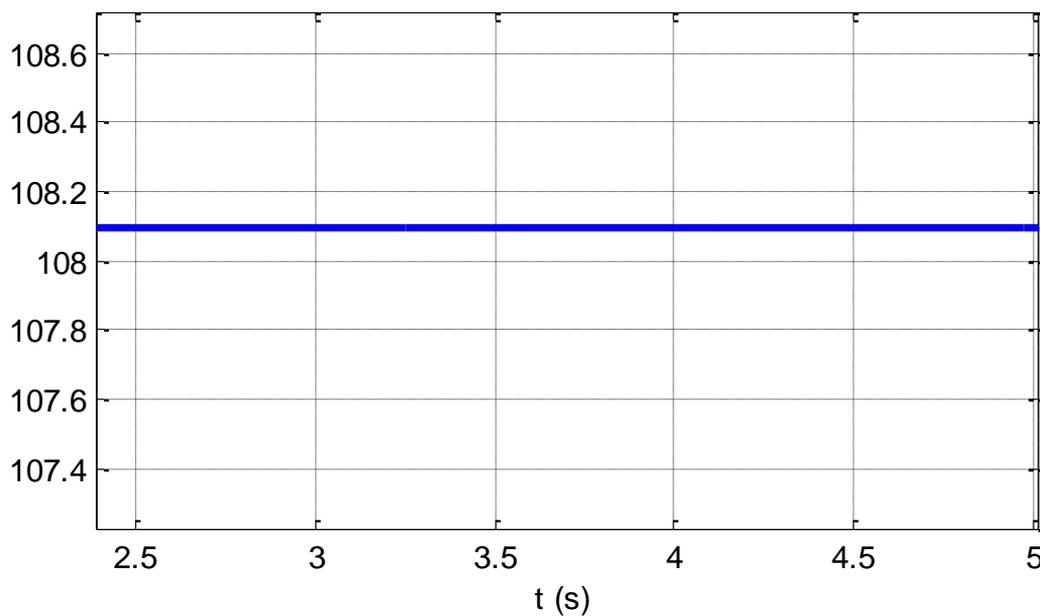
La défuzzification par centre de gravité donnée par la relation suivante :

$$\Delta V_{pv,ref} = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(V_{PV}(k)) \cdot V_{PV}(k)}{\sum_{j=1}^n \mu(V_{PV}(k))} \quad (III.4)$$

Les figures (III.20, 21,22) montre les résultats de simulation de l'algorithme de la logique floue pour un panneau de type Siemens SM110-24, dans les conditions STC ( $E_s=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ )



**Figure III.20 :** L'allure de la puissance photovoltaïque par la commande FLC



**Figure III.21 :** Zoom de L'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent par la commande FLC

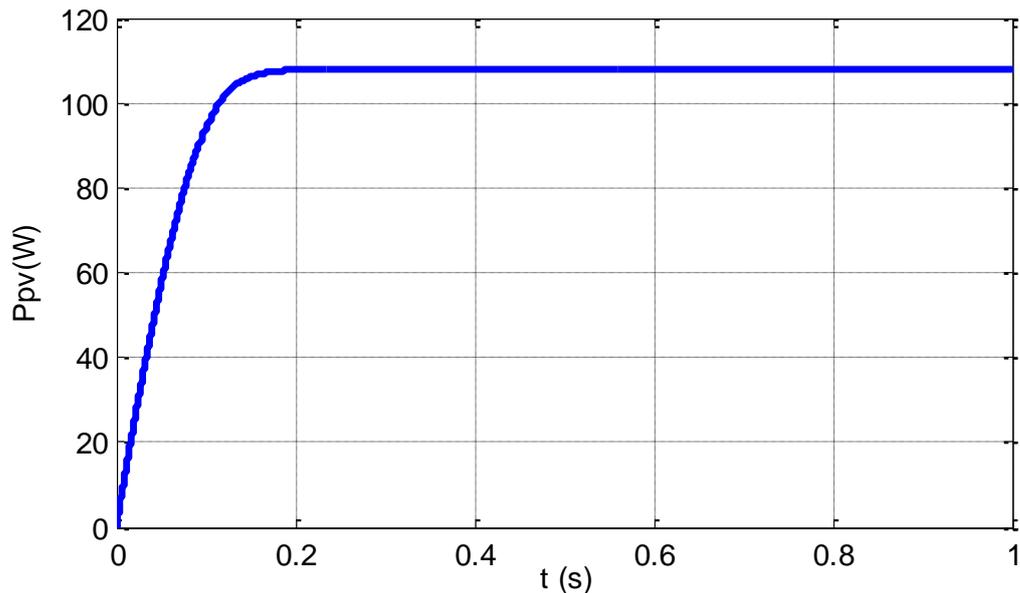


Figure III.22 : Zoom sur le temps de réponse par la commande FLC

### III.6 Etude comparative entre MPPT P&O et MPPT flou

Pour faire une étude des comparatives des deux algorithmes et voir la différence entre eux, on a effectué un test où les deux contrôleurs subissent les mêmes conditions standards de fonctionnement c'est-à-dire un ensoleillement constant égal à  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température égale à  $25^\circ\text{C}$  (figure III.23 et figure III.24).

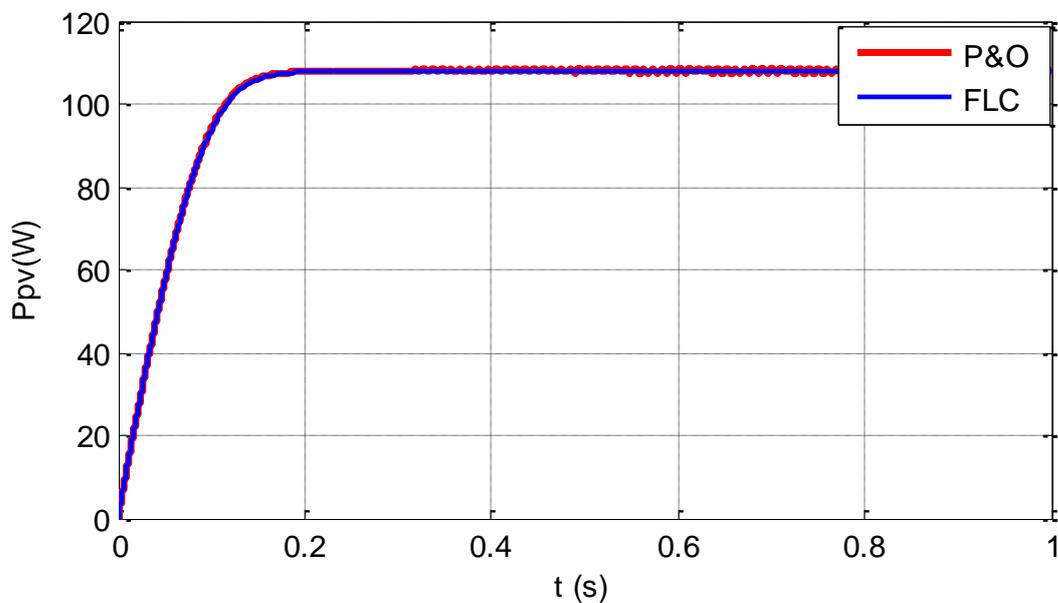
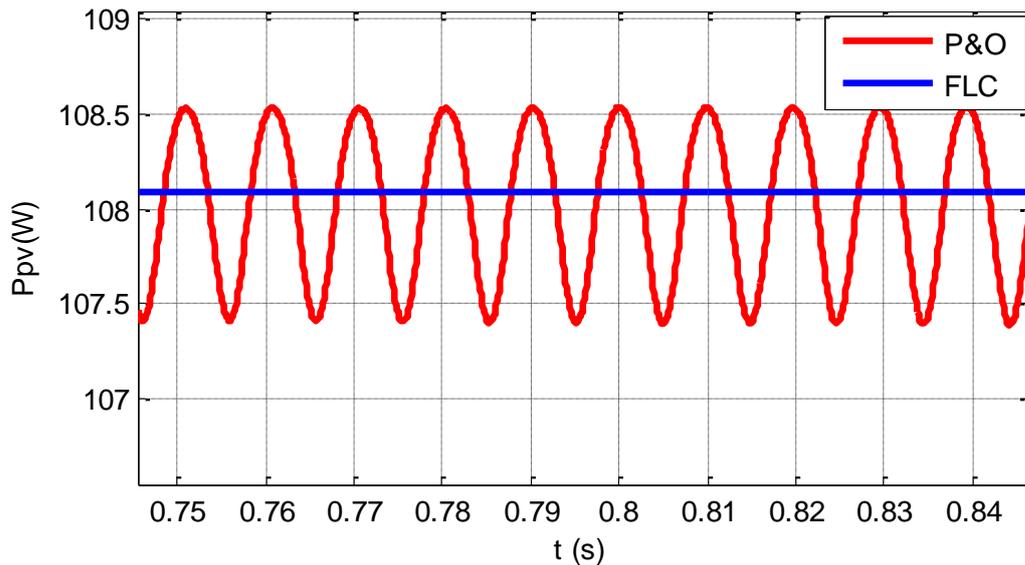


Figure III.23 : Allure de la puissance photovoltaïque (commande P&O et FLC)



**Figure III.24 :** Zoom de L'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent (commande P&O et FLC)

Les figures (III.23, 24) présentent la puissance du générateur photovoltaïque ( $P_{pv}$ ) pour les deux méthodes de control MPPT (perturbation et observation (P&O) et le contrôleur par logique floue (FLC). On peut voir que la méthode (P&O) présente des oscillations autour du point de puissance maximale en régime permanent ce qui induit des pertes importante de puissance, par contre Le contrôleur floue permet de réduire les fluctuations de puissance en régime permanent.

#### III.7 Commande MPPT PI-floue

Il est possible d'améliorer les performances des résultats par la régulation de la tension avec le régulateur PI (proportionnelle intégrales).

La figures (III.25, 26,27) montre les résultats de simulation de la commande PI floue pour Un panneau de type Siemens SM110-24, dans les conditions STC ( $E_s=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C$ )

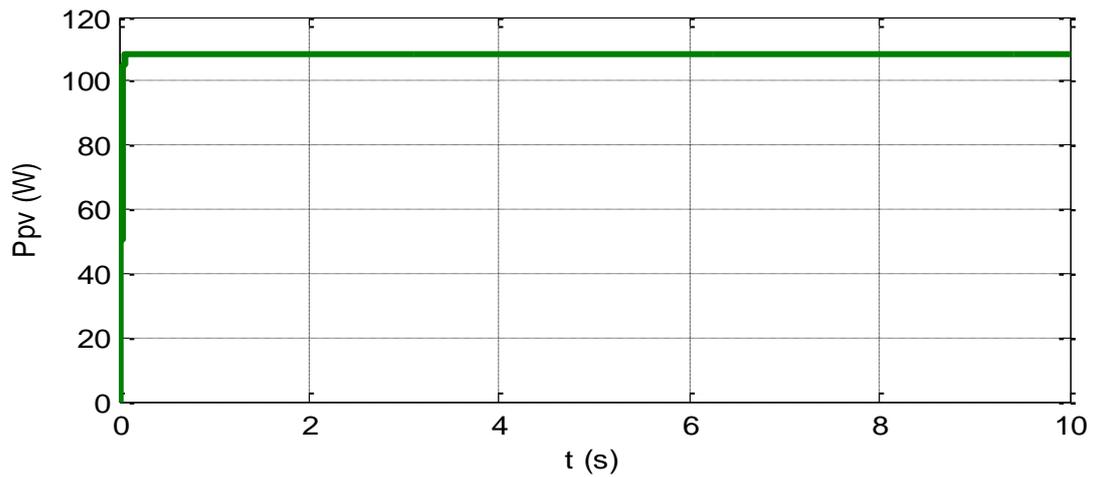


Figure III.25 : L'allure de la puissance photovoltaïque par la commande PI-FLC

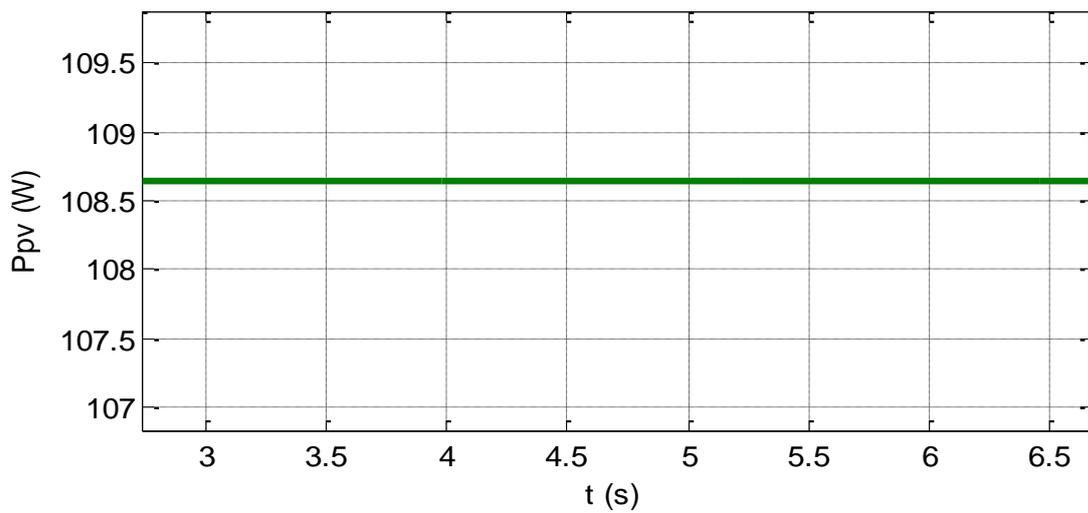


Figure III.26 : Zoom de L'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent par la commande PI-FLC

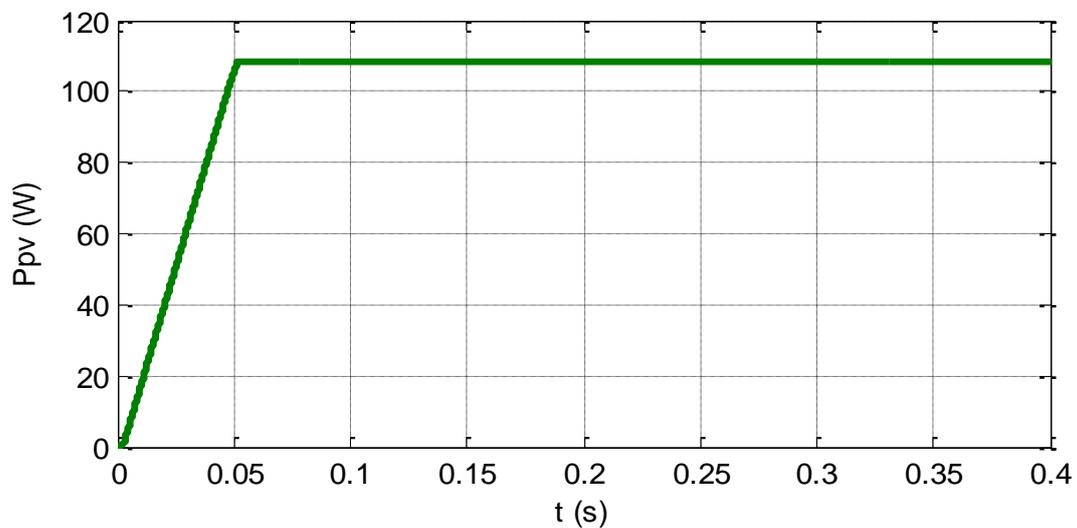


Figure III.27 : Zoom sur le temps de réponse par la commande PI-FLC

### III.8 Etude comparative entre la commande MPPT floue et la commande

#### MPPT PI -floue

Pour valider le meilleur contrôleur MPPT on va effectuer un test où les deux contrôleurs subissent aux mêmes conditions standards de fonctionnement ( $E=1000W/m^2$ ,  $T=25^{\circ}C$ ).

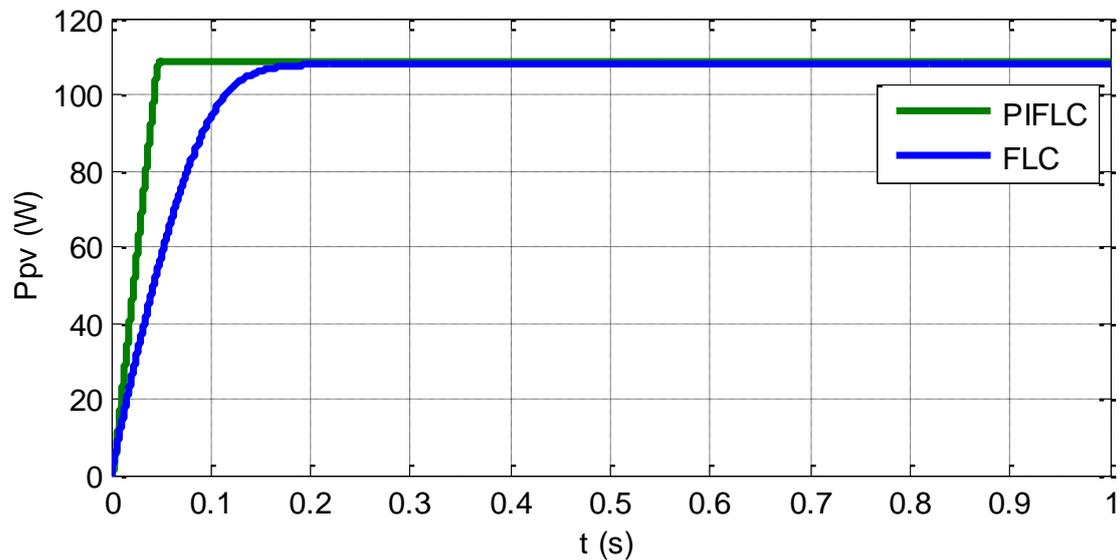


Figure III.28 : Allure de la puissance photovoltaïque par la commande FLC et PI-FLC

Le tableau III.3, montre une synthèse sur les performances des techniques étudiées sous les conditions STC :

Tableau III.3 : Comparaison des performances des algorithmes étudiés

Performances	Temps de réponse	$P_{PPM}$ (W)	Rendement $\eta$ (%)
<b>Méthodes</b>			
FLC	0.22	108.09	98.26
PI-FLC	0.042	108.67	98.78

Le rendement est défini par l'équation suivant :

$$\eta (\%) = \frac{P_{PPM}}{P_{MAX}} \cdot 100 \quad (III.5)$$



**Figure III.29** : Temps de réponse et le rendement des algorithmes étudiés

D'après les figures III.28 et III.29 et le tableaux III.3 On peut voir que le contrôleur PI floue (PI-FLC) présente une réponse plus rapide, il atteint sa valeur optimale à 0.042s comparé aux contrôleur flou (FLC) qui nécessite plus de temps pour extraire le point de puissance maximale (0.22s) en remarque aussi que le rendement de contrôleur PI floue est meilleure que le contrôleur floue .

D'après les constatations on voit que la MPPT PI- FLC présente des performances meilleures que celle de MPPT FLC.

### III.9 Test de robustesses

Pour faire une étude de robustesse des deux contrôleurs vis-à-vis des différentes conditions environnementales, on varie l'ensoleillement dans les deux sens de variation : soit une augmentation ou bien une diminution avec le maintien de températures a 25°C.

Ce cas nous montre le comportement du contrôleur MPPT floue et le contrôleur MPPT PI floue, pour une température fixe de 25°C et une diminution brusque de l'ensoleillement de 1000 à 500 W/m<sup>2</sup> puis une augmentation de 500 à 700 W/m<sup>2</sup>.

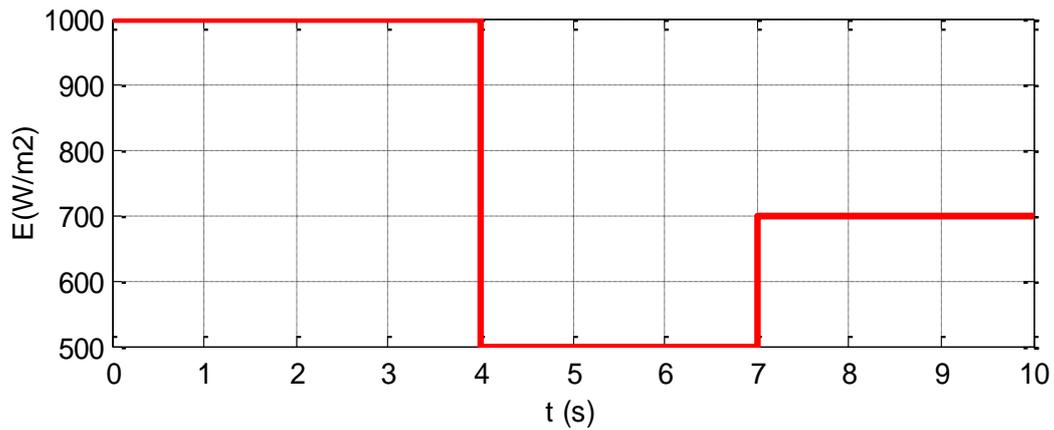


Figure III.30 : la variation brusque d'ensoleillement.

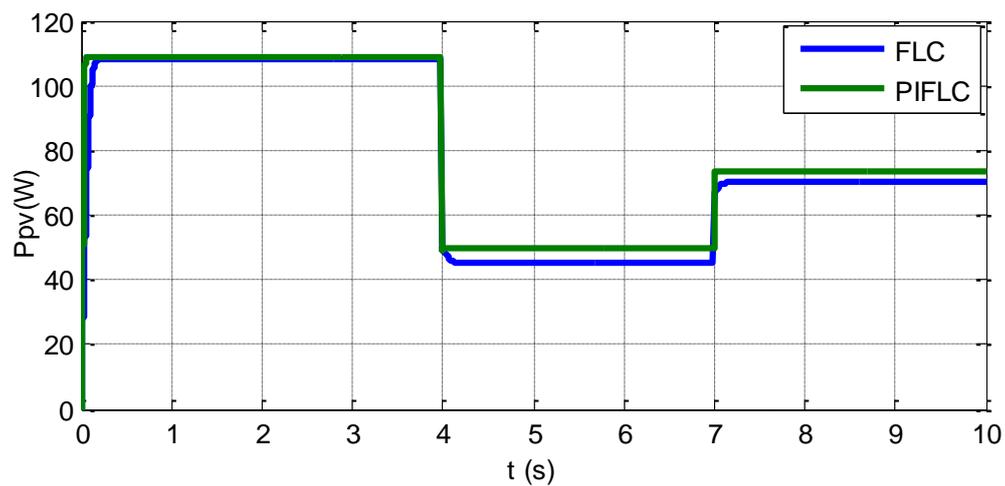


Figure III.31 : Allure de la puissance photovoltaïque pour un ensoleillement variable.

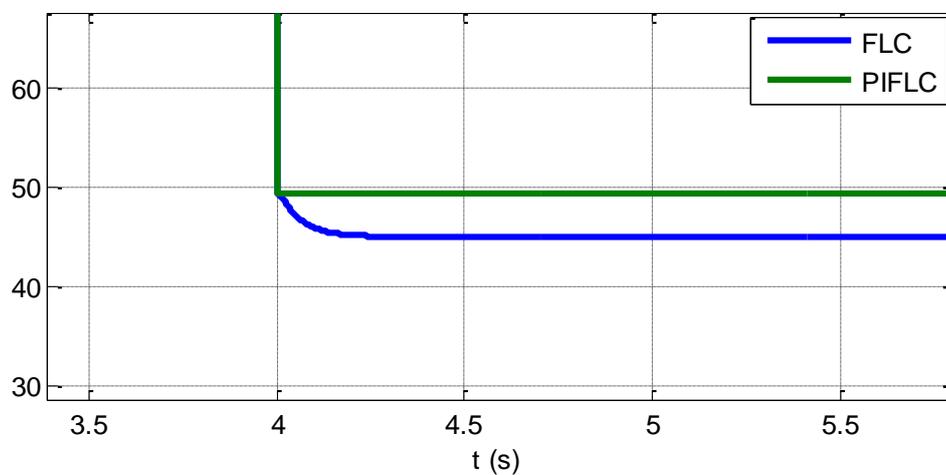


Figure III.32 : Zoom sur la puissance photovoltaïque Lors d'une diminution d'ensoleillement

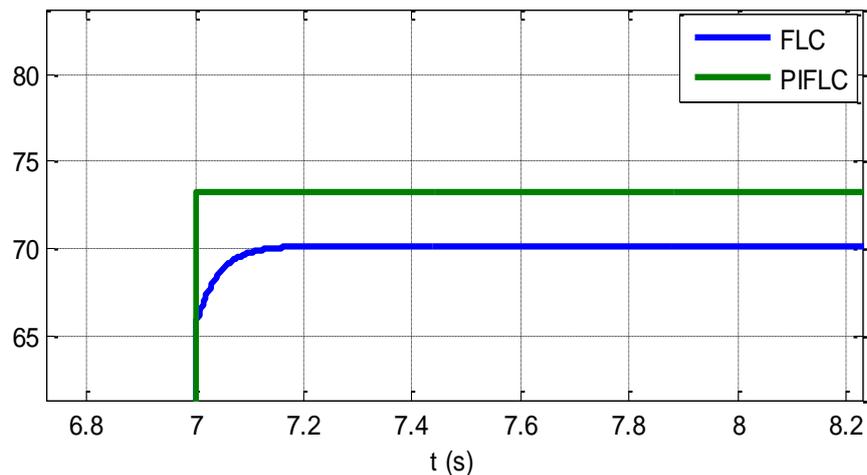


Figure III.33 : Zoom sur la puissance photovoltaïque Lors d'une augmentation d'ensoleillement

Le tableau III.4, montre : Comparaison des performances de la commande FLC et la commande PI-FLC.

Tableau III.4 : Comparaison des performances des algorithmes étudiés pendant des conditions variables

T(s)	Temps de réponse			P <sub>PPM</sub> (W)		
	0-4	4-7	7-10	0-4	4-7	7-10
FLC	0.22	0.3	0.27	108.09	45	70.15
PI-FLC	0.042	0.004	0.004	108.67	49.46	73.18

D'après le test de robustesse, On constate, que dans le cas d'un changement d'ensoleillement les deux commandes suivent la consigne.

En remarque aussi que la commande floue mettent plus de temps pour se stabiliser sur un nouveau PPM, alors que la commande PI floue se stabilisé très rapidement

Cette étude comparative des deux commandes proposées a montré que le contrôleur basé sur la commande par PI floue optimise mieux la puissance de fonctionnement du système.

### **III.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT.

Nous avons détaillé les méthodes MPPT perturbation et observation et logique floue et en a fait une étude comparative entre les deux

nous avons rappelé quelques notions relatives à la logique floue nécessaires pour comprendre le principe de fonctionnement d'un régulateur flou.

A fin, en a amélioré les performances de commande la MPPT floue avec l'emploi d'un régulateur PI et en a obtenu des très bon résultats au terme de temps de réponse et rendement

La robustesse du contrôleur PI-flou vis-à-vis de variation de l'ensoleillement est meilleure que celle d'un simple contrôleur flou.

### *Conclusion générale*

Notre travail c'est porté sur l'optimisation d'un système photovoltaïque par logique. Plusieurs méthodes MPPT existantes dans la littérature sont utilisées pour optimiser l'énergie d'un panneau solaire sous l'effet de la variation paramètres météorologique, l'avantage de notre méthode, réside dans sa capacité de suivre le MPP sous les changements rapides de l'ensoleillement et de la température.

Dans le premier chapitre, on a abordé quelques généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques, le principe de fonctionnement de la cellule PV et ces différents technologies ensuite on a parlé sur la constitution du générateur PV.

Le second chapitre a été consacré à la modélisation et simulation des différents composants du système photovoltaïque, On a présenté le modèle du générateur photovoltaïque à une diode. Ensuite la simulation sous Matlab/Simulink de panneau photovoltaïque de type siemens 110 nous a permis d'étudier l'effet du changement des conditions climatiques (ensoleillement et température) sur les caractéristiques électriques (I (V) et P (V)) du panneau. Par ailleurs, en a fait une modalisation du convertisseur DC/DC de types survolteur.

Dans le troisième chapitre nous nous sommes intéressés au problème de poursuite du point de puissance maximale. Pour ce faire, nous avons présenté et comparé entre deux méthodes MPPT qui sont la méthode P&O et la commande par logique floue. Les résultats montrent que les deux méthodes sous les conditions atmosphériques standards atteignent le point MPP. Cependant, nous avons constaté que la méthode P&O présente des oscillations autour du MPP tandis que la commande floue donne la meilleure réponse en termes de stabilité .pour améliorer les performances de commande la MPPT floue en a employé un régulateur PI. Et en a obtenu des très bons résultats au terme de temps de réponse et rendement.

L'étude bibliographique sur le générateur photovoltaïque nous a permis de bien comprendre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Donc pour exploiter les générateurs photovoltaïques au maximum une commande MPPT doit être utilisée pour permettre le fonctionnement au PPM. Deux méthodes ont été présentées (p&o, et flc). L'étude comparative montre que l'algorithme de la logique floue

## *Conclusion générale*

---

présente des résultats meilleurs et des performances de point de vue recherche du PPM et aussi moins de pertes de puissance.

### **Bibliographie**

- [1] Ministère de l'énergie et des mines, « Guide des énergies renouvelables », édition (2007)
- [2] C.Serir, « Commande D'un Système Multi-Sources Photovoltaïque/Eolien Associé à un système de stockage », thèse de doctorat, l'université A. Mira Bejaia, 2017 ;
- [3] F. Benadal, “ Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV ”, Mémoire de master, université MohamedBoudiaf - m'sila, 2016.
- [4] H.Revees, mal de terre ; science ouverte ; éditions de seuil, mars 2003.
- [5] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [6] F.Slama, “ Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique”, Mémoire de magister, universite ferhat abas - setif- ,2011
- [7] A. CID PASTOR, «Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques», Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 2006.
- [8] K.Rehrah, ‘Dimensionnement et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable’ thèse doctorat, l'université A. Mira Bejaia,
- [9]<http://www.algerie-eco.com/2020/05/20/energie-solaire-lalgerie-prevoit-de-lancer-un-projet-de-4000-mw-a-36-mds-de-dollars/>
- [10] H. Reeves ; Mal de Terre, Science ouverte, Editions de Seuil, mars 2003..
- [11] T. Fromherz, F. Padinger, D. Gebeyehu, C. Brabec, J. C. Hummelen, Sariciftci, « Comparison of photovoltaic devices containing various blends of polymer and fullerenederivatives », Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 63, Iss. 1, pp. 61-68, 2000..
- [12] L. Debou, D. Maghribi, « Commande d'un système hybride (photovoltaïque éolienne) de production d'énergie », Mémoire de Master, Université de Bejaïa 2009.
- [13] B. WAFA, S. SAMAH, "Etude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque " Mémoire Ingénieur, Université de Biskra, 2006
- [14] M. SAAD SAOUD, “ Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole ”, Thèse de doctorat, Département d'Electronique, universite- annaba, 2017
- [15] S. PETIBON, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", thèse doctorat, université de Toulouse, 2009,
- [16] A. BOUSSEKINE, N.GUERMOUCHE « Contribution à l'étude des systèmes de

## ***Bibliographie***

---

Pompage photovoltaïque »Mémoire d'ingénieur électromécanique ; Université de Bejaïa, (2010)

[17] Y.Yahiaoui, "Commande MPPT à base la logique floue et les algorithmes génétiques", mémoire master université de Bejaia 2013

[18] S.Bensmail, «Optimisation Et Gestion D'un Système Hybride A Energies Renouvelables», Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie, 2017.

[19] A. C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques," Institut National de Science Appliquée de Toulouse Thèse de doctorat

[20] C.Serir, "Techniques d'optimisation et de contrôle de puissance", cours, université de Bejaia

[21] L.Djella, Y.Dib, “ Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées à un système photovoltaïque ”, Mémoire de master Département de Génie Electrique et Electronique, Université Abou-BekrBelkaid de Tlemcen, 2017

[22] : A.T. Singo, "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome", thèse de doctorat en Génie Electrique de l'université de Nancy I 2010, France.

[23] C. Cabal, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", thèse de doctorat en Génie Electrique de l'université de Toulouse 2008, France.

[24] C.Serir,"Vector control of a motorpump system powers by a photovoltaic generator optimized by fuzzylogic control",Revue Roumaine des sciences techniques-serie electrotechnique et energetique, vol 62, 4, pp. 375-380,2017.

[25] C. Bernard, C. S. Oliveira, B. Laval, C. Vaudouer, « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue ", Rapport rédigé dans le cadre de l'UV BA04 - Energie renouvelables 2009.

[26] L.Boudrahem, L.Djouadi, "Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque", mémoire master université de Bejaia 2012.