

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



Université Abderrahmane Mira-Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

# Mémoire de fin d'études

En vue l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Energies renouvelables

## *Thème*

### *Etude Comparative des Méthodes de Maximisation de Puissance dans un Système Photovoltaïque*

***Réalisé par :***

Mr. BENAKLI Faïçal  
Mr. BEKTACHE Hakim

***Encadré par :***

Mr. Dj. AOUZELLAG  
Mr. A. REMLI

*Promotion Juin2015*

# **Remerciements**

*Tout d'abord, nous remercions dieu de tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes les années d'études, et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Nous tenons à représenter nos vifs remerciements à notre promoteur M<sub>r</sub> Dj. AOUZELLAG d'avoir accepté de nous encadré, pour sa gentillesse et ses encouragements.*

*Nous remercierons profondément M<sub>r</sub> A. REMLI pour son aide, ses conseils et pour le temps qu'il nous a consacré.*

*Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Nous remercions également tous les enseignants du département Génie Electrique qui nous ont donné de leurs savoir et nous ont soutenu tout au long de notre cursus.*

*A toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à  
Mes très chers parents symbole de tendresse  
profonde et permanente, de sacrifice et d'amour  
éternel, que dieu les protège pour moi leur accordent  
une bonne santé et une longue vie.*

*Ma chère petite sœur Sarah;  
A mes chers grands pères et à toute ma famille ;  
A Hakim et à toute sa famille ;  
Et à tous Mes amis (es) : Snich, Laboule, James,  
Sofiane.....*

*A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser de près ou de  
loin ce travail.*

*Faiçal*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Mes chers parents qui m'ont beaucoup aidé et qui se sont sacrifiés pour mon bien et qui m'ont encouragé et soutenu le long de ma vie et durant mon cursus;*

*A ma cher sœur, mes frères;*

*A toute ma famille ;*

*A Faïçal ainsi que toute sa famille ;*

*A tout mes amis sans exception ;*

*A toute la communauté universitaire ;*

*Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

**Hakim**

# *Sommaire*

# Sommaire

Liste des figures .....	VII
Liste des tableaux .....	X
Liste des abréviations .....	XII
<b>Introduction générale</b> .....	1

## ***Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque.***

I.1. Introduction .....	2
I.2. Energie solaire .....	2
I.3. Rayonnement solaire.....	2
I.4. Différents types de rayonnement .....	2
I.4.1. Rayonnement direct .....	3
I.4.2. Rayonnement diffus .....	3
I.4.3. Albédo .....	3
I.4.4. Rayonnement global .....	3
I.5. Energie photovoltaïque .....	3
I.5.1. Cellules photovoltaïque .....	3
I.5.1.1. Définition d'une cellule .....	3
I.5.1.2. Semi-conducteurs .....	4
I.5.1.3. Jonction P-N .....	4
I.5.1.4. Principe de fonctionnement .....	4
I.5.2. Types de cellules photovoltaïques .....	6
I.5.2.1. Cellules monocristallines .....	7
I.5.2.2. Cellules poly cristallines .....	8
I.5.2.3. Couche mince (Amorphe) .....	9
I.6. Module et système photovoltaïque .....	11
I.6.1. Définition .....	11
I.6.2. Association en série .....	12
I.6.3. Association en parallèle .....	12
I.7. Situation des énergies renouvelables dans le monde .....	13
I.8. Situation du photovoltaïque en Algérie .....	14
I.8.1. Projets réalisés .....	15
I.8.2. Perspectives énergétiques .....	16
I.9. Conclusion .....	17

# Sommaire

## *Chapitre II : Maximisation de puissance dans un système photovoltaïque (MPPT)*

II.1. Introduction .....	18
II.2. Caractéristique d'un module photovoltaïque .....	18
II.2.1. Définition .....	18
II.2.2. Caractéristique Courant-Tension .....	18
II.2.3. Caractéristique puissance -tension.....	19
II.3. Techniques MPPT .....	20
II.3.1. Historique .....	20
II.3.2. Classification des méthodes de maximisation de puissance.....	21
II.3.2.1. Méthodes indirectes .....	21
II.3.2.2. Méthodes directes .....	21
II.4. Etat de l'art des principales méthodes utilisées .....	22
II.4.1. MPPT basée sur la tension à circuit ouvert .....	22
II.4.2. MPPT basée sur le courant de court-circuit.....	22
II.4.3. Méthode Perturbation et observation.....	23
II.4.4. Méthode d'incrémentation de conductance .....	26
II.4.5. Méthodes basées sur les techniques d'intelligence artificielle .....	28
II.4.5. Logique floue.....	28
II.4.5.1. Ensembles flous .....	29
II.4.5.2. Fuzzification et fonctions d'appartenances .....	31
II.4.5.3. Défuzzification .....	33
II.4.5.4. Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue.....	34
II.5. Conclusion .....	35

## *Chapitre III : Modélisation et optimisation de puissance d'un module PV*

III.1. Introduction .....	36
III.2. Modélisation du panneau photovoltaïque .....	37
III.2.1. Modèle d'une cellule solaire idéale.....	37
III.2.2. Modèle d'une cellule solaire .....	37
III.2.2.1. Modèle à une diode .....	38
III.2.2.1.1. Modélisation du panneau photovoltaïque étudié.....	38
III.2.2.1.2. Caractéristique du module choisi .....	39

# Sommaire

III.2.2.1.3. Résultats de simulation .....	39
III.2.2.1.4. Influence de l'éclairement.....	41
III.2.2.1.5. Influence de la température.....	42
III.2.2.1.6. Influence simultanée de l'éclairement et de la température .....	43
III.2.2.1.7. Puissance du module photovoltaïque sans MPPT .....	44
III. 3. Optimisation de la puissance par les méthodes MPPT .....	45
III.3.1. Optimisation de la puissance par la méthode perturbation et observation .....	46
III.3.2. Optimisation de la puissance par la méthode incrémentation de conductance .....	49
III.3.3. Comparaison entre les deux modes de fonctionnement .....	51
III.4. Conclusion.....	52

## ***Chapitre IV : Optimisation de puissance par logique floue en fonctionnement autonome***

IV.1. Introduction .....	53
IV.2. Configuration du système étudié.....	53
IV.3. Caractéristiques du générateur photovoltaïque .....	54
IV.4. Modélisations du hacheur .....	55
IV.5. Batterie .....	56
IV.6. Charge .....	56
IV.7. Simulation du système étudié par la par logique floue.....	57
IV.7.1. Fuzzification .....	57
IV.7.2. Inférence.....	58
IV.7.3. Déffuzification .....	58
IV.8. Résultats de simulation .....	59
IV.9. Comparaison entre les trois méthodes .....	67
IV.10. Conclusion .....	69

<b><i>Conclusion générale</i></b> .....	70
---	----

## ***Références bibliographiques***

## ***Annexes***



# *Liste des figures*

## Liste des figures

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

<b>Figure I-1 :</b> Composants du rayonnement solaire .....	3
<b>Figure I-2 :</b> Dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si) .....	4
<b>Figure I-3 :</b> Atome de Silicium .....	4
<b>Figure I-4 :</b> Diagramme énergétique .....	5
<b>Figure I-5 :</b> Dopage de type N .....	5
<b>Figure I-6 :</b> Dopage de type P .....	6
<b>Figure I-7:</b> Représentation schématique d'une cellule solaire .....	6
<b>Figure I-8 :</b> Différentes technologies des cellules photovoltaïques .....	7
<b>Figure I-9 :</b> Etapes de fabrication d'une cellule photovoltaïque .....	8
<b>Figure I-10:</b> Cellules photovoltaïques au silicium cristallin .....	9
<b>Figure I-11:</b> Module photovoltaïque .....	11
<b>Figure I-12 :</b> Boite de jonction .....	11
<b>Figure I-13 :</b> Cellules ou modules photovoltaïques en série .....	12
<b>Figure I-14 :</b> Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle .....	12
<b>Figure I-15 :</b> Structure de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde (Année 2011).....	13
<b>Figure I-16:</b> Production d'électricité dans le monde (Année 2011) .....	14
<b>Figure I-17:</b> Taux de pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale ..	16

### Chapitre II : Maximisation de puissance dans un système photovoltaïque (MPPT)

<b>Figure II-1:</b> Caractéristique $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque.....	19
<b>Figure II-2:</b> Courbe $P=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque .....	20
<b>Figure II-3:</b> Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ d'un panneau photovoltaïque .....	23
<b>Figure II-4:</b> Algorithme type de la méthode P&O.....	25
<b>Figure II-5:</b> Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation .....	26
<b>Figure II-6:</b> Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance ....	28
<b>Figure II-7:</b> Schéma de principe de la régulation floue .....	29
<b>Figure II-8:</b> Ensembles classiques et ensembles flous .....	30

## *Liste des figures*

<b>Figure II-9:</b> Opérations sur les ensembles flous .....	30
<b>Figure II-10:</b> Différence entre la logique classique et la logique floue .....	31
<b>Figure II-11:</b> Fuzzification et degré d'appartenance .....	32

### *Chapitre III : Modélisation et optimisation de puissance d'un module PV*

<b>Figure III-1:</b> Caractéristiques type d'un générateur photovoltaïque .....	36
<b>Figure III-2 :</b> Schéma bloc de générateur photovoltaïque .....	36
<b>Figure III-3 :</b> Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque .....	37
<b>Figure III-4 :</b> Schéma électrique équivalent du modèle à une diode .....	38
<b>Figure III-5 :</b> Bloc de simulation du model de la cellule a une diode .....	40
<b>Figure III-6 :</b> Caractéristique I(V) dans les conditions STC .....	40
<b>Figure III-7 :</b> Caractéristique P(V) dans les conditions STC .....	41
<b>Figure III-8 :</b> Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I(V) .....	41
<b>Figure III-9 :</b> Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique P(V) .....	42
<b>Figure III-10 :</b> Influence de la température sur la caractéristique I(V) .....	42
<b>Figure III-11 :</b> Influence de la température sur la caractéristique P(V) .....	43
<b>Figure III-12:</b> Influence simultané de l'éclairement et la température sur la caractéristique électrique sur la caractéristique électrique I(V) .....	43
<b>Figure II-13 :</b> Influence simultané de l'éclairement et la température sur la caractéristique électrique P(V) .....	44
<b>Figure III-14 :</b> Courbe de puissance SMPPT pour une variation journalière d'ensoleillement .....	45
<b>Figure III-15:</b> Bloc de simulation des méthodes MPPT .....	46
<b>Figure III-16:</b> Allure de $E_s(t)$ réalisé par la méthode P&O .....	46
<b>Figure III-17:</b> Allure de $P(t)$ réalisé par la méthode P&O .....	47
<b>Figure III-18:</b> Allure de $I(t)$ réalisé par la méthode P&O .....	47
<b>Figure III-19:</b> Allure de $V(t)$ réalisé par la méthode P&O .....	48
<b>Figure III-20:</b> Allure de $P(V)$ réalisé par la méthode P&O .....	48
<b>Figure III-21:</b> Allure de la caractéristique $V(t)$ réalisé par la méthode Inc-Con .....	49
<b>Figure III-22:</b> Allure de la caractéristique $I(t)$ réalisé par la méthode Inc-Con .....	49
<b>Figure III-23:</b> Allure de la caractéristique $P(t)$ réalisé par la méthode Inc-Con .....	50

## Liste des figures

<b>Figure III-24:</b> Allure de la caractéristique P(V) réalisé par la méthode Inc-Con.....	50
<i>Chapitre IV : Optimisation de puissance dans un système PV en fonctionnement autonome</i>	
<b>Figure IV-1</b> Schéma synoptique du système étudié .....	53
<b>Figure IV-2 :</b> Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I(V) .....	54
<b>Figure IV-3 :</b> Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique P(V) .....	54
<b>Figure IV-4 :</b> Schéma électrique équivalent d'un hacheur parallèle (boost) .....	55
<b>Figure IV-5:</b> Fonctions d'appartenances de <b>(a)</b> L'entrée ER ; <b>(b)</b> L'entrée CER et <b>(c)</b> La sortie $d\alpha$ .....	58
<b>Figure IV-6 :</b> Schéma bloc sous Matlab/simulink du Système globale .....	59
<b>Figure IV-7:</b> Profils typique d'ensoleillement au fil du temps .....	60
<b>Figure IV-8:</b> Courbe de la puissance P(V) avec la méthode FLC pour un profil typique d'ensoleillement .....	60
<b>Figure IV-9:</b> Courbe V(t) de générateur GPV .....	61
<b>Figure IV-10:</b> Courbe P(t) de générateur GPV .....	61
<b>Figure IV-11:</b> Courbe I(t) de générateur GPV .....	62
<b>Figure IV-12:</b> Courbe $\alpha$ (t) a la sortie de MPPT .....	62
<b>Figure IV-13:</b> Signal commande DC/DC (gachette-d'hacheur) .....	63
<b>Figure IV-14:</b> Courbe P(V) aux bornes de la charge .....	63
<b>Figure IV-15:</b> Courbe V(t) au borne de la charge .....	64
<b>Figure IV-16:</b> Courbe V(t) de la batterie .....	64
<b>Figure IV-17:</b> Etat de décharge de la batterie .....	65
<b>Figure IV-18:</b> Simulation sous Matlab/simulink des puissances du système global .....	65
<b>Figure IV-19:</b> Courbe P(V) par la méthode P&O pour un profil typique d'ensoleillement ..	67
<b>Figure IV-20:</b> Courbe P(V) par la méthode d'incrémentation de conductance pour un profil typique d'ensoleillement .....	68
<b>Figure IV-21:</b> Courbe P(V) par la méthode FLC pour un profil typique d'ensoleillement ...	68

## *Liste des figures*

# *Liste des tableaux*

## *Liste des tableaux*

### *Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque*

<b>Tableau I. 1 :</b> Comparaison entre les différentes technologies des cellules photovoltaïques .....	10
<b>Tableau I. 2:</b> Potentiel solaire en Algérie .....	14

### *Chapitre III : Modélisation et optimisation de puissance d'un module PV.*

<b>Tableau III. 1:</b> Paramètres électriques du panneau KYOCERA KC200GT 200W .....	39
---	----

### *Chapitre IV : Optimisation de puissance dans un système PV en fonctionnement autonome.*

<b>Tableau IV. 1 :</b> Table des règles floues .....	58
--	----

*Liste des symboles et  
abrégations*



## *Liste des symboles et abréviations*

E : Energie solaire ( $\text{Wh/m}^2$ ).

Voc : Tension de circuit ouvert (V).

Isc : Courant de court-circuit (A).

Vmpp : Tension au point de puissance optimale (V).

Impp : Courant au point de puissance optimale (A).

FF : Facteur de forme.

Ipv : Courant photovoltaïque (A).

Iph : Courant photonique (courant généré par l'éclairement) (A).

Id : Courant de diode (A).

I0 : Courant de saturation de la diode (A).

Ich : Courant de la charge (A).

IL : Courant dans l'inductance de hacheur (A).

Vpv : Tension photovoltaïque (V).

Vd : Tension aux bornes de diode (V).

Vg : Tension de seuil de la diode (1.12 eV).

Vch : Tension de la charge (V).

q : Charge électrique ( $1.6 \times 10^{-19}$  C).

K : Constante de Boltzmann ( $K=1.3854 \times 10^{-23}$  J/K).

A : Facteur de qualité de la diode.

Rch : Résistance de charge ( $\Omega$ ).

Rs : Résistance série de la cellule ( $\Omega$ ).

Rsh : Résistance shunt de la cellule ( $\Omega$ ).

Isat : Courant de saturation (A).

Rs : Résistance série de la cellule ( $\Omega$ ).

T : Température de la cellule en (Kelvin).

T : Période de hachage (S).

Eg :Energie de gap (pour le silicium cristallin c'est 1.12eV)

E : Ensoleillement ( $\text{W/m}^2$ ).

Estc : Ensoleillement sous les conditions STC ( $\text{W/m}^2$ ).

N-P : Jonction du matériau.

## *Liste des symboles et abréviations*

T<sub>j</sub> : Température de jonction (Kelvin).

T<sub>a</sub> : Température ambiante (Kelvin).

T<sub>jstc</sub> : Température de jonction sous les conditions STC (Kelvin).

T<sub>stc</sub> : Température standard (Kelvin).

NOCT : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule.

P<sub>pv</sub> : Puissance photovoltaïque (W).

$\alpha$ : Rapport cyclique du hacheur.

R<sub>L</sub> : Résistance interne de l'inductance de hacheur ( $\Omega$ ).

C : Capacité de hacheur (F).

L : Inductance de hacheur (H).

K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> : Constantes proportionnelles.

dE : Variation d'erreur des fonctions d'appartenance.

E : Erreur des fonctions d'appartenance.

A<sub>n</sub> , B<sub>n</sub> : Ensembles flous.

G<sub>t</sub> : Gain en temps de réponse (s).

T<sub>me</sub> : Temps de réponse correspondant à chaque méthode (s).

S<sub>CG</sub>: Abscisse de centre de gravité.

$x_i, \mu_i$  : Éléments de l'ensemble flou et leurs degrés d'appartenance respectivement.

PV : Panneau Photovoltaïque.

MPPT : Point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).

SMPPT : Commande sans MPPT.

P&O : Perturbation et Observation.

In-Con : Incrémentation de conductance.

FLC : Commande logique-floue (Floue Logique contrôleur).

I(V) : Courant en fonction de la tension.

P(V) : Puissance en fonction de la tension.

Si : Silicium.

STC : Standard Test Condition.

NOCT : Condition de température nominale de fonctionnement.

DC/DC : Convertisseur continu-continu.

# **Introduction générale**

## Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. La totalité de production mondiale d'énergie provient 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. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

La technologie photovoltaïque (PV) est une solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages :

- Elle est un moyen fiable qui requiert peu d'entretien ;
- Elle fournit de l'électricité avec l'énergie gratuite et renouvelable du soleil ;
- Elle ne nécessite aucun combustible ;
- Elle est silencieuse, non polluante et respectueuse de l'environnement ;
- Elle est polyvalente et peut être ajustée selon les besoins.

Dans ce contexte général, notre travail est focalisé sur l'étude comparative des méthodes de maximisation dans un système photovoltaïque.

Dans le premier chapitre, on a débuté par une description générale sur le photovoltaïque, l'étude des éléments du système photovoltaïque (cellule photovoltaïque). Dans une seconde étape, on a présenté la situation du photovoltaïque dans le monde et la situation du photovoltaïque en Algérie (projets réalisés, perspectives énergétiques).

Le deuxième chapitre expose d'une manière générale les méthodes des commandes MPPT (Maximum Power Point Tracking), en donnant plus de détails sur les plus utilisées.

Le troisième chapitre, porte sur la modélisation mathématique, le principe de fonctionnement et les différentes caractéristiques du générateur, ensuite on présentera la modélisation des techniques MPPT.

Le quatrième chapitre, est dédié à la simulation sous Matlab/Simulink et une comparaison entre ces méthodes de la commande MPPT étudiées.

On terminera notre travail par une conclusion générale, dans laquelle nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.

*Chapitre I :*  
*Généralités sur l'Energie*  
*Photovoltaïque*

## I.1. Introduction

La consommation mondiale en matière d'énergie est assurée essentiellement par les énergies non renouvelables. Ces énergies (essentiellement fossiles) sont épuisables, par conséquent, des stratégies énergétiques sont mises en œuvre, visant à augmenter l'efficacité des systèmes électriques, à éviter le gaspillage mais également à se tourner vers les énergies renouvelables (éolienne, solaire photovoltaïque et thermique, biomasse, géothermie, etc.).

Dans ce chapitre nous allons donner un aperçu général sur l'essentiel des connaissances requises à la compréhension des systèmes photovoltaïques, et le potentiel énergétique solaire mondial et en particulier celui de l'Algérie.

## I.2. Energie solaire

Le Soleil est l'étoile la plus proche de notre planète. Ces radiations énergétiques sont pratiquement la seule source d'énergie qui influe sur l'atmosphère et le climat sur terre. Le rayonnement solaire est un phénomène électromagnétique qui est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$  [1, 2]. L'atmosphère terrestre reçoit un rayonnement solaire d'une puissance moyenne de 1367  $\text{W}/\text{m}^2$ . Mais, l'atmosphère absorbe une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200  $\text{W}/\text{m}^2$ . Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison [3].

## I.3. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques et il est approximativement décomposé comme suit [3]:

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4 \mu\text{m}$ ) ;
- 47% dans la bande visible ( $0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$ ) ;
- 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8 \mu\text{m}$ ).

## I.4. Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes : directe, diffuse et réfléchie. La somme de toutes ces composantes donne le rayonnement global.

### I.4.1. Rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

### I.4.2. Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi de multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

### I.4.3. L'albédo

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable, etc.) [4].

### I.4.4. Rayonnement global

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure (I-1).

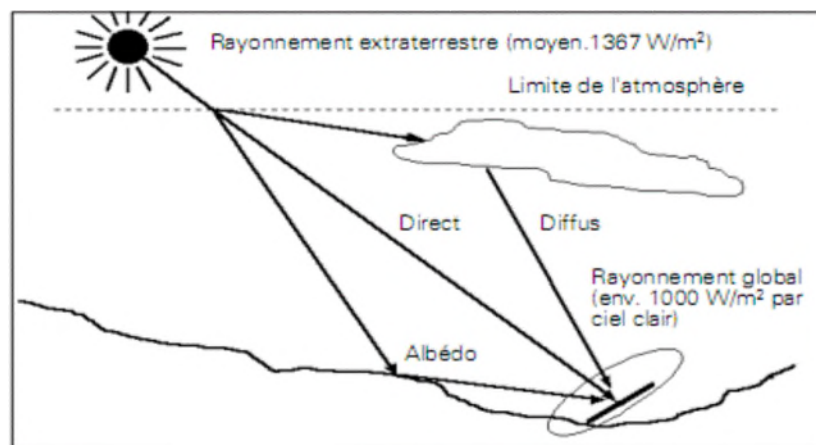


Figure (I-1) : Composants du rayonnement solaire [5]

## I.5. Energie photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » est associé à la production d'une tension à partir de la lumière, un terme plus courant pour une cellule photovoltaïque, cette dernière génère une énergie électrique renouvelable produite à partir du rayonnement solaire.

### I.5.1. Cellules photovoltaïque

#### I.5.1.1. Définition d'une cellule

La cellule photovoltaïque est composée d'éléments semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique ; donc le principe de fonctionnement fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

### I.5.1.2. Semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées [6].

### I.5.1.3. Jonction P-N

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent (c'est la zone de transition). Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner (figure (I-2)).

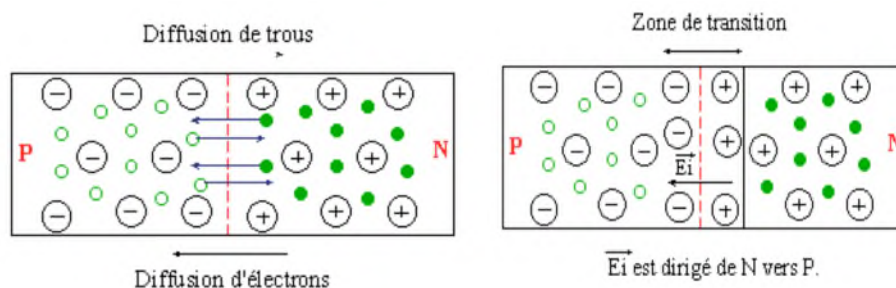


Figure (I-2): Dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si) [8]

### I.5.1.4. Principe de fonctionnement

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du Silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin (figure (I-3)). Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique.

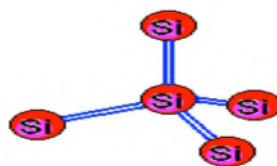


Figure (I-3) : Atome de Silicium



Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge. Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite (figure (I-4)). Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal.

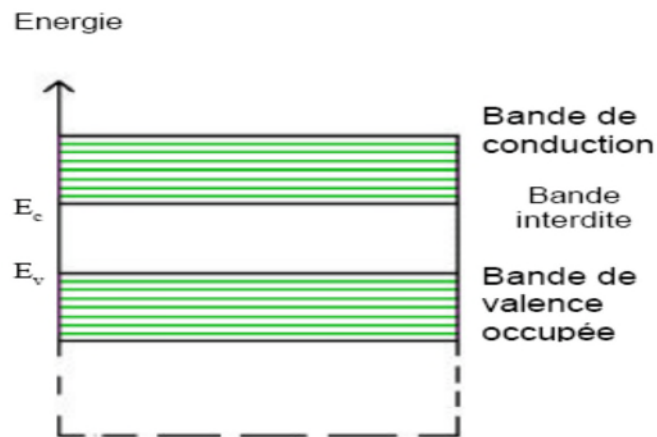


Figure (I-4) : Diagramme énergétique

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage. Le dopage peut être de type N (Figure (I-5)) ou de type P (Figure (I-6)).

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique comme illustrées sur la figure (I-7).

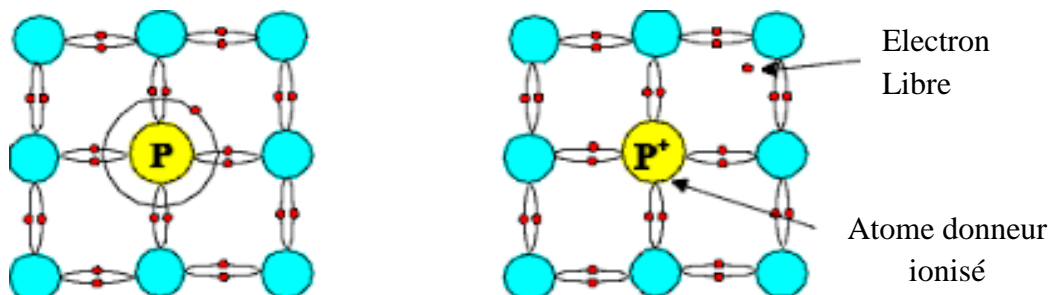


Figure (I-5) : Dopage de type N

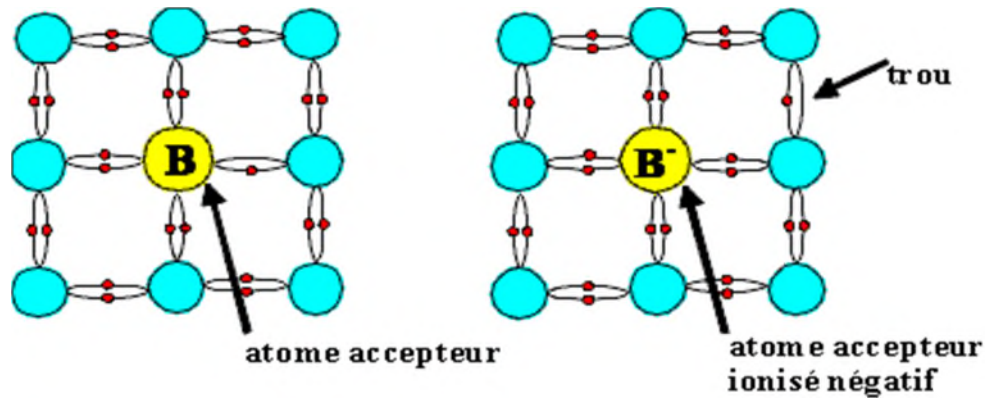


Figure (I-6) : Dopage de type P

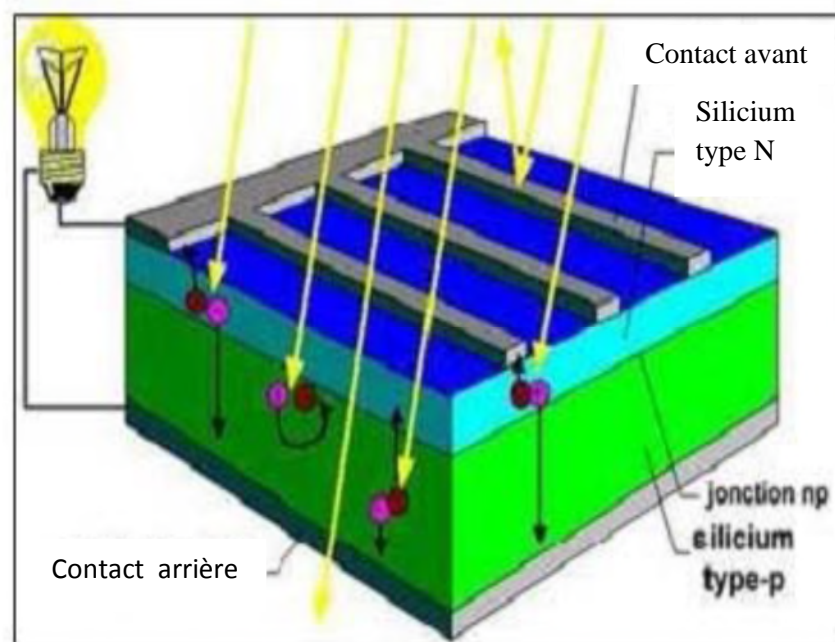


Figure (I-7): Représentation schématique d'une cellule solaire [8]

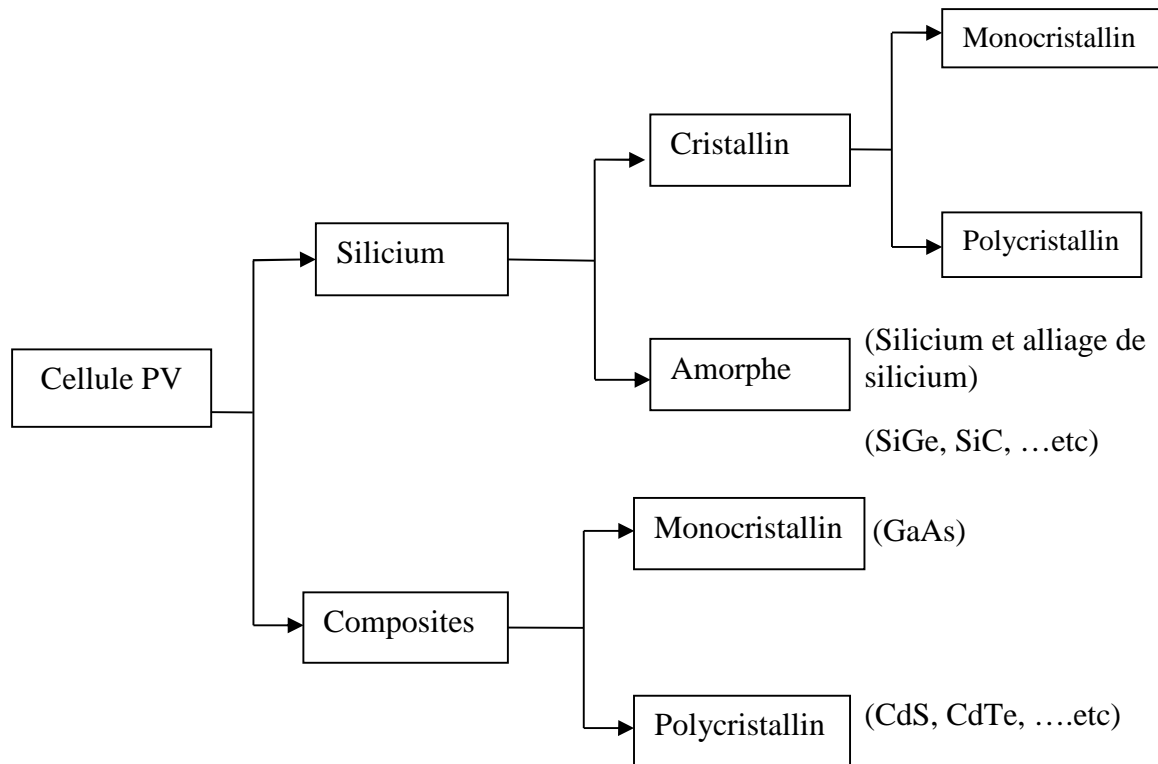
### I.5.2. Types de cellules photovoltaïques

Le matériau le plus répandu dans les photopiles ou cellules solaires est le silicium, semi-conducteur de type IV (tétravalent). On utilise également des matériaux composites tel que l'Arséniure de Gallium et des couches minces comme de CdTe (Tellure de Cadmium) et le CIS (Cuivre-Indium-Sélénium) et encore le CIGS.

Il existe plusieurs types de cellules solaires :

- Cellules monocristallines ;
- Cellules polycristallines ;
- Cellules amorphes ;
- Cellules CdTe, CIS, CIGS, CdS, GaAs, etc.

Les différentes technologies constituant les cellules photovoltaïques sont illustrées sur figure (I-8).



**Figure (I-8) :** Différentes technologies des cellules photovoltaïques [9]

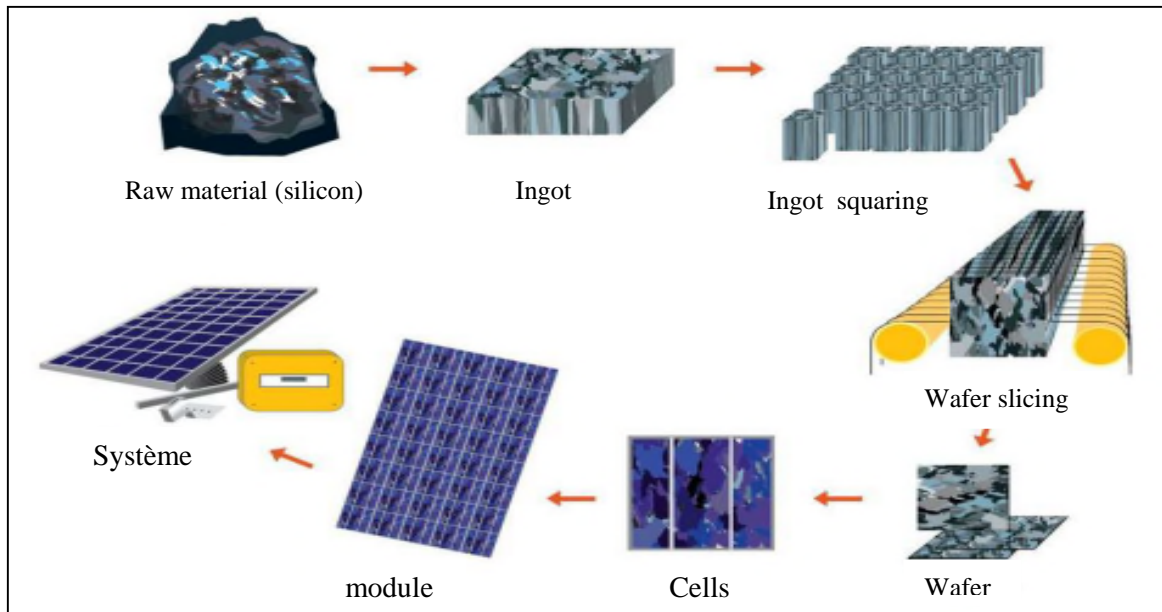
Industriellement, les matériaux les plus utilisés sont à base de Silicium à cause de sa disponibilité et son faible coût de production. Les cellules photovoltaïques au Silicium cristallin (mono ou multi) représentent la majorité de la production mondiale (respectivement 29 % et 51% de la production mondiale) [10]. On distingue les trois catégories principales de cellules photovoltaïques qui se disputent le marché. Elles ont des caractéristiques, des durées de vie, et des sensibilités différentes.

### I.5.2.1. Cellules monocristallines

Les panneaux photovoltaïques avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de Silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le Silicium poly cristallin.

Le Silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal.

Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de Silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 16 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse (figure (I-9)).



**Figure (I-9) :** Etapes de fabrication d'une cellule photovoltaïque

### I.5.2.2. Cellules poly cristallines

Les panneaux photovoltaïques avec des cellules poly cristallines illustré sur la figure (I-10) sont élaborés à partir d'un bloc de Silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 13 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines,

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure polycristalline. La durée de vie est estimée à 30 ans.

Un cristal est un solide avec des façades polygonales, plus ou moins brillant, à structure régulière et périodique, formée d'un empilement ordonné d'un grand nombre d'atomes, des molécules ou d'ions.

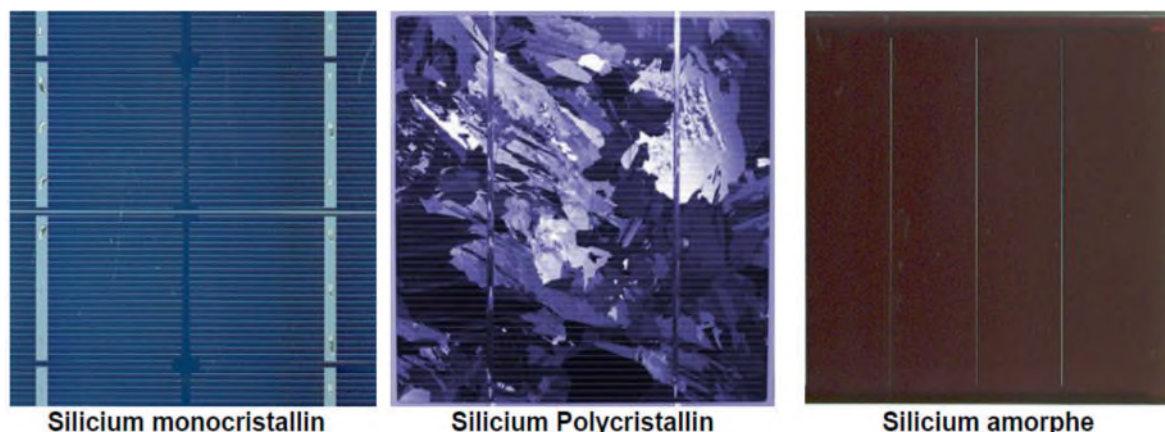
### I.5.2.3. Couche mince (Amorphe)

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 5 à 10% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction.

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies polycristallines ou monocristallines. Cependant, le Silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.

Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron [8].

La figure (I-10) représente les trois technologies de cellules photovoltaïques à base de Silicium (monocristalline, polycristalline et amorphe).



**Figure (I-10) :** Cellules photovoltaïques au silicium cristallin [7]

Le tableau (I-1) donne une comparaison entre les différentes technologies de cellules photovoltaïques en termes de rendement de longévité et d'autres caractéristiques.

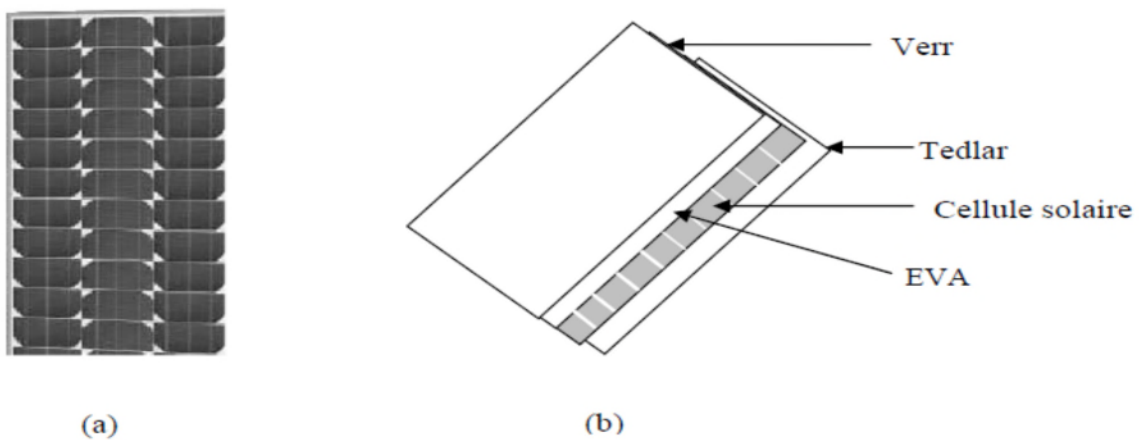
Tableau (I-1) : Comparaison entre les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
<b>Silicium monocristallin</b>	16 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production d'W *Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
<b>Silicium polycristallin</b>	13 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
<b>Amorphe</b>	5 à 10% (13% en laboratoire)	_____	* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. *Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. *Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...) ,intégration dans le bâtiment
<b>Composite monocristallin (GaAs)</b>	(27.5% en laboratoire)	_____	* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
<b>Composite polycristallin (CdS, CdTe.....)</b>	(environ 38% en laboratoire)	_____	Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...) , intégration dans le bâtiment

## I.6. Module et système photovoltaïque

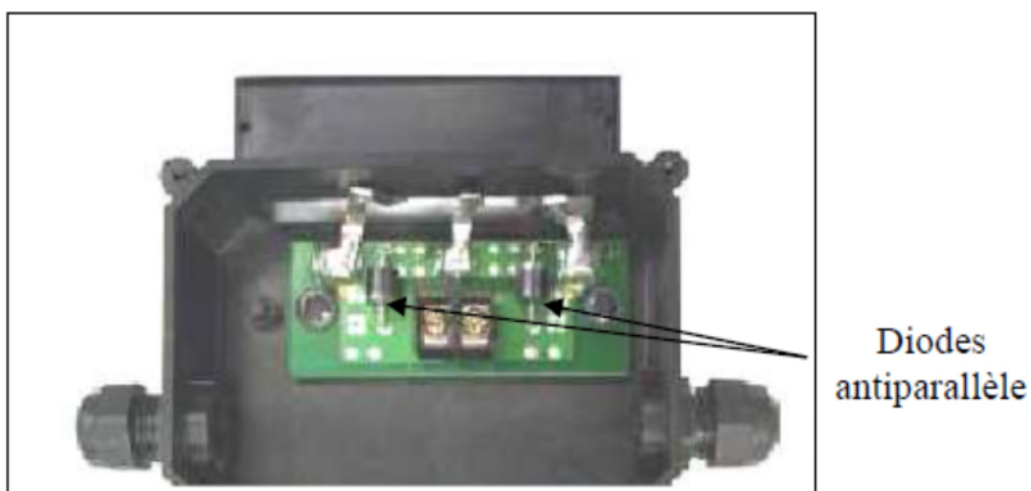
### I.6.1. Définition

Un module photovoltaïque (figure (I-11-a)) est composée de plusieurs cellules solaires, les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène-Vinyl- Acétate) et protégée sur la surface avant d'un verre (figure (I-11-b), trempée à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière du polyéthylène [11].



**Figure (I-11) : Module photovoltaïque**

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant deux diodes antiparallèles (figure (I-12)). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [12].



**Figure (I-12) : Boîte de jonction [12]**

### I.6.2. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. La figure(I.13) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en série [5].

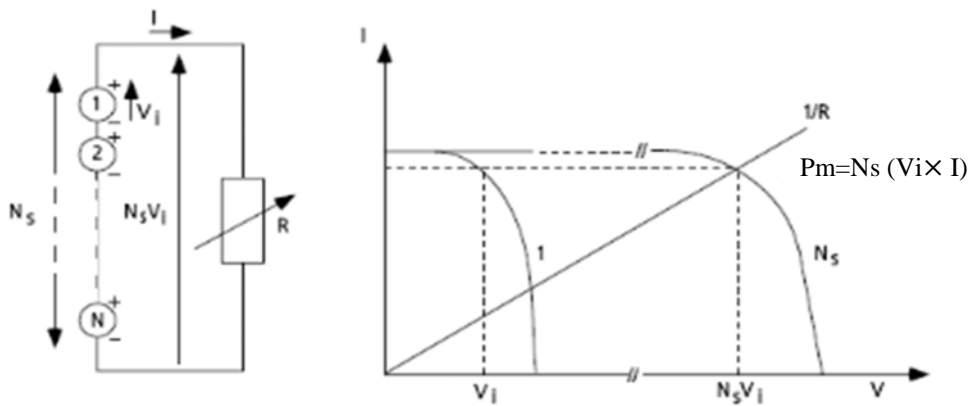


Figure (I-13): Cellules ou modules photovoltaïques en série

### I.6.3. Association en parallèle

En additionnant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche. La figure (I-14) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en parallèle [5].

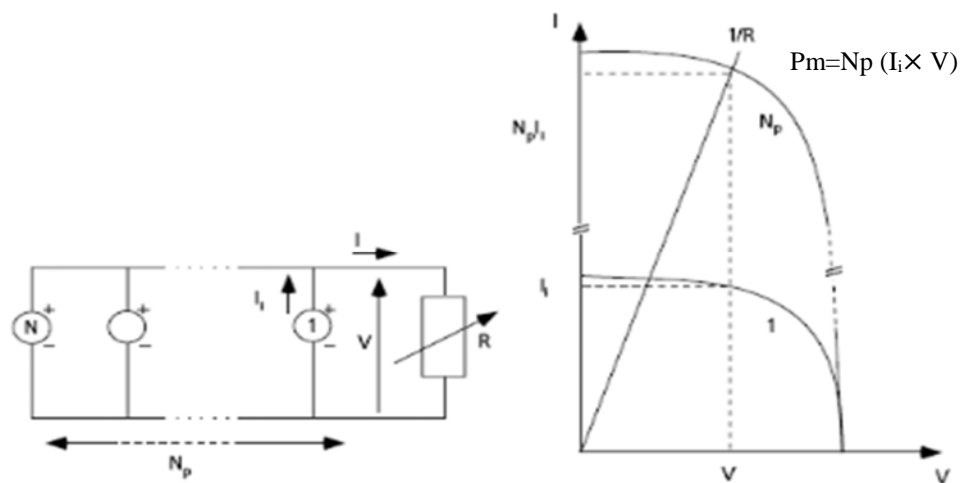


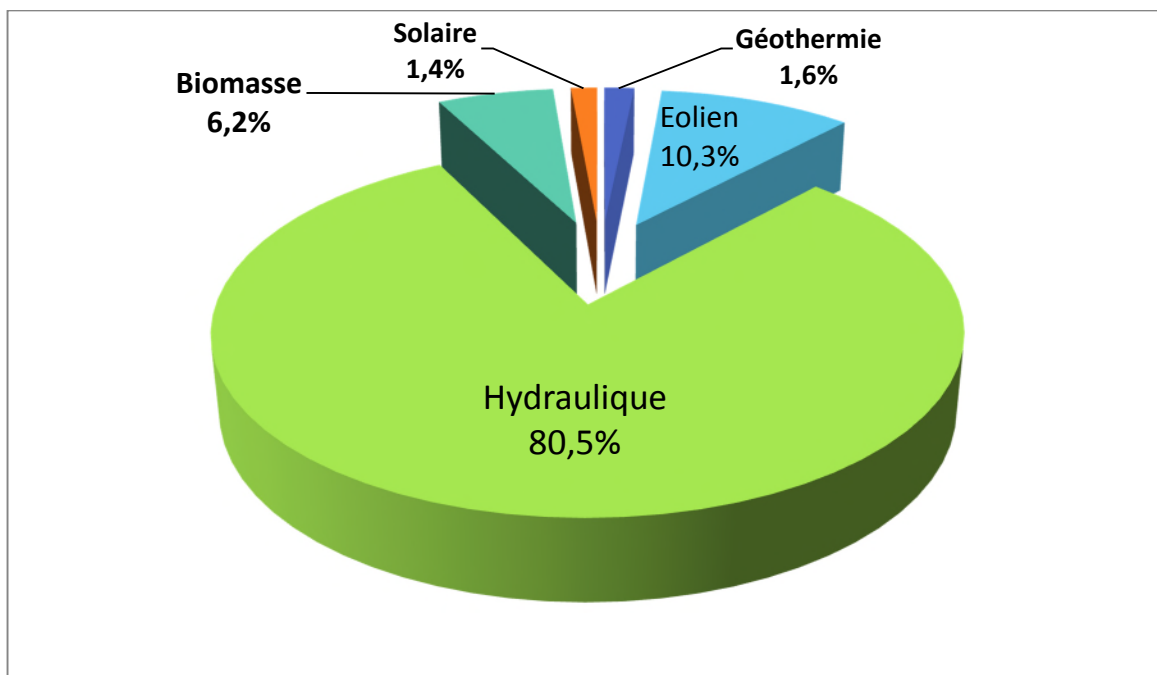
Figure (I-14): Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle



## I.7. Situation des énergies renouvelables dans le monde

Dans la nature, l'énergie la plus abondante est l'énergie solaire. Chaque année l'énergie reçue représente 15000 fois l'énergie consommée par l'humanité. Cela place théoriquement l'énergie électrique photovoltaïque et l'énergie solaire thermique parmi les plus disposées à intervenir massivement dans le bilan énergétique mondial.

La production d'électricité d'origine renouvelable est d'environ 5500 GW en 2011, soit 20,5% de la production mondiale. Cette part reste inférieure à la production d'électricité traditionnelle (79,5 % en 2011, comme le montre la figure (I-16)).



**Figure (I-15):** Structure de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde (Année 2011) [13]

Il est intéressant de noter que la croissance de la filière solaire dans les pays développés et en voie de développement ne répond pas forcément aux mêmes besoins. Dans les régions développées, le développement de l'électricité solaire se fait par la connexion des centrales au réseau électrique.

Dans les régions en développement (Asie du Sud, Amérique du Sud, Afrique subsaharienne), la croissance de la filière solaire répond davantage à des besoins décentralisés comme l'électrification domestique, les télécommunications, etc. La figure (I-16) présente la production d'électricité dans le monde.

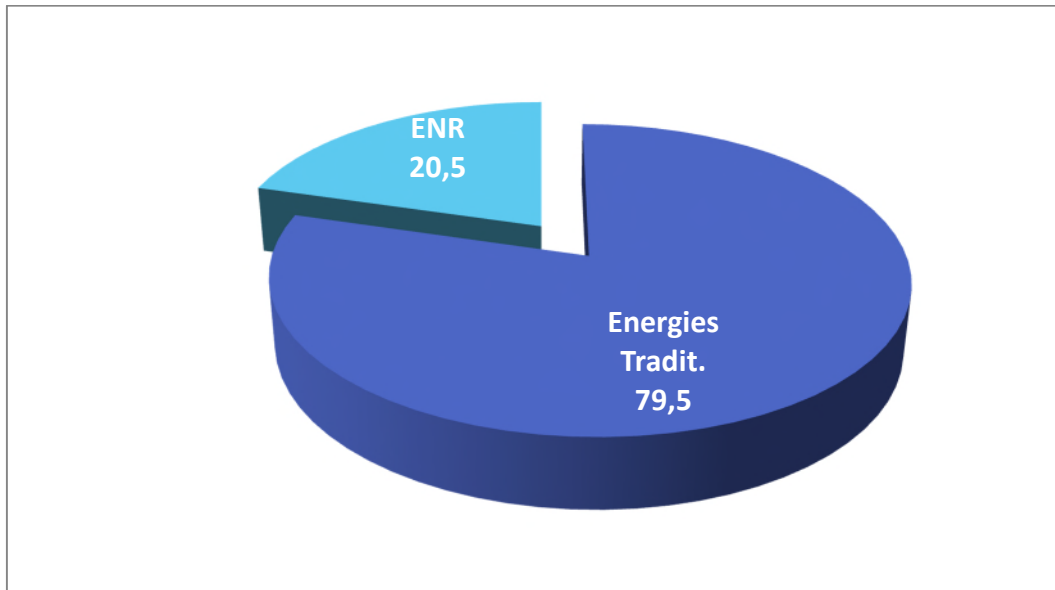


Figure (I-16): Production d'électricité dans le monde (Année 2011) [13]

### I.8. Situation du photovoltaïque en Algérie

Le gisement solaire algérien est parmi le plus abondant au monde, mais très peu développé, il dépasse les 5 millions de TWh/an, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara) [14]. Le Tableau (I-2) présente le potentiel solaire en Algérie.

Tableau (I-2): Potentiel solaire en Algérie [14]

Région	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie en %	04	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Irradiation moyenne reçue (kWh/m2/an)	1700	1900	2650

### I.8.1. Projets réalisés

De nombreux projet sont réalisés ou en cours de réalisation à travers le territoire nationale (éclairage, pompage de l'eau, électrification de foyers, etc.) [14].

#### ➤ Au grand sud

- Electrification au solaire de 18 villages.
- Electrification de plus de 1000 foyers.
- Electrification de 15 mosquées.
- Electrification de 15 écoles.
- Electrification de 20 postes de sécurité (gendarmeries, gardes communales...).
- Une centrale hybride solaire (PV) / diesel de 13 kWc à Illizi (300 foyers – 2000 habitants).
- Alimentation de plus de 100 sites de télécommunications (puissance de 550 kWc).

#### ➤ Dans la STEPPE (HCDS)

- Electrification de plus de 4000 foyers d'une puissance = 600 kWc.
- 160 pompes solaires d'une puissance de 240 kWc.
- 80 pompes éoliennes d'une puissance de 120 kW.

#### ➤ Au nord

- Centrale photovoltaïque de 10 kWc connectées au réseau nationale électrique (ce projet rentre dans le cadre de la coopération Algéro-Espagnole).
- Stations de services de NAFTAL alimentées en énergie solaire d'une puissance de 7 kWc à Staoueli.
- Installations pilotes au profit de la gendarmerie nationale : Alimentation en énergie photovoltaïques des postes de surveillances routiers.

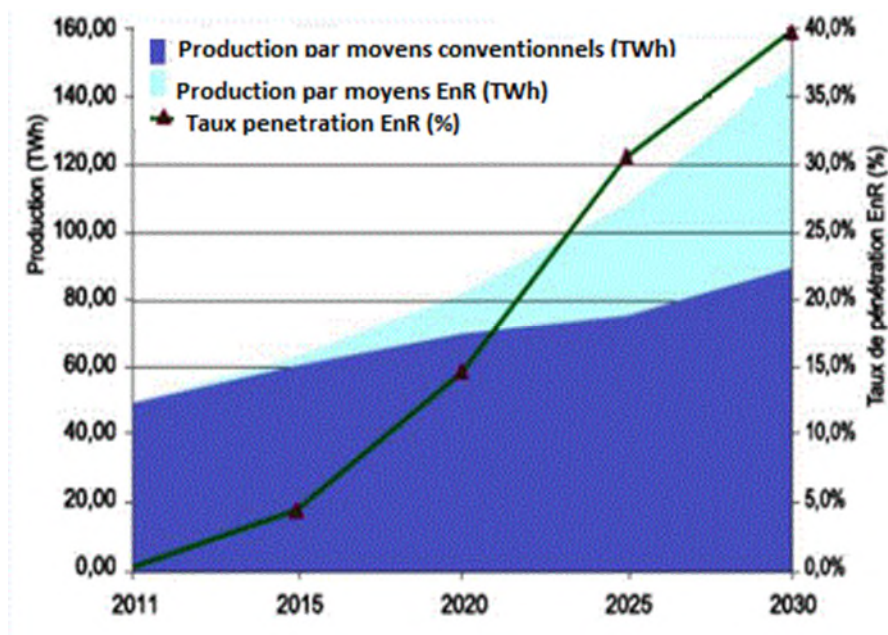
Comme le potentiel en énergies renouvelables est très important en Algérie, le gouvernement Algérien veut promouvoir ce type d'énergie et ce, en lançant un programme ambitieux qui sera bien décrit dans la section suivante.

## I.8.2. Perspectives énergétiques

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

En 2011, le gouvernement Algérien a opté pour un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Ce programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030, ce qui représentera 40% de la production nationale d'électricité [14].

La figure (I-17) représente l'évolution de la part des énergies renouvelables en TWh et le pourcentage du taux de pénétration.



**Figure (I-17):** Taux de pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale

Pour l'énergie solaire photovoltaïque, le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030. Ces chiffres sont énormes, et lèvent donc un grand défi pour les secteurs industriels et économiques, mais aussi pour le secteur de la recherche et développement qui aura pour missions entre autres l'identification des moyens techniques pour palier au caractère intermittent des sources renouvelables [14].

## **I.9. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents composants d'un système photovoltaïque, et on a étudié le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et ses paramètres. Ensuite on a présenté la situation du photovoltaïque dans le monde en prenant l'exemple de l'Algérie; en fin on conclue que :

- L'Algérie possède un gisement solaire photovoltaïque parmi les plus rentables au monde mais mal exploité.
- L'énergie photovoltaïque est une solution intéressante pour diminuer l'effet de serre et le réchauffement climatique causé par les énergies fossiles (pétrole, charbon,...), et ainsi aider dans le processus de migration vers les énergies propres.

***Chapitre II :***  
***Maximisation de puissance***  
***dans un système***  
***photovoltaïque (MPPT)***

## II.1. Introduction

La puissance électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moins important de la température des cellules. Ces deux variables influent sur le comportement du système et présentent des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes. A cet effet et en fonction du type de cette charge, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande du convertisseur. Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le panneau photovoltaïque à sa puissance maximale. La méthode de suivi ou "Tracking" connue sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche du maximum de la courbe de puissance du panneau photovoltaïque.

## II.2. Caractéristique d'un module photovoltaïque

### II.2.1. Définition

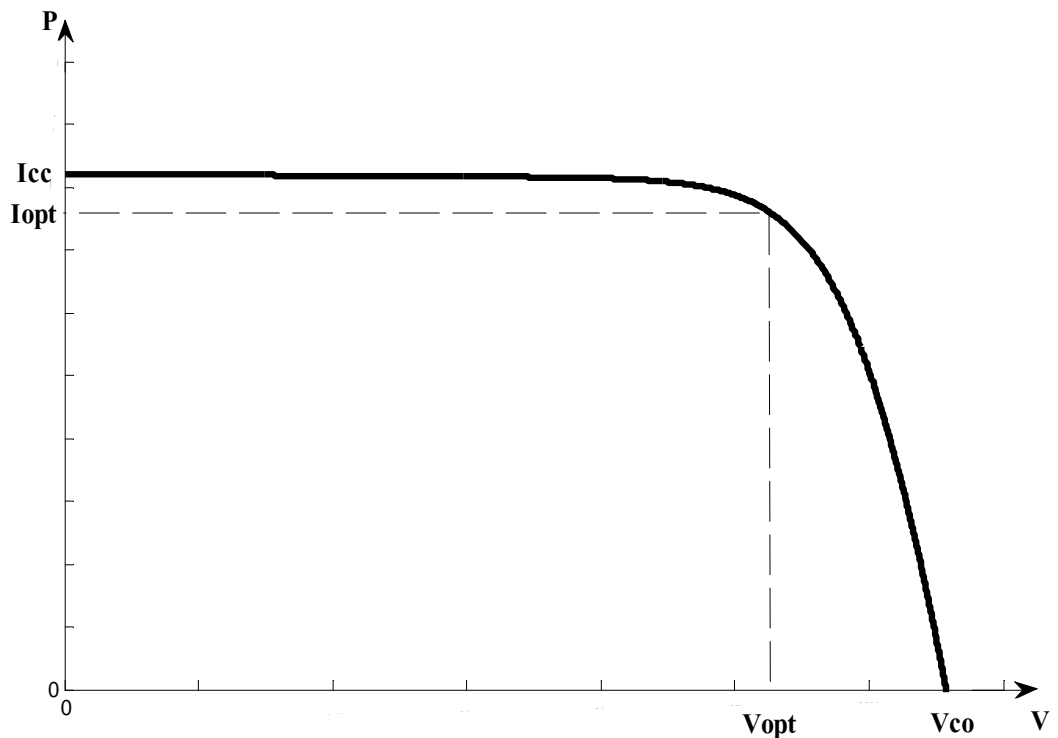
Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en série et/ ou en parallèle pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et elle est nulle la nuit. Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur doté d'une commande MPPT afin d'extraire le maximum de courant alternatif.

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance désirée à une tension ou courant donnés [7].

### II.2.2. Caractéristique Courant-Tension

La figure (II-1) représente la courbe  $I=f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $298 \text{ °K}$ .



**Figure (II-1) :** Caractéristique  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance  $P_m$ .

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_m$  où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée [7].

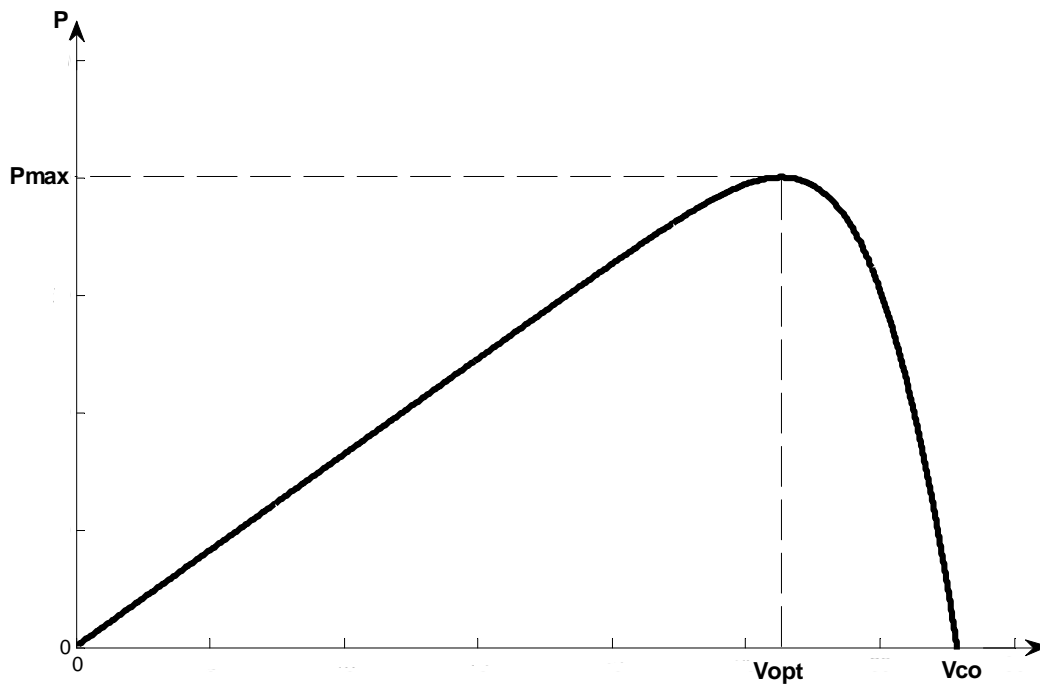
### II.2.3. Caractéristique puissance -tension

La puissance délivrée par le module a pour expression :

$$P = V I \quad (\text{II-1})$$

Pour chaque point, on peut calculer la puissance  $P$  et tracer la courbe  $P = f(V)$  comme le montre la figure (II-2).





**Figure (II-2):** Courbe  $P=f(V)$  d'un module photovoltaïque

Cette courbe passe par un maximum de puissance ( $P_{\max}$ ), à cette puissance correspond une tension  $V_{\text{opt}}$  et un courant  $I_{\text{opt}}$  [13].

## II.3. Techniques MPPT

### II.3.1. Historique

L'algorithme mis en œuvre dans les premières méthodes de maximisation de puissance (MPPT ou Maximum Power Point Tracking) conçues était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à cette époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées au photovoltaïque.

Un nombre important de techniques de commande MPPT ont été élaborés depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant, aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer le point de puissance maximale du générateur PV (GPV).

Ces dernières années des techniques de commandes plus robuste ont été associées à la commande MPPT telle que la logique floue afin d'augmenter le rendement des panneaux solaires.

### II.3.2. Classification des méthodes de maximisation de puissance

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 du 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 élaboré les uns que les autres. Ces méthodes de maximisation de puissance sont classées en deux catégories [20] :

- Les méthodes indirectes ;
- Les méthodes directes.

#### II .3.2.1. Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement, etc.). Elles utilisent aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximale. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser.

Parmi elles, on peut citer :

- Méthode d'ajustement de courbe ;
- Méthode « look-up table » ;
- Méthode de la tension de circuit ouvert du générateur ;
- Méthode de courant de court-circuit.

#### II.3.2.2. 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 photovoltaïques. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- Méthode de différenciation ;
- Méthode Perturbation et Observation (P&O) ;
- L'incrément de conductance ;
- Les techniques d'intelligence artificielle (logique floue, etc.).

## II.4. Etat de l'art des principales méthodes utilisées

L'énergie photovoltaïque est l'une des importantes sources d'énergies renouvelables qui présente un dénouement à nos problèmes de production d'énergie. De plus, cette énergie semble la plus prometteuse, non polluante et inépuisable. Néanmoins, la production de cette énergie est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque ne coïncide pas toujours avec le point à maximum de puissance.

Par conséquent, plusieurs travaux ont porté sur les systèmes photovoltaïques. Ils ont essayé de développer des algorithmes permettant d'extraire le maximum d'énergie convertie par le panneau et alors qui permet un fonctionnement optimal du système photovoltaïque, ces différentes méthodes feront l'objet de notre étude dans ce qui suit.

### II.4.1. MPPT basée sur la tension à circuit ouvert

Cet algorithme est basé sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert  $V_{oc}$ . La constante proportionnelle  $k_1$ , dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques [21, 22] :

$$k_1 = \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} = Cte < 1 \quad (II-2)$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système, cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le point de puissance maximale (PPM) est calculé suivant l'équation (II-2), et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de  $k_1$ . Cependant, dans la littérature, les rapports  $k_1$  sont compris entre 0.73 et 0.80 pour les modules PV polycristallins.

En considérant  $k_1$  constant, on ne tient donc pas compte de l'influence de l'ensoleillement et de la température et encore moins du vieillissement des panneaux. Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix [22, 23].

### II.4.2. MPPT basée sur le courant de court-circuit

Cette méthode est similaire à la précédente et elle est basée sur la proportionnalité existante entre le courant de court-circuit et le courant au PPM (équation (II-3)) :

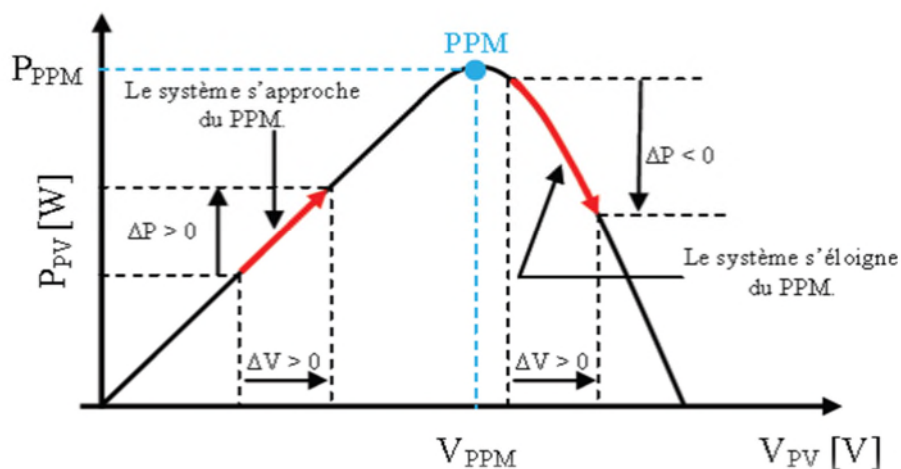
$$k_2 = \frac{I_{\text{mpp}}}{I_{\text{sc}}} = \text{Cte} < 1 \quad (\text{II-3})$$

Dans la plupart des cas, pour les cellules polycristallines, le coefficient  $k_2$  est choisi égal à 0.85 [24]. Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert.

### II.4.3. Méthode Perturbation et observation

La méthode Perturbation et Observation (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le PPM : on mesure le courant et la tension du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension et /ou le courant afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte.

Comme indiqué précédemment, le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{\text{pv}}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{\text{pv}}$  qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II-3), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{\text{pv}}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{\text{pv}}$ , 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.



**Figure (II-3) :** Caractéristique  $P_{\text{pv}} = f(V_{\text{pv}})$  d'un panneau photovoltaïque [25]

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$ , 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.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM [25].

La figure (II-4) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation. Cependant, elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

Il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Par contre, pour une journée avec de forts et fréquents changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes, en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

Si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le MPP lorsque des variations brusques des conditions climatiques et/ou de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la figure (II-5). Pour comprendre, prenons l'exemple d'un éclairage donné, noté  $E_1$ , avec un point de fonctionnement se situant en A. Suite à une perturbation de tension de valeur  $\Delta V$ , ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairage, une inversion du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative.

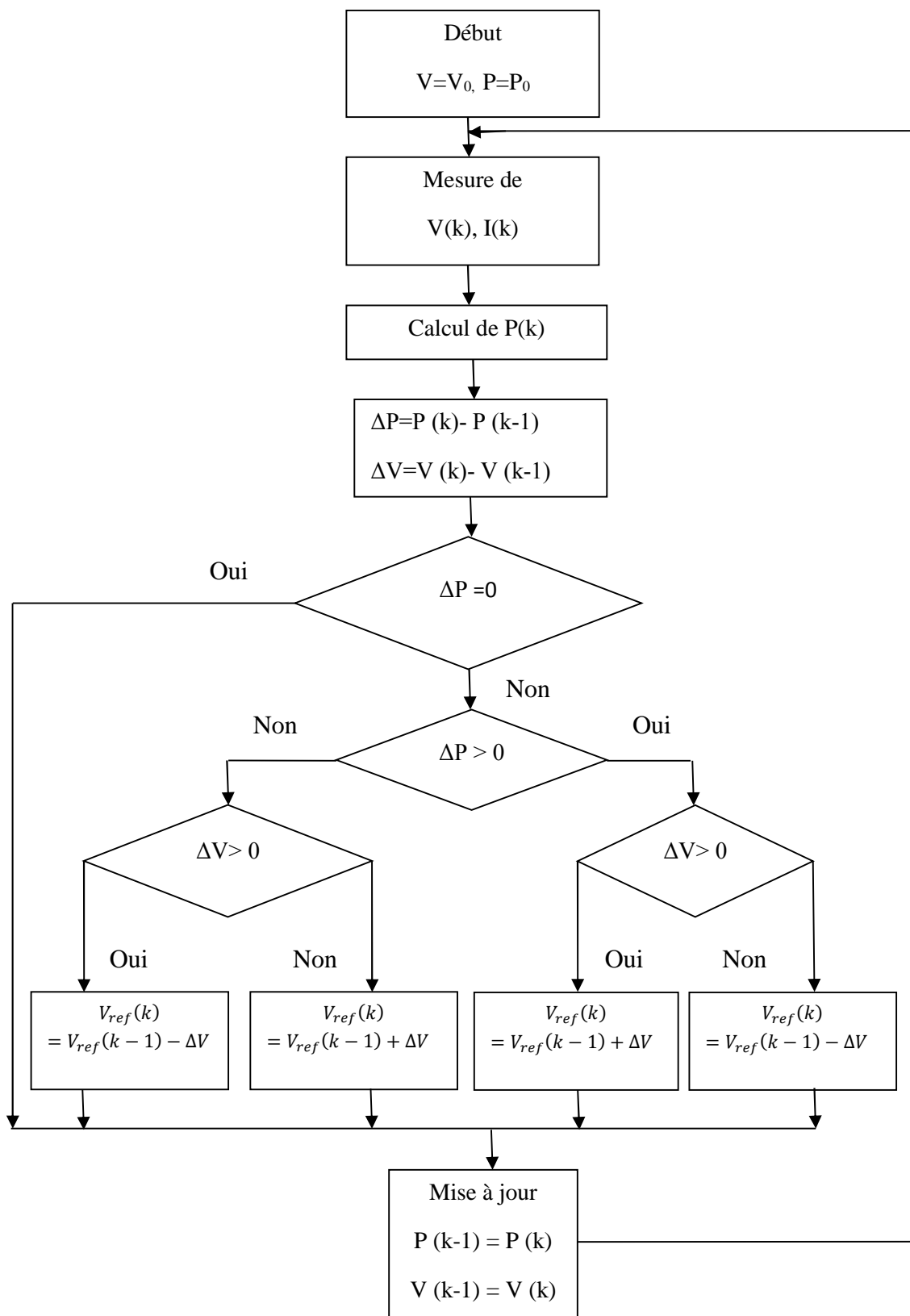
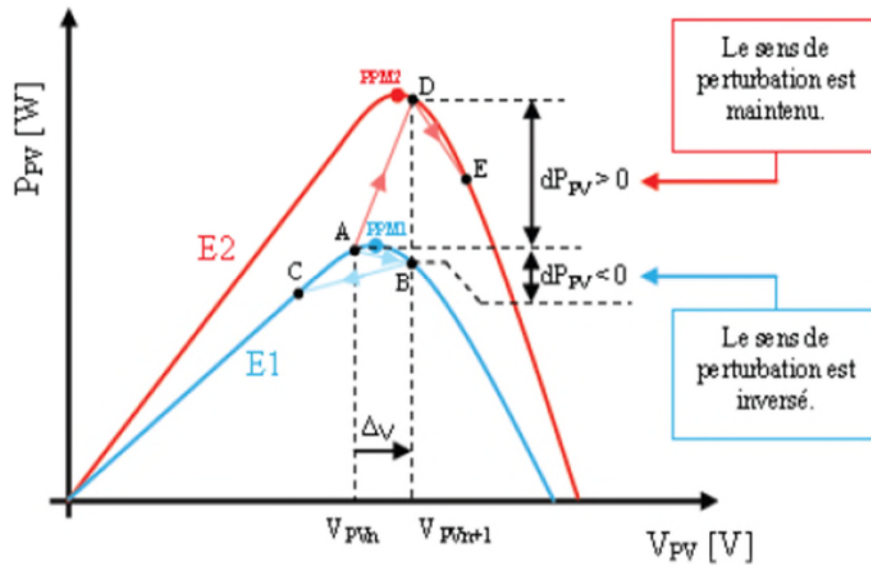


Figure (II-4) : Algorithme type de la méthode P&O [25]



**Figure (II-5) :** Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation [25]

Ceci entraîne en régime d'équilibre, des oscillations autour du MPP causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C. On peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A.

Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques  $P(V)$  du module d'E1 à E2), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété dans ce cas-là, par une variation positive de la puissance. Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur de trajectoire liée au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne momentanément du MPP en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non-optimisation de la puissance momentanée. Au pire des cas, le système de recherche peut se perdre et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du MPP. Il en résulte donc, en cas de conditions météorologiques défavorables, de fortes lacunes au niveau de la commande.

#### II.4.4. Méthode d'incrémentatation de conductance

L'algorithme d'incrémentatation de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (PPM) n'est atteint que si  $dP/dV$  est nulle. Les caractéristiques du module photovoltaïque sur la figure (II-6) prouvent plus loin que la dérivée est supérieure à zéro à gauche du PPM et inférieure à zéro à droite du PPM. Ceci mène à l'ensemble d'équations suivant [26]:

$$(dP/dV) = 0 \quad \text{Pour} \quad V = V_{mp} \quad (\text{II-4})$$

$$(dP/dV) > 0 \quad \text{Pour} \quad V < V_{mp} \quad (\text{II-5})$$

$$(dP/dV) < 0 \quad \text{Pour} \quad V > V_{mp} \quad (\text{II-6})$$

Sachant que  $P=V I$ , la dérivée du produit par rapport à la tension donne la relation suivantes :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (\text{II-7})$$

Ce qui revient à écrire:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (\text{II-8})$$

Les changements par accroissement nécessaires  $dV$  et  $dI$  sont obtenus en comparant les valeurs mesurées les plus récentes pour  $V$  et  $I$  à ceux mesurées durant le cycle précédant :

$$dV(k) \approx V(k) - V(k-1) \quad (\text{II-9})$$

$$dI(k) \approx I(k) - I(k-1) \quad (\text{II-10})$$

La fonction centrale pour trouver le PPM utilise les conditions suivantes :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (\text{II-11})$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (\text{II-12})$$

Si la relation (II-11) est vraie, le PPM est atteinte et aucun changement de la tension  $V(k)$  n'est nécessaire. Si la relation (II-11) est fausse, selon que  $V(k)$  est supérieur ou inférieur à  $V_{mp}$ , la tension  $V(k)$  est ajustée en conséquence.

Si le système fonctionnait au PPM pendant le cycle précédent, le changement par accroissement de la tension de fonctionnement sera zéro ( $dV(k) = 0$ ). Ceci mènerait à une division par l'erreur zéro. Si ( $dI = 0$ ), l'ajustement de la tension du système est évité. Si ( $dI \neq 0$ ), les équations (II-5) et (II-6) sont employées pour déterminer si le système fonctionne au-dessus ou au-dessous de  $V_{mp}$  et un ajustement correspondant à la tension de fonctionnement sera réalisé en conséquence [27].



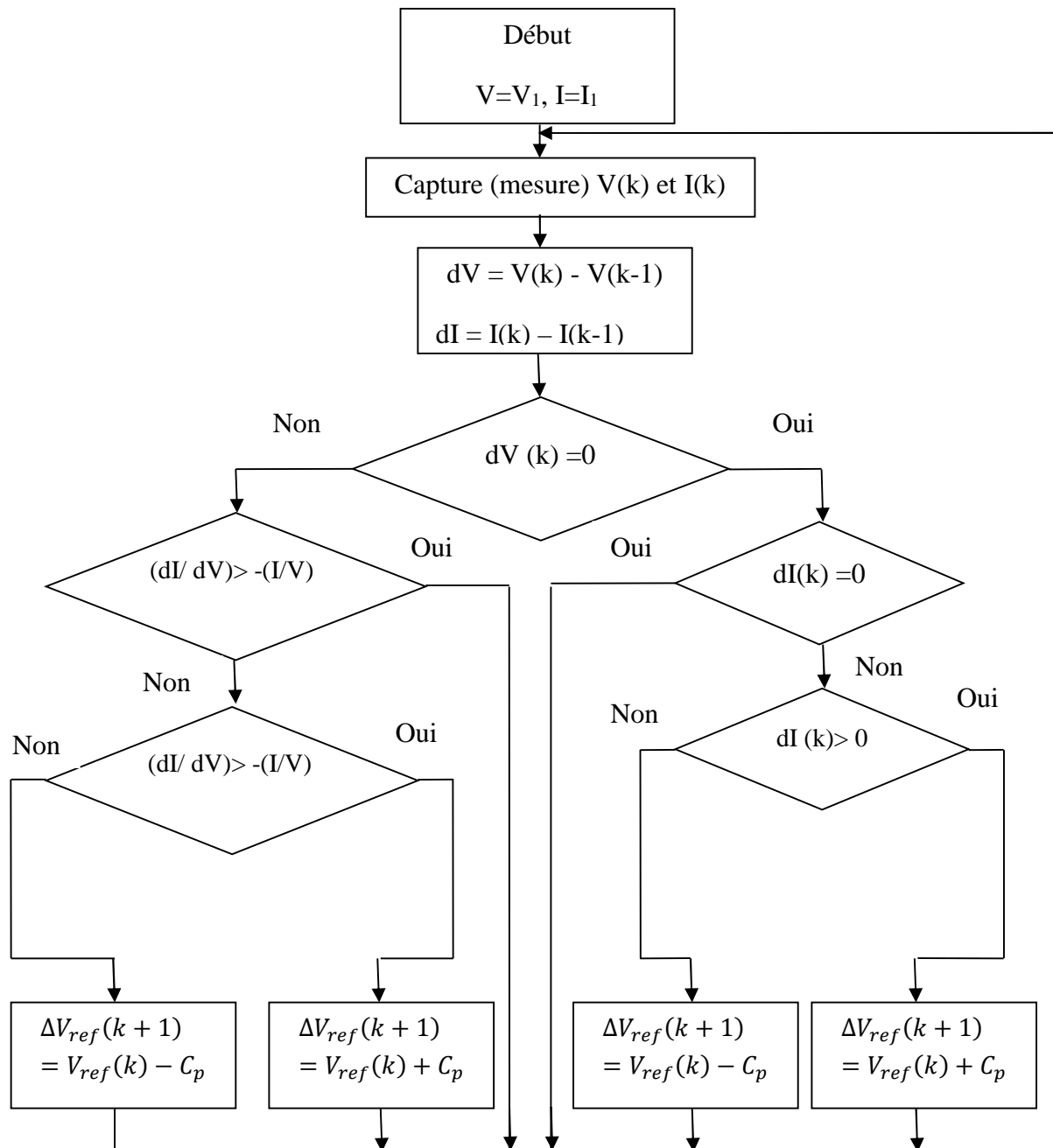


Figure (II-6): Organigramme de l’algorithme MPPT d’incrémentatation de conductance

### II.4.5. Logique floue

L’idée de la logique floue est inventée par le professeur L. A. Zadeh de l’université de Berkeley en Californie en 1965. Cette idée trouve sa première application expérimentale en 1974 grâce au Dr. E. H. Mamdani de l’université de London, puis industrielle pour la régulation du four d’une cimenterie réalisée par deux sociétés danoises. A partir de 1980, la logique floue trouve son application dans plusieurs domaines.

L'implantation de la technique de la logique floue passe par les trois étapes suivantes :

- Fuzzification : conversion des données classiques (valeurs numériques) vers des variables floues ou des fonctions d'appartenance ;
- Processus d'inférence : combiner les fonctions d'appartenance avec les règles de contrôle pour dresser les variables floues de sortie ;
- Défuzzification : conversion des variables floues vers des valeurs numériques.

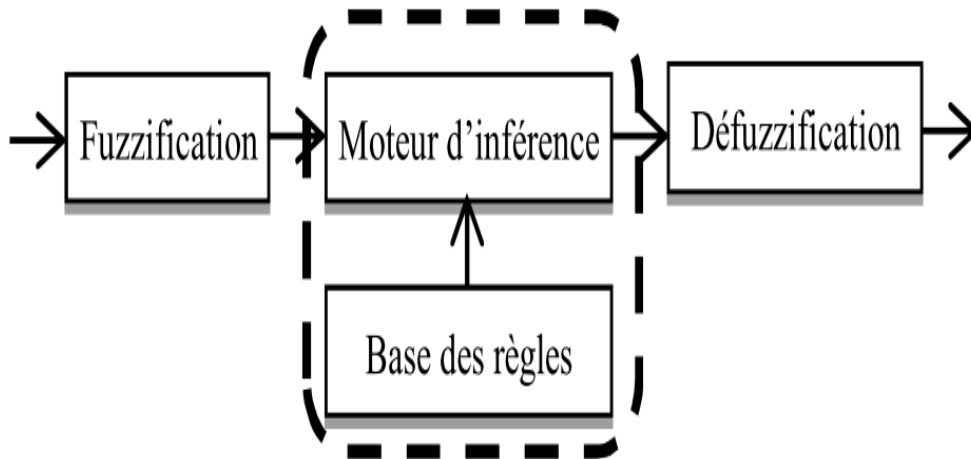


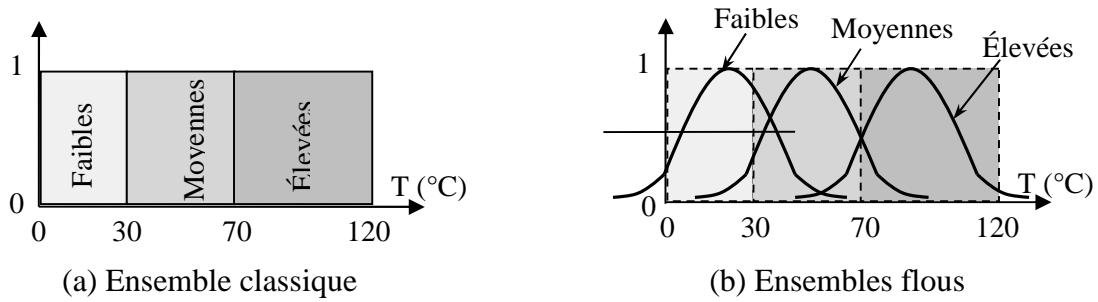
Figure (II- 7) : Schéma de principe de la régulation floue

#### II.4.5.1. Ensembles flous

Dans la logique classique un élément appartient à un ensemble ou n'appartient pas, sa fonction caractéristique prend la valeur 1 ou 0 respectivement. Dans la logique floue toutes les valeurs comprises entre 0 et 1 sont possibles ; un tel sous-ensemble dont les éléments ont cette propriété est appelée sous-ensemble flou.

Les éléments, dans la logique floue, peuvent appartenir à plusieurs ensembles flous simultanément avec des degrés d'appartenance partielle différents. Soit l'exemple de la température définie par trois ensembles : faibles températures (0-30°C), moyennes températures (30-70°C), températures élevées (70-120°C).

Ces trois ensembles sont définis du point de vue classique. Une valeur quelconque de la température entre 0 et 120°C, peu appartenir seulement à un seul ensemble, soit faible, moyenne ou élevée. En introduisant la notion d'ensembles flous, l'appartenance de cette valeur à deux ensembles ou aux trois ensembles simultanément devient possible (figure II-8).



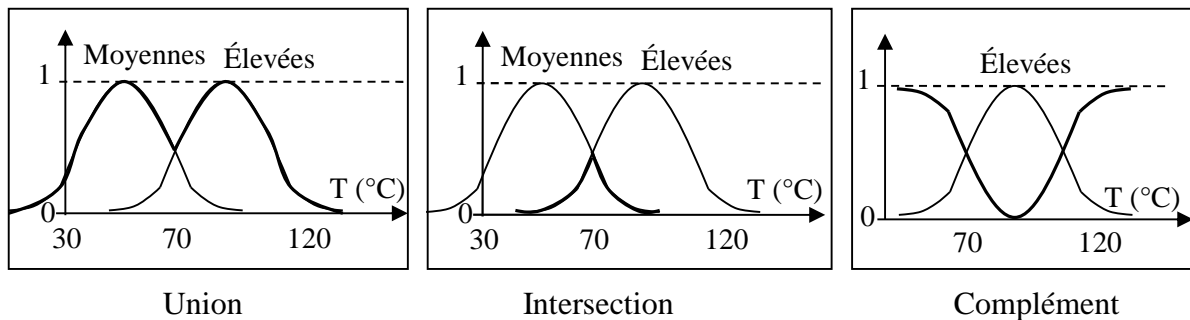
**Figure (II-8) :** Ensembles classiques et ensembles flous

Sur la figure (II-8-b) on peut remarquer que la température 40°C appartient à l'ensemble des faibles températures à un degré de 0.5 et au même temps elle appartient à l'ensemble des moyennes températures à un degré de 0.7. Une autre valeur intéressante est la valeur 55°C, en effet cette valeur appartient aux trois ensembles simultanément (faible et élevée à 10% et moyenne à 90% approximativement).

Une fois les ensembles flous définis, des opérations mathématiques concernant ce type d'ensembles ont été développées. Les opérateurs mathématiques élaborés ressemblent beaucoup à ceux reliés à la théorie des ensembles conventionnels. Les opérateurs de l'intersection, l'union, la complémentation sont traduites par les opérateurs "ET, OU et NON respectivement. Soit A et B deux ensembles flous, dont les fonctions d'appartenance sont  $\mu_A(x)$ ,  $\mu_B(y)$  respectivement. Les fonctions utilisées pour réaliser les différentes opérations floues de base sont (opérateurs de Zadeh) :

- Intersection (opérateur ET) :  $\min(\mu_A(x), \mu_B(y))$  ;
- Union (opérateur OU) :  $\max(\mu_A(x), \mu_B(y))$  ;
- Complément (opérateur NON) :  $1 - \mu_A(x)$  .

La figure (II-9) représente ces opérateurs graphiquement :



**Figure (II-9) :** Opérations sur les ensembles flous

### II.4.5.2. Fuzzification et fonctions d'appartenances

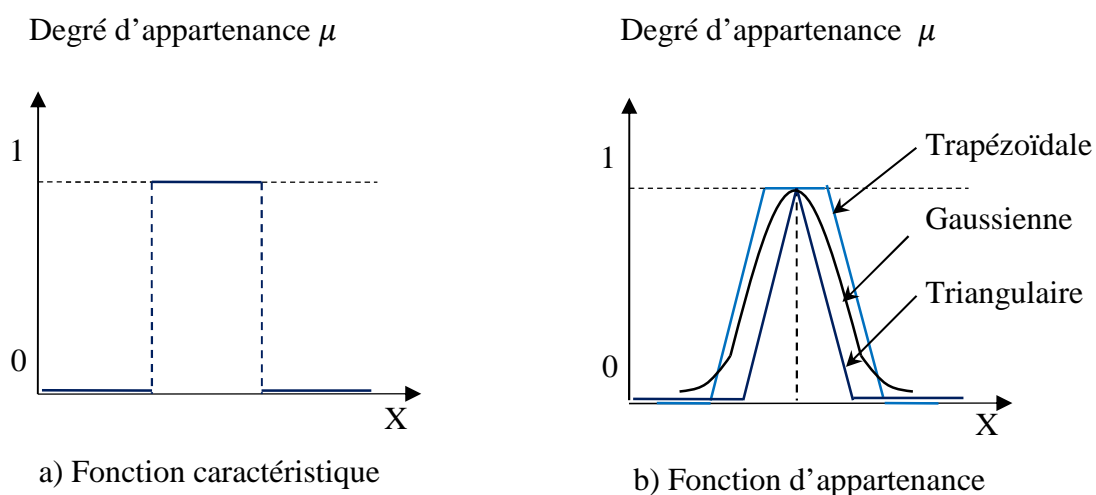
La fuzzification est la première étape dans le processus de la logique floue. Généralement, elle requiert deux processus : définition des variables linguistiques et détermination du degré d'appartenance des entrées à travers les fonctions d'appartenances utilisées.

#### ➤ Variables linguistiques

Le concept des variables linguistiques joue un rôle important dans le domaine de la logique floue. Une variable linguistique comme son nom le suggère, est une variable définie à base de mots ou des phrases au lieu des nombres. En effet, la description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme "quelque, beaucoup, souvent, chaud, froid, rapide, lent, grand, petit ...etc.". Ce genre d'expressions forme ce qu'on appelle des variables linguistiques de la logique floue.

#### ➤ Fonctions d'appartenance

Un ensemble flou est défini sur l'univers de discours  $X$  (plusieurs ensembles floues peuvent être définis sur le même univers de discours) par sa fonction d'appartenance qui correspond à la fonction caractéristique en logique booléenne. La fonction d'appartenance peut avoir plusieurs formes (triangulaire, trapézoïdale, gaussienne,... etc.) comme le montre la figure (II-10). **Le choix de la forme des fonctions d'appartenance dépend de l'application visée.**

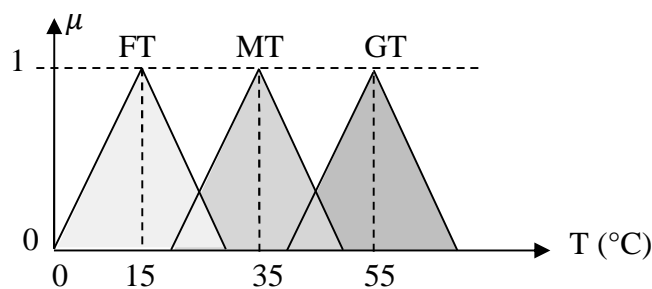


**Figure (II-10):** Différence entre la logique classique et la logique floue

Prenant l'exemple de trois intervalles de température définis cette fois ci du point de vue des ensembles flous comme suit :

- Faibles températures (FT):  $0\text{ °C} \leq T \leq 30\text{ °C}$  , centre de l'intervalle :  $15\text{ °C}$
- Moyennes températures (MT):  $20\text{ °C} \leq T \leq 50\text{ °C}$  , centre de l'intervalle :  $35\text{ °C}$
- Grandes températures (GT):  $40\text{ °C} \leq T \leq 70\text{ °C}$  , centre de l'intervalle :  $55\text{ °C}$

L'univers de discours et la température, les variables linguistiques sont FT, MT et GT. L'ensemble flou des faibles températures sera défini par une fonction d'appartenance qui peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle  $[0,1]$ . Autrement dit, chaque température correspond à un degré d'appartenance à l'ensemble flou des faibles températures, compris entre 0 et 1. La figure (II-11) représente l'étape de fuzzification par des fonctions triangulaires.



**Figure (II-11) :** Fuzzification et degré d'appartenance

Cet exemple montre la gradualité que permet d'introduire la logique floue sur l'appartenance des éléments aux ensembles définis. La détermination du degré d'appartenance s'effectue à l'aide de fonctions mathématiques et des opérateurs de la logique floue définis précédemment.

### ➤ Règles floues et processus d'inférence

Les règles floues traduisent l'expérience et les connaissances d'un opérateur relié à un domaine ou une application données. Elles sont représentées par des séquences de la forme : SI (condition) ALORS (conclusion), laissant ainsi l'algorithme de décider de l'action à prendre en termes des informations disponibles.

Pour la pluparts des applications de la logique floue, l'entrée est composée de deux variables. Dans ce cas, la règle floue est exprimée à l'aide d'une implication (inférence) entre deux propositions floues désignées par des variables linguistiques et séparés par un opérateur flou.

Généralement, plusieurs règles floues sont nécessaires pour prendre une décision face à une situation donnée. On s'intéresse au cas de plusieurs règles floues dans le domaine de la commande et de la régulation. Les règles floues peuvent être décrites de plusieurs façons :

• **Linguistiquement** : dans ce cas, on exprime les règles de façon explicite comme dans l'exemple suivant :

"Si l'accélération est faible **ET** la vitesse est faible **Alors** faire appel à un grand couple".

• **Symboliquement** : il s'agit, dans ce cas, d'une description linguistique où l'on remplace la désignation des ensembles flous par des symboles tels que GP, MP,...etc. désignant (Grand Positif, Moyen Positif,...etc.)

• **Par matrice d'inférence** : dans ce cas, on rassemble toutes les règles qui sont désignées symboliquement dans un tableau appelé « matrice d'inférence ». Les entrées du tableau représentent les degrés d'appartenance des variables linguistiques des entrées aux différents ensembles flous. Et l'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de sortie défini par la règle.

### II.4.5.3. Défuzzification

Le mécanisme d'inférence le plus couramment utilisé est celui dit « de Mamdani ». Dans ce cas, la conclusion est toujours une variable floue nécessitant ainsi passage au domaine réel via le processus de défuzzification. Les méthodes de défuzzification les plus couramment utilisées sont :

- méthode de la moyenne des maximums ;
- méthode du maximum et la méthode du centre de gravité.

#### ➤ **Méthode de Maximum**

Cette méthode génère une commande qui représente l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette méthode est simple, rapide et facile, mais présente certains inconvénients lorsqu'il existe plusieurs valeurs pour

lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale et ne tient pas compte de l'effet de toutes les règles.

➤ **Méthode de la moyenne des maximums**

Cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne de tous les maximums, dans le cas où il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.

➤ **Méthode du centre de gravité**

Cette méthode génère une commande égale à l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette abscisse de centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation générale suivante :

$$S_{CG} = \frac{\sum (\mu_i x_i)}{\sum \mu_i} \quad (\text{II-13})$$

Tels que  $x_i$  et  $\mu_i$  sont les éléments de l'ensemble floue et leurs degrés d'appartenance respectivement.

Cette méthode est la plus utilisée dans les systèmes de commande floue, (car elle tient compte de toutes les règles et ne présente pas une confusion de prise de décision), malgré sa complexité, puisqu'elle demande des calculs importants [29].

#### **II.4.5.4. Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue**

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages. Les avantages essentiels sont :

- Modélisation mathématique rigoureuse du processus non nécessaire;
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus ;
- La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-linéaire et difficile à modéliser) ;
- La réduction du temps de développement et de maintenance ;
- La simplicité de définition et de conception.

Par contre, les inconvénients sont :

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification) ;
- L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile) ;
- La difficulté de montrer la stabilité dans tous les cas ;

La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

## **II.5. Conclusion**

Dans ce deuxième chapitre, nous avons décrit les caractéristiques d'un module photovoltaïque. Ensuite, nous avons rappelé les principes des techniques MPPT les plus populaires, à la fin de cette partie on conclue que :

- Il existe deux types de méthodes de maximisation de puissance dans un système photovoltaïque (directes et indirectes) ;
- On utilise les techniques MPPT afin de tirer le maximum de puissance du système photovoltaïque malgré les variations de la charge, d'ensoleillement et de température.

Dans la suite du travail, quelques méthodes de maximisation du point de puissance seront appliquées.



***Chapitre III :***  
***Modélisation et optimisation***  
***de puissance d'un module PV***

### III.1. Introduction

Le capteur photovoltaïque est décrit par ses caractéristiques courant tension ( $I=f(V)$ ) figure (III-1); Cette modélisation est utilisée généralement pour approximer la sortie du capteur (tension, courant) en fonction de deux entrées qui sont la température et l'éclairement reçu par le capteur figure (III-2). Le courant généré par le module photovoltaïque à une tension donnée dépend uniquement de l'éclairement et de la température de la cellule.

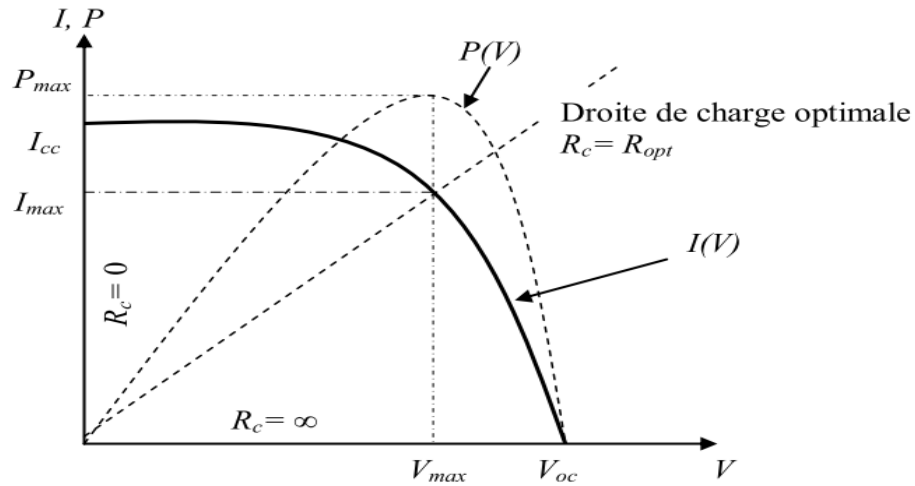


Figure (III-1) : Caractéristiques type d'un générateur photovoltaïque

La puissance fournie par la cellule solaire et son rendement, dépendent du matériau utilisé et de la technologie de fabrication, et des paramètres extérieurs (température, spectre et puissance du rayonnement incident, circuit électrique extérieur connecté à la cellule, etc.) afin d'optimiser cette puissance, on a utilisé des commandes MPPT qu'on détaillera par la suite de ce chapitre.

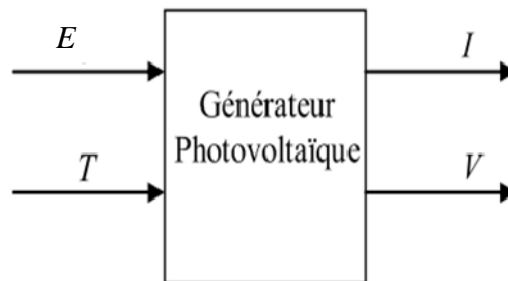


Figure (III-2) : Schéma bloc de générateur photovoltaïque

## III.2. Modélisation du panneau photovoltaïque

### III.2.1. Modèle d'une cellule solaire idéale

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction PN) [30].

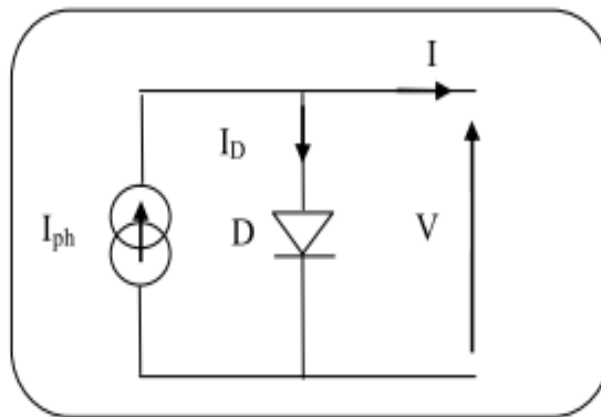


Figure (III-3) : Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{III-1})$$

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q \cdot V}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (\text{III-2})$$

### III.2.2. Modèle d'une cellule solaire

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Il existe deux modèles du GPV:

- Modèle à une diode ;
- Modèle à deux diodes.

Dans ce chapitre, on s'intéressera au modèle à une diode où nous présentons plus de détails par la suite.

### III.2.2.1. Modèle à une diode

Le modèle à une diode est le plus utilisé, parce qu'il est très précis. La conversion de l'énergie de la lumière en énergie électrique est modélisée par un générateur de courant [2].

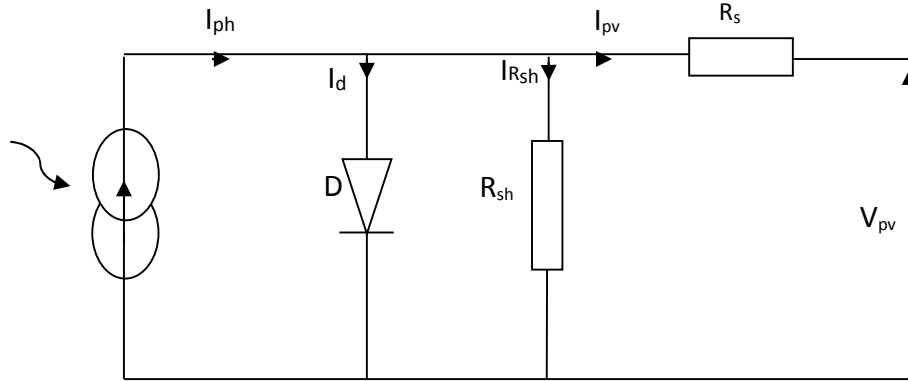


Figure (III-4) : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode

#### III.2.2.1.1. Modélisation du panneau photovoltaïque étudié

A partir du schéma (III-4) le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par la loi de KIRCHHOFF :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \tag{III-3}$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 e^{((V_{pv} + R_S I_{PV}) / (V_T)) - 1} - ((V_{pv} + R_S I_{PV}) / R_{Sh}) \tag{III-4}$$

$$I_{ph} = \frac{E_S}{E_{Sref}} (I_{sc} + K_I (T - T_{jref})) \tag{III-5}$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_I \Delta T}{e^{\left(\frac{(V_{oc} + K_V \Delta T)}{V_T}\right) - 1}} \tag{III-6}$$

- $V_T$  : Voltage thermique ( $V_T = \frac{(N_S n K_B T)}{q}$ ) ;
- $q$  : Charge élémentaire ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  C).
- $K_I$  : Constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/k) ;
- $N_s$  : Nombre de cellules connectées en série ;
  - $E_{sref}, T_{jref}$  : Eclaircement et température sous conditions STC ;
- $T_j$  : Température de jonction ;
- $I_{sc}$  : Courant de court-circuit.

### III.2.2.1.2. Caractéristique du module choisi

Dans notre travail, nous avons utilisé le panneau KYOCERA KC200GT 200W. Le tableau (III-1) donne les paramètres électriques suivants :

**Tableau (III-1) :** Paramètres électriques du panneau KYOCERA KC200GT 200W

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau $P_m$	200 W
Puissance nominale $P_n$	200 W
Courant au point de puissance max $I_m$	7.61 A
Tension au point de puissance max $V_m$	26.3 V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	8.21A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	32.9 V
Coefficient d'incrémentatation du courant $I_{cc} (\alpha_{cc})$	3,18 mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension $V_{oc} (\beta_{oc})$	- 0.123 V/°C
Nombre de cellules en série $N_S$	54

### III.2.2.1.3. Résultats de simulation

En utilisant les équations électriques du model à une diode sur le générateur photovoltaïque cité précédemment, on obtient les figures (III, 5,6 et 7) par la simulation de ce model sous matlab/simulink.

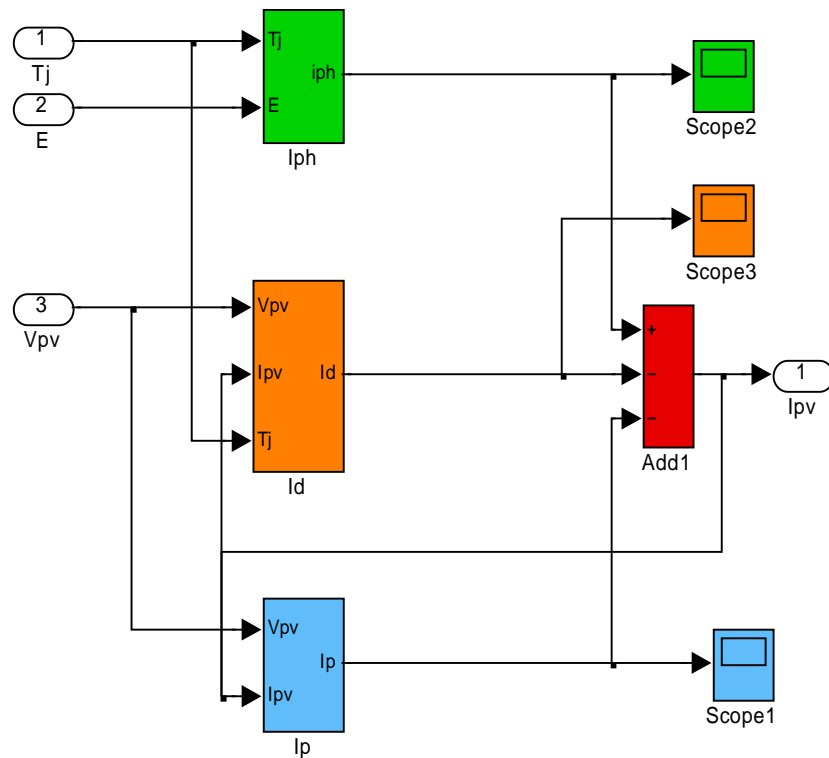


Figure (III-5) : Bloc de simulation du model de la cellule à une diode

On a présenté ci-dessous l'allure de la puissance figure (III-7), et du courant figure (III-6) en fonction de la tension, obtenue par la simulation du générateur photovoltaïque dans les conditions STC ( $E_s = 1000\text{W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ):

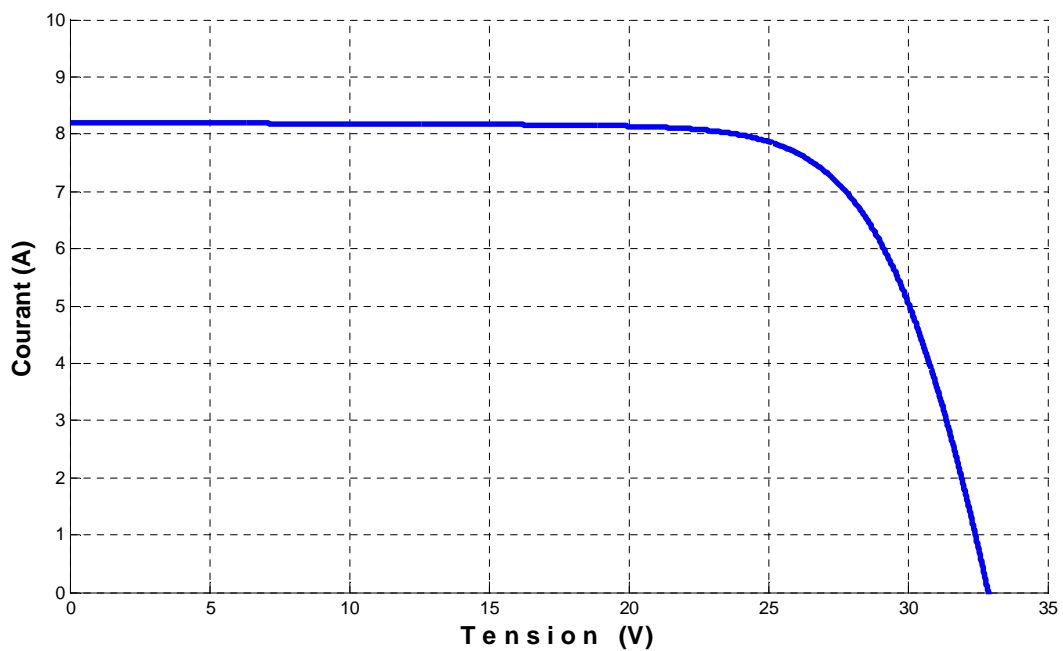


Figure (III-6) : Caractéristique I(V) dans les conditions STC

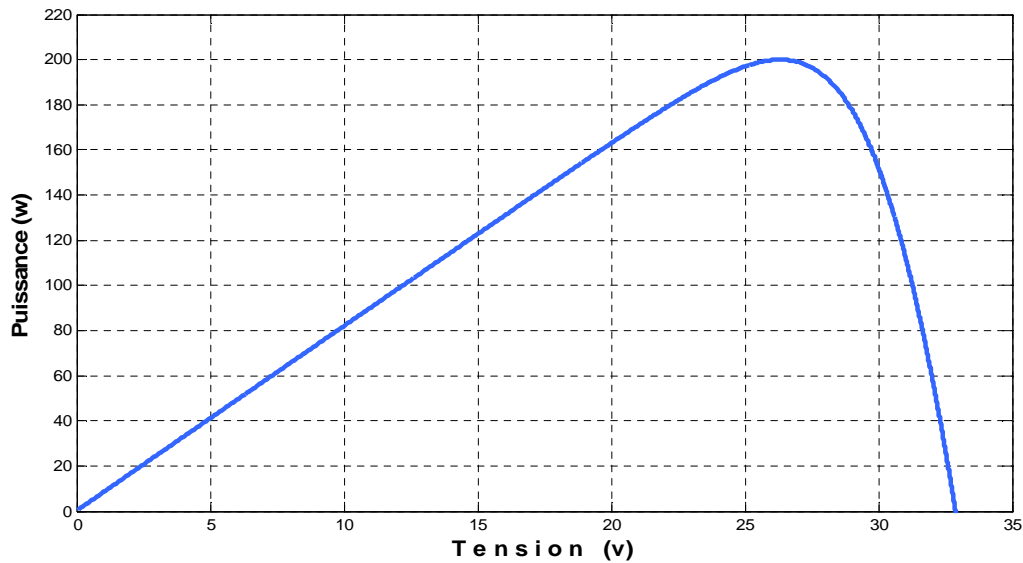


Figure (III-7) : Caractéristique P(V) dans les conditions STC

D'après les figures (III-6 et 7) on remarque que le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) fourni par le générateur photovoltaïque est à sa valeur nominale ( $I_{cc} = 8,21$  A), et la puissance aux bornes du générateur est optimale.

### III.2.2.1.4. Influence de l'éclairement

Pour ce modèle, nous avons simulé et déterminé les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour différents niveaux d'irradiations et à température constante.

Les figures (III-8 et 9) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module solaire dans les conditions STC.

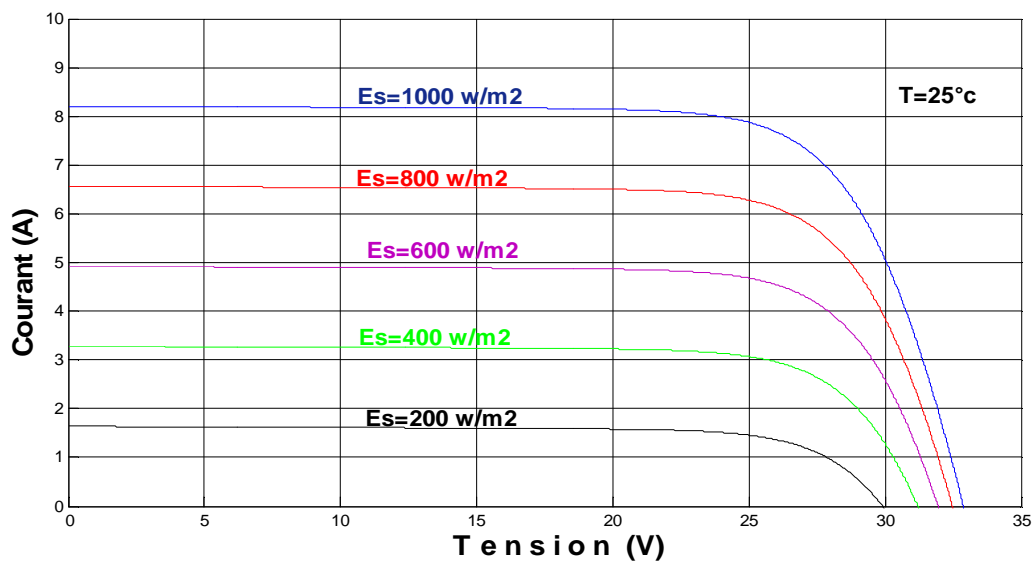


Figure (III-8) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I(V)

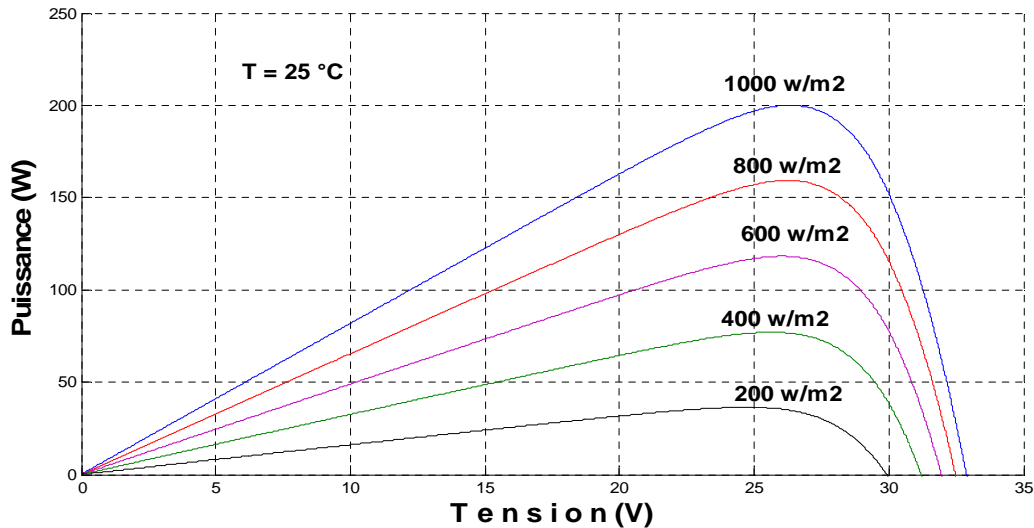


Figure (III-9) : Influence de l’ensoleillement sur la caractéristique P(V)

Le courant produit par la cellule ( $I_{ph}$ ) est pratiquement proportionnel à l’ensoleillement solaire  $E$ . Par contre, la tension  $V$  aux bornes de la jonction varie peu, car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même. La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec l’éclairement. Il en résulte que la puissance optimale de la cellule est pratiquement proportionnelle à l’éclairement et les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

### III.2.2.1.5. Influence de la température

Pour ce modèle, nous avons simulé et déterminé les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour différentes températures, et un éclairement constant, les figures (III-10 et 11) montrent l’influence de la température sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  :

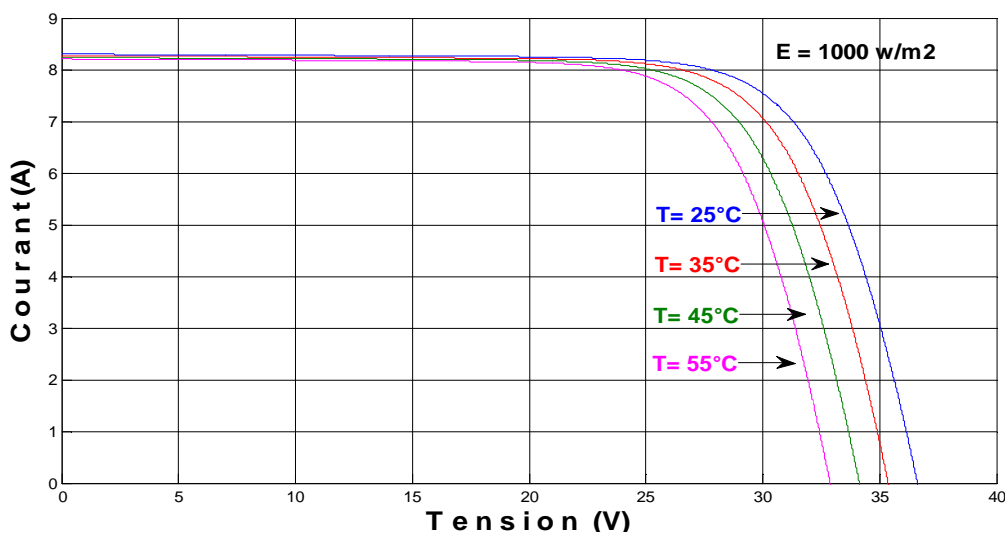


Figure (III-10): Influence de la température sur la caractéristique I(V)



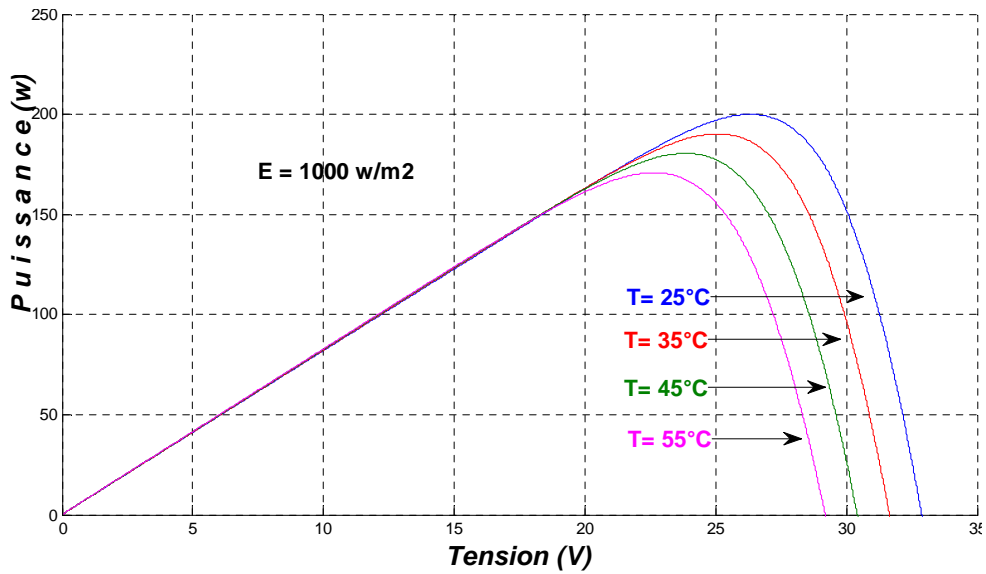


Figure (III-11): Influence de la température sur la caractéristique P(V)

En augmentant la température on s’aperçoit que la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  diminue, tandis que le courant est très peu affecté par ces variations, il en résulte que la puissance optimale de la cellule est inversement proportionnelle à la température, et que les points de puissance maximale prennent des valeurs de tension différentes.

**III.2.2.1.6. Influence simultanée de l’éclairement et de la température**

Les figures (III-12 et 13) montrent l’influence de la température et de l’éclairement sur les caractéristiques I (V) et P (V) :

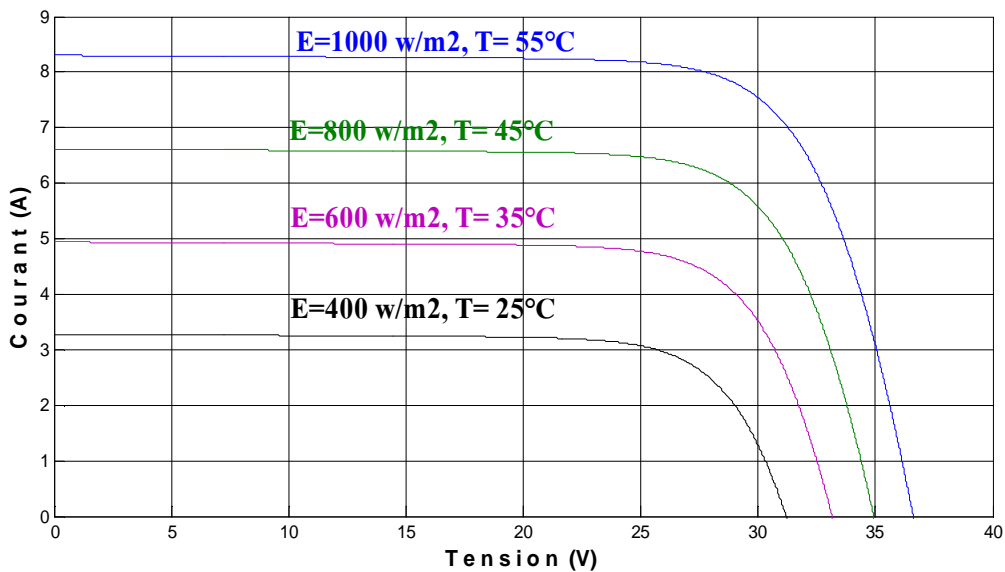
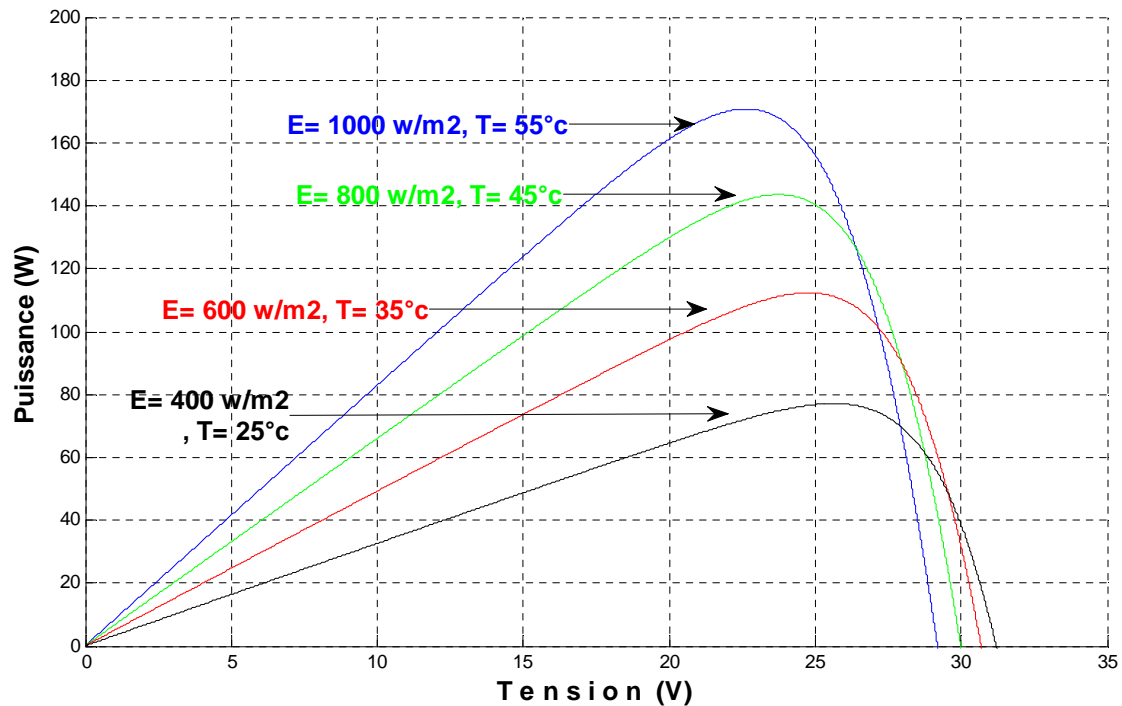


Figure (III-12): Influence simultanée de l’éclairement et la température sur la caractéristique électrique sur la caractéristique électrique I(V)



**Figure (III-13):** Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur la caractéristique électrique P(V)

L'influence simultanée de l'ensoleillement et de la température a été faite sur les bases que pour un grand ensoleillement on aura de forte température.

D'après les deux précédentes comparaisons de l'influence de l'ensoleillement et de la température on remarque dans cette étude simultanée que l'ensoleillement a beaucoup plus d'influence sur les deux caractéristiques que la température.

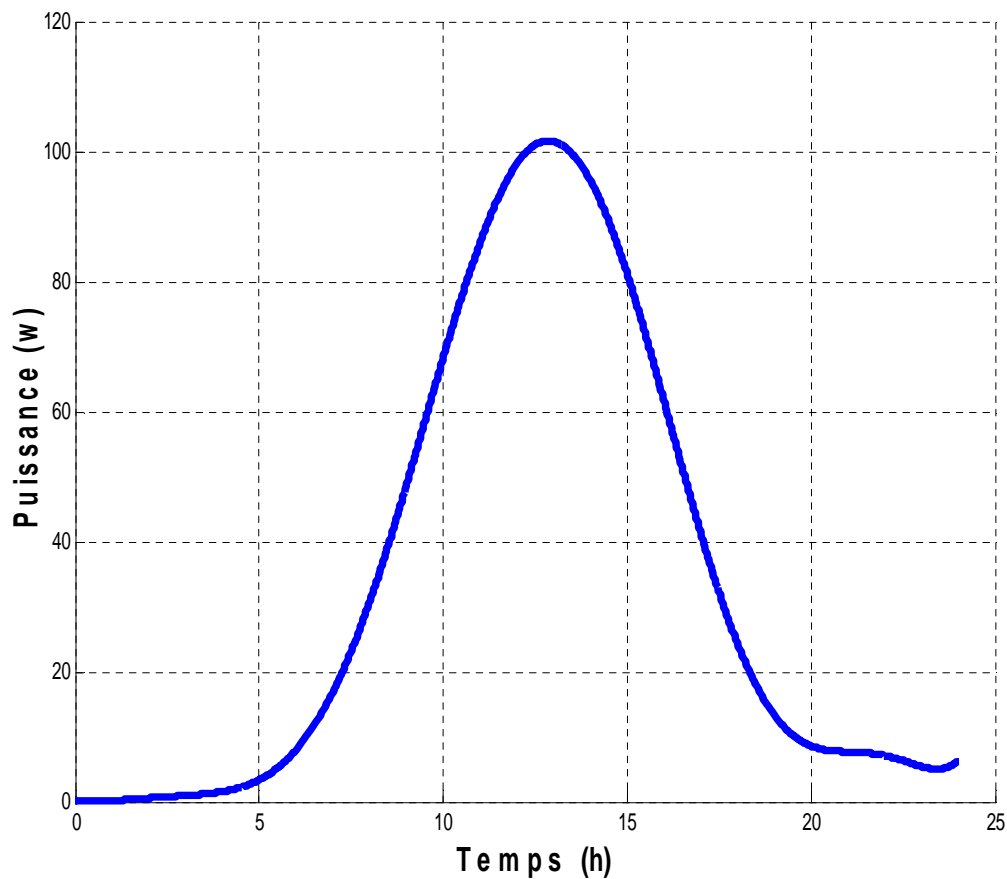
- **Remarque**

La tension de circuit-ouvert  $V_{oc}$  est sensible aux variations de température, cette dernière est inversement proportionnelle à cette tension, alors que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  dépend fortement de l'ensoleillement.

Le point de puissance optimale PPM diminue avec l'augmentation de la température, la tension de circuit-ouvert  $V_{oc}$  diminue faiblement lors de la diminution de l'ensoleillement, par contre le courant de court-circuit  $I_{cc}$  marque une forte diminution. Et le point de puissance optimal PPM chute brusquement lorsque l'éclairement diminue.

### III.2.2.1.7. Puissance du module photovoltaïque sans MPPT

On présente ci-dessous l'allure de la puissance au niveau du panneau KYOCERA KC200GT/200W, étudiée sous une variation journalière d'ensoleillement et une température constante.



**Figure (III-14) :** Courbe de puissance SMPPT pour une variation journalière d'ensoleillement

On comparant la puissance nominale du générateur photovoltaïque et la puissance obtenue sans l'insertion d'une commande de point de puissance maximale SMPPT, on constate une sous-utilisation des capacités de notre panneau, puisque la puissance générée SMPPT ( $P= 105W$ ) est inférieure à la valeur maximale ( $P= 200W$ ).

Le générateur photovoltaïque ne va pas fonctionner à son optimum, conséquence il faut insérer une commande MPPT, cette dernière adaptera notre système aux variations des paramètres d'entrées (ensoleillement, température, etc.), qui sera détaillée par la suite.

### III. 3. Optimisation de la puissance par les méthodes MPPT

On réalise le bloc de simulation sous Matlab/simulink des deux méthodes MPPT (perturbation et observation, incrémentation de conductance) dans le but de les comparer par la suite.

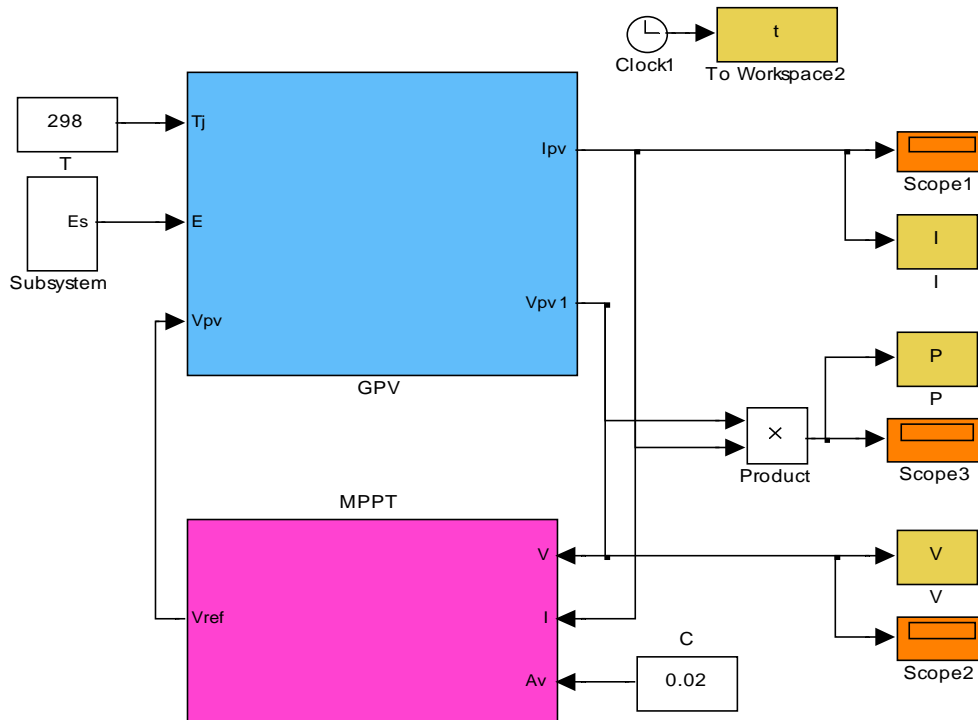


Figure (III-15) : Bloc de simulation des méthodes MPPT

### III.3.1. Optimisation de la puissance par la méthode perturbation et observation

Les graphes suivants montrent la recherche du point de puissance maximale pour une variation journalière d'ensoleillement en fonction de la tension du panneau par la méthode P&O.

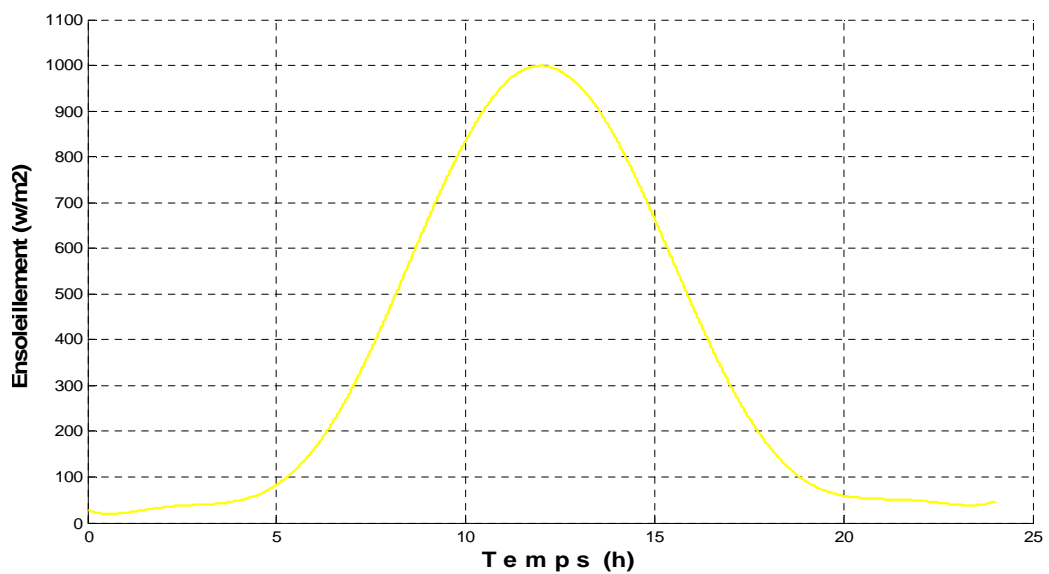


Figure (III-16) : Allure de  $E_s(t)$  réalisé par la méthode P&O

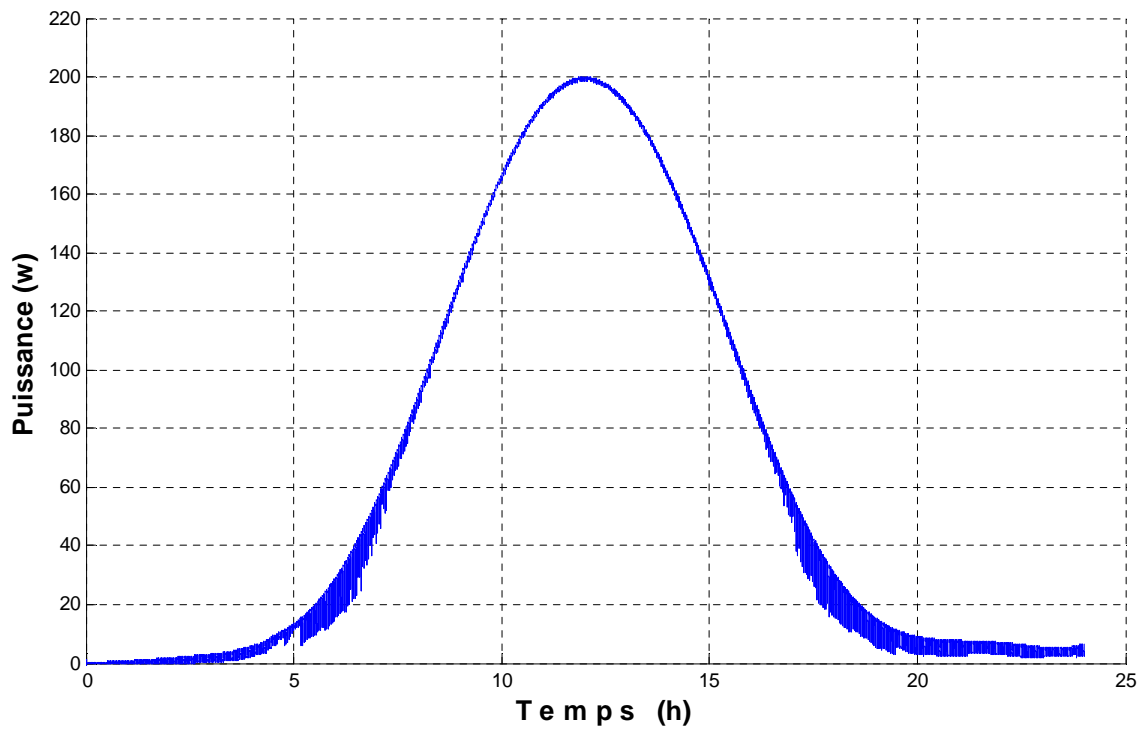


Figure (III-17) : Allure de  $P(t)$  réalisé par la méthode P&O

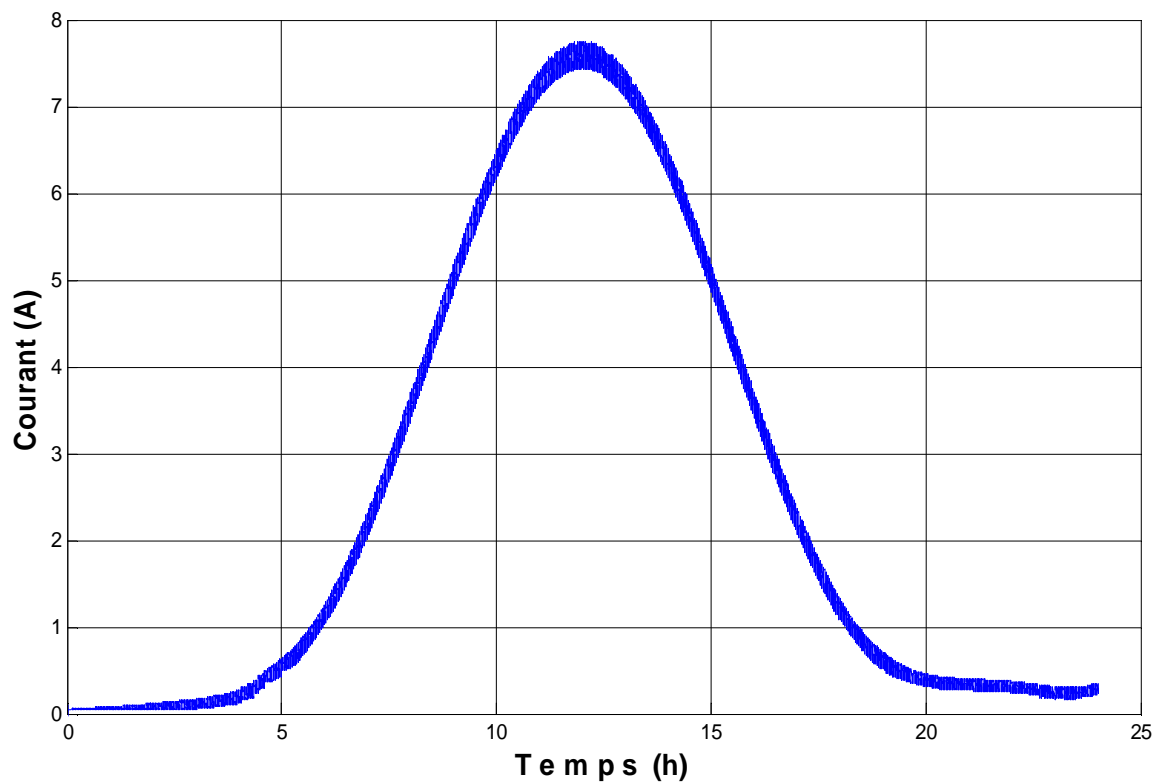


Figure (III-18) : Allure de  $I(t)$  réalisé par la méthode P&O

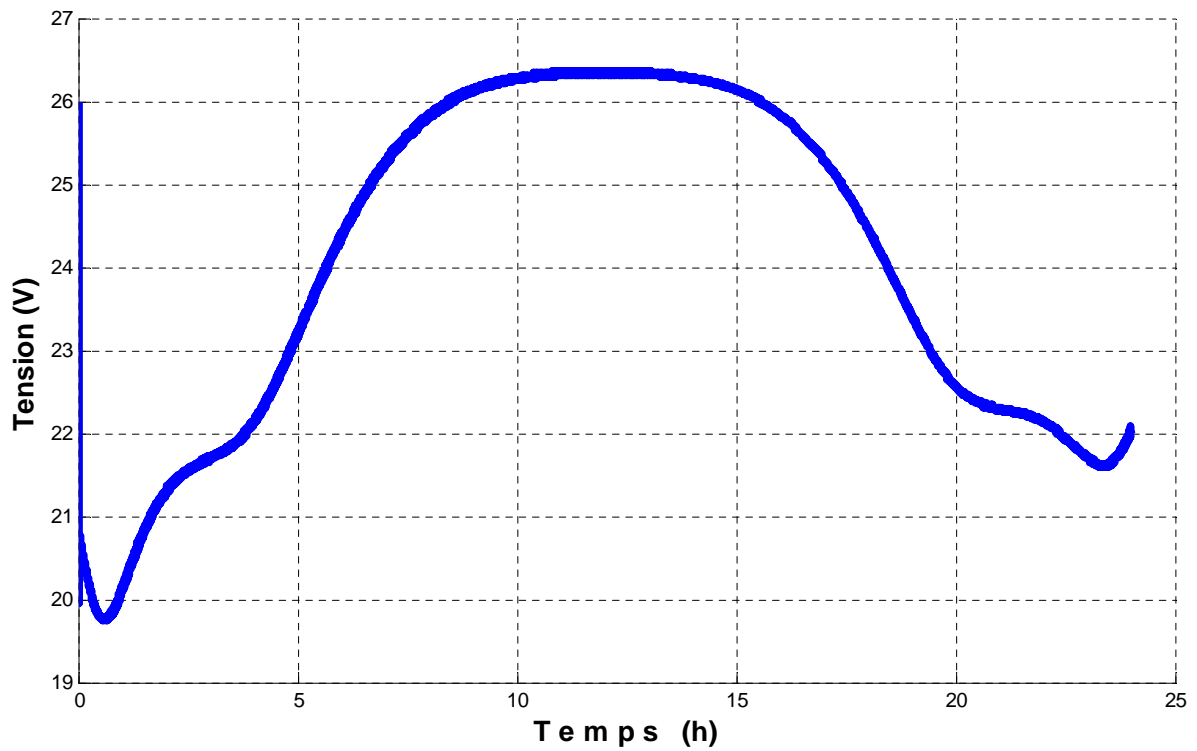


Figure (III-19) : Allure de  $V(t)$  réalisé par la méthode P&O

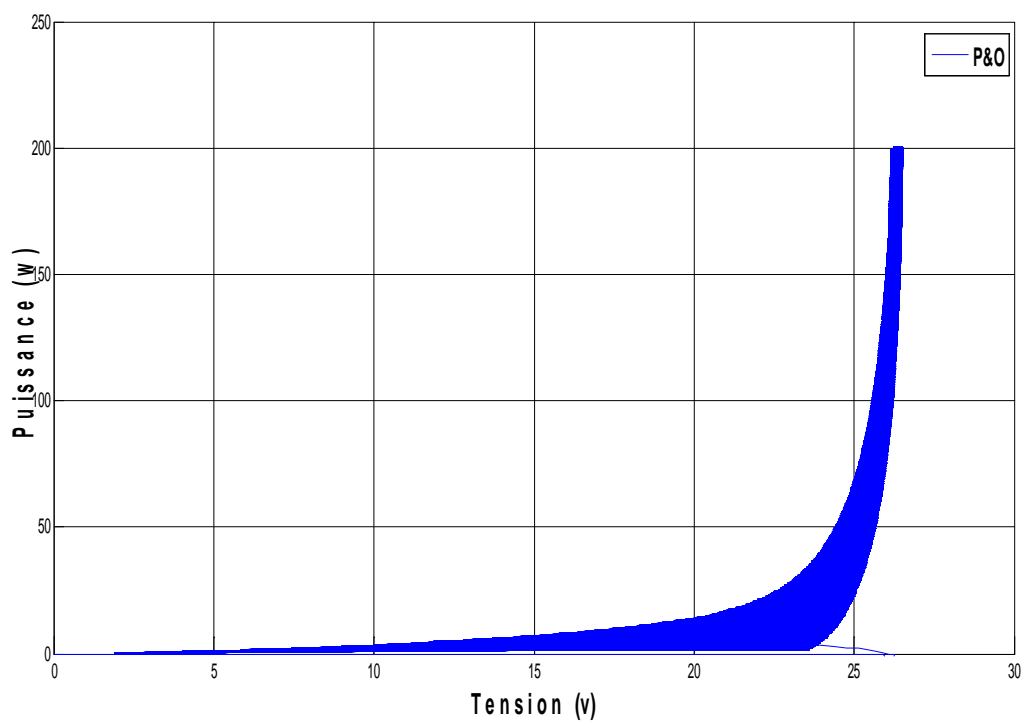


Figure (III-20) : Allure de  $P(V)$  réalisé par la méthode P&O

On remarque sur la figure (III-20) que la puissance du panneau augmente proportionnellement à l'ensoleillement jusqu'à atteindre le point PPM, puis essaye de se stabiliser sur ce point malgré la diminution de l'ensoleillement.

La recherche du point de puissance maximale par la méthode P&O présente certaines fluctuations qui retardent le système dans sa montée vers le point PPM.

### III.3.2. Optimisation de la puissance par la méthode incrémentation de conductance

On présente ci-dessous l'allure de la puissance adapté à la commande de la méthode d'incrément de Conductance au niveau du panneau :

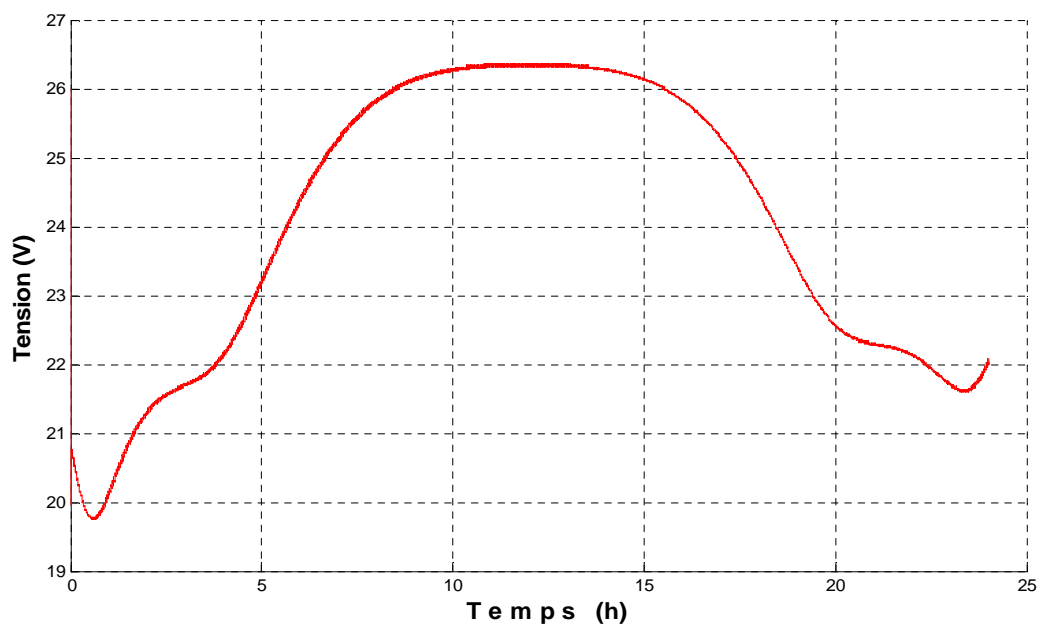
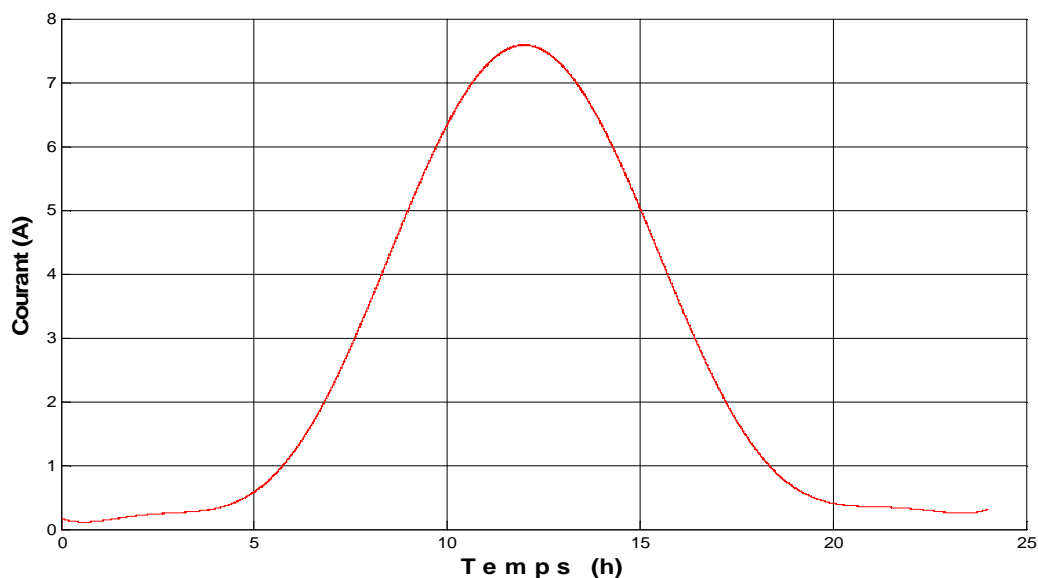
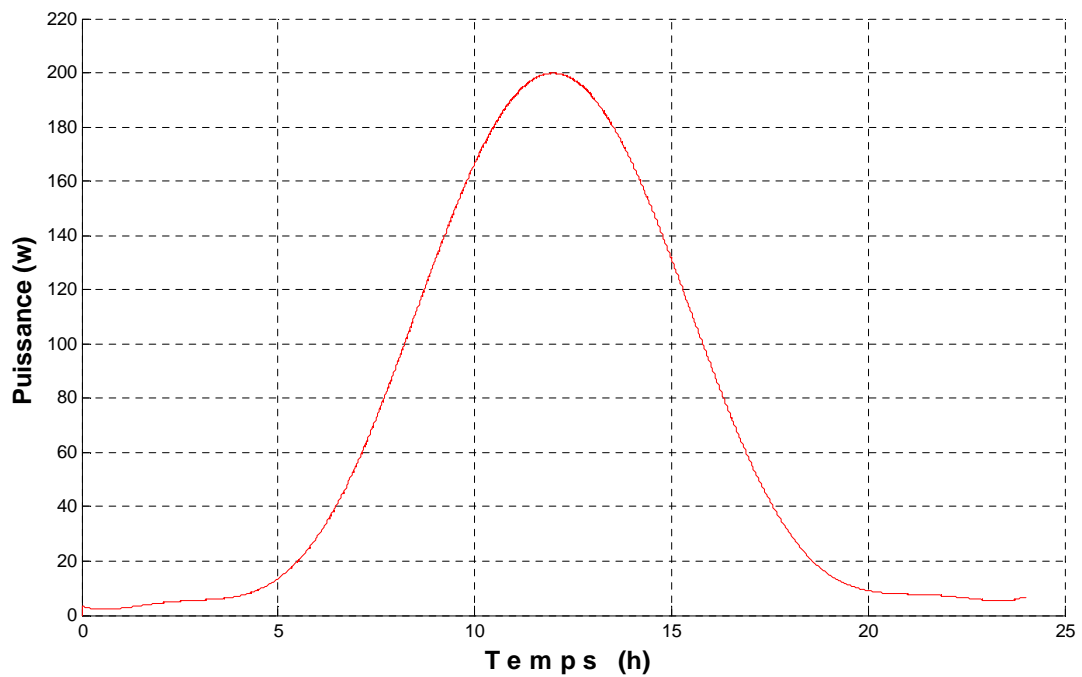
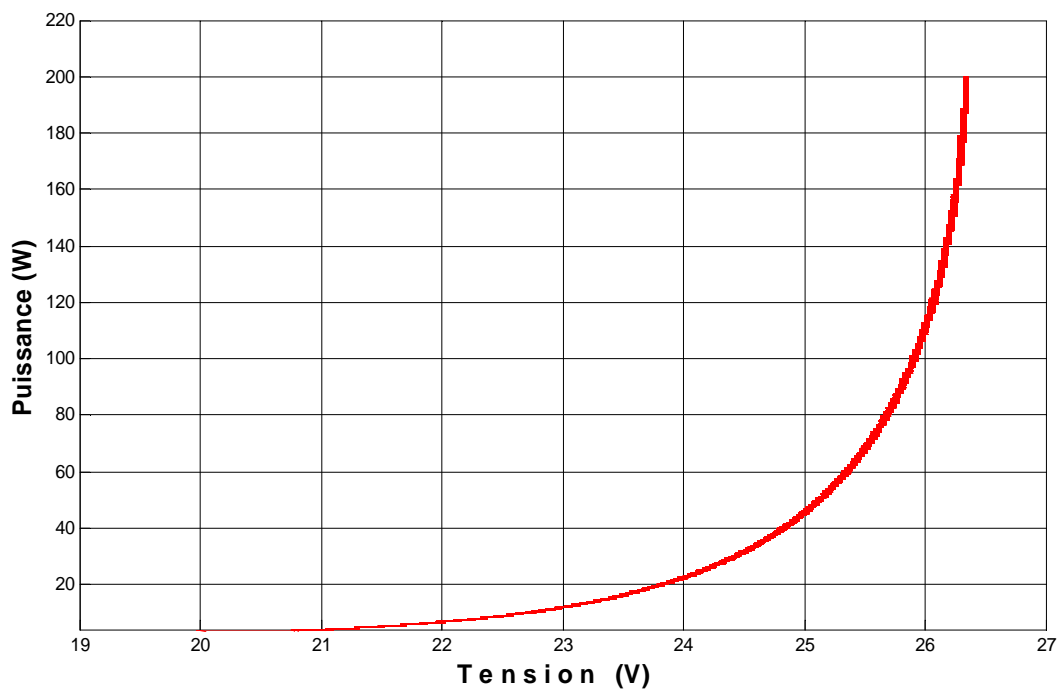


Figure (III-21) : Allure de la caractéristique  $V(t)$  réalisé par la méthode Inc-Con



**Figure (III-22) :** Allure de la caractéristique  $I(t)$  réalisé par la méthode Inc-Con**Figure (III-23) :** Allure de la caractéristique  $P(t)$  réalisé par la méthode Inc-Con**Figure (III-24) :** Allure de la caractéristique  $P(V)$  réalisé par la méthode Inc-Con

On remarque que la puissance du panneau augmente proportionnellement à l'ensoleillement jusqu'à atteindre le point PPM, ensuite se stabilise sur ce point malgré la diminution de l'ensoleillement.



Les résultats de la figure (III-24) montre clairement que la méthode d'incrémentation de la conductance atteint le MPP avec peu de fluctuation au niveau de la puissance.

### III.3.3. Comparaison entre les deux modes de fonctionnement

Il existe deux modes de fonctionnement, Modes sans MPPT et le Modes avec MPPT, ces deux dernières représentent des avantages et des inconvénients qui seront présenté comme suite :

Fonctionnement sans MPPT :

Avantages :

- Ne nécessite pas l'utilisation d'un hacheur et de savoir-faire ;
- Simplicité ;
- Le coût de réalisation est faible.

Inconvénients :

- Rendement médiocre ;
- Grand perte d'énergie.

Fonctionnement avec MPPT :

#### ➤ La méthode P&O

Avantage :

- Simplicité ;
- Atteigne le MPP.

Inconvénients :

- Faible rendement pour les petites valeurs d'ensoleillement ;
- Un mauvais temps de réponse.

#### ➤ La méthode In-Cd

Avantage :

- Atteigne le MPP.

Inconvénients :

- faible rendement pour les petites valeurs d'ensoleillement ;
- un mauvais temps de réponse.

### **III.4.Conclusion**

Dans ce chapitre, on a fait une étude comparative entre deux méthodes MPPT, à partir des résultats obtenus on conclue que les deux méthodes sont presque semblables, qui sont non négligeable comparé au fonctionnement sans MPPT.

L'efficacité de ces méthodes étudiées, nous a permis de faire fonctionner notre panneau à son optimum, mais avec un temps de réponse trop long et un pas de régulation fixe qui n'est pas pratique vu que les conditions extérieures sont aléatoires (ensoleillement, température), alors pour améliorer la réponse de notre système on fera appel à la logique flous qui fera l'objet de notre étude dans le quatrième chapitre en l'appliquons sur une charge résistive.

***Chapitre IV :***  
***Optimisation de puissance par***  
***logique floue en***  
***fonctionnement autonome***

## IV.1. Introduction

Afin d'aboutir à un fonctionnement économique et rentable. Pour cela, nous devons utiliser le générateur PV dans la zone optimale. Le but de ce chapitre est de faire fonctionner une charge résistive au fil de soleil. A cet effet, l'alimentation de la charge par un générateur photovoltaïque via un hacheur est complétée par l'intégration d'un dispositif de suivi de la puissance maximale.

## IV.2. Configuration du système étudié

La figure (IV-1) représente le schéma synoptique d'un système photovoltaïque alimentant une charge résistive.

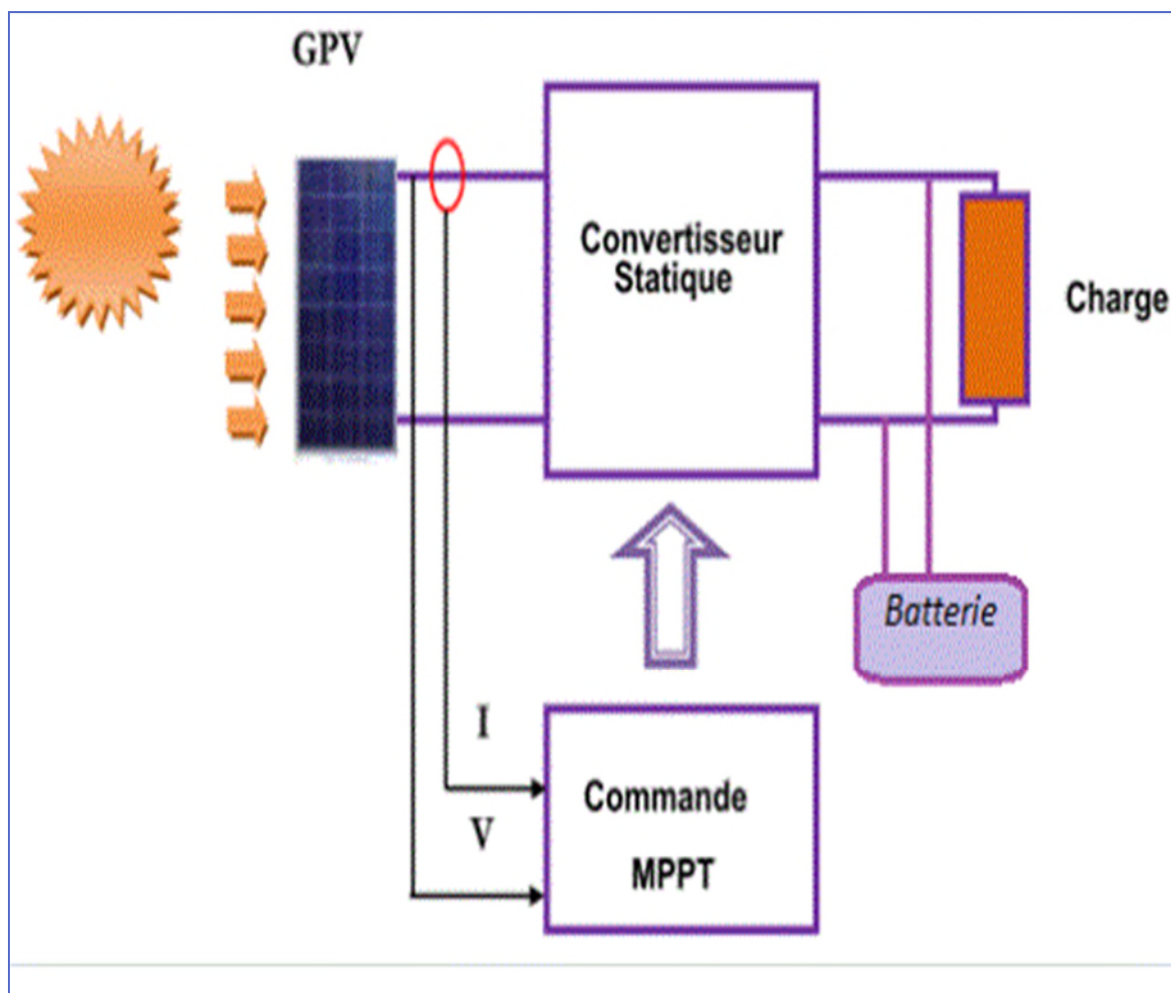


Figure (IV-1): Schéma synoptique du système étudié

### IV.3. Caractéristiques du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est constitué de quinze (15) panneaux en tout, branchés comme suit : Cinq branches en parallèle, chaque branche possède trois panneaux en série, pour donner à la sortie une puissance total de 3kW, un courant de 40A, et une tension de 88V, on présente ci-dessous la figure (IV-2) et la figure (IV-3), les allures  $I(V)$  et  $P(V)$  respectivement pour un éclairement variable et une température constante :

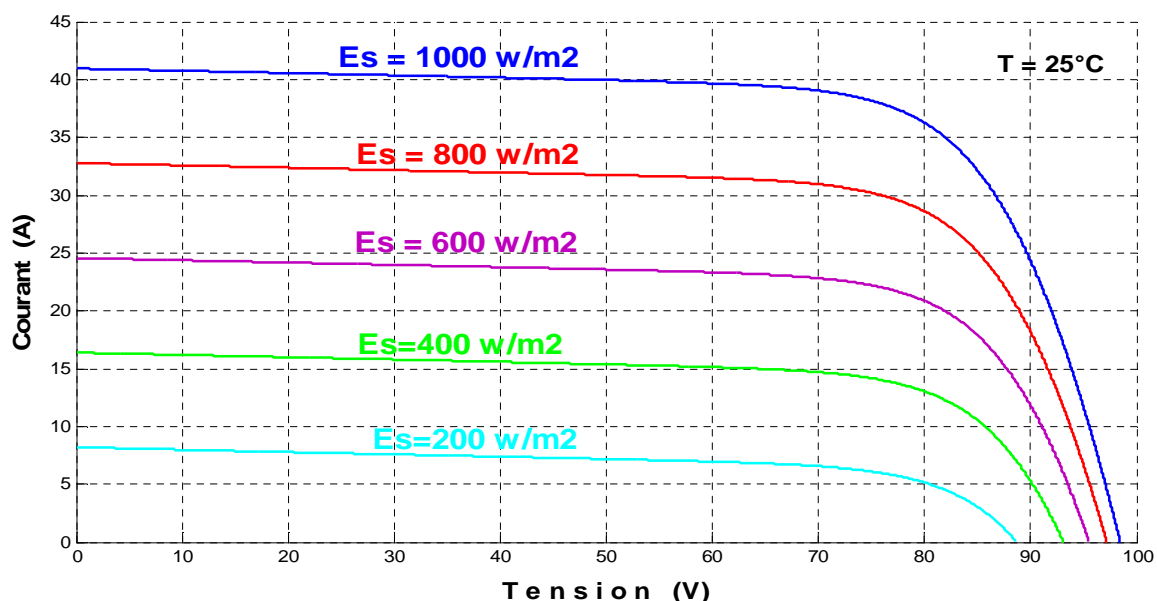


Figure (IV-2): Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique  $I(V)$

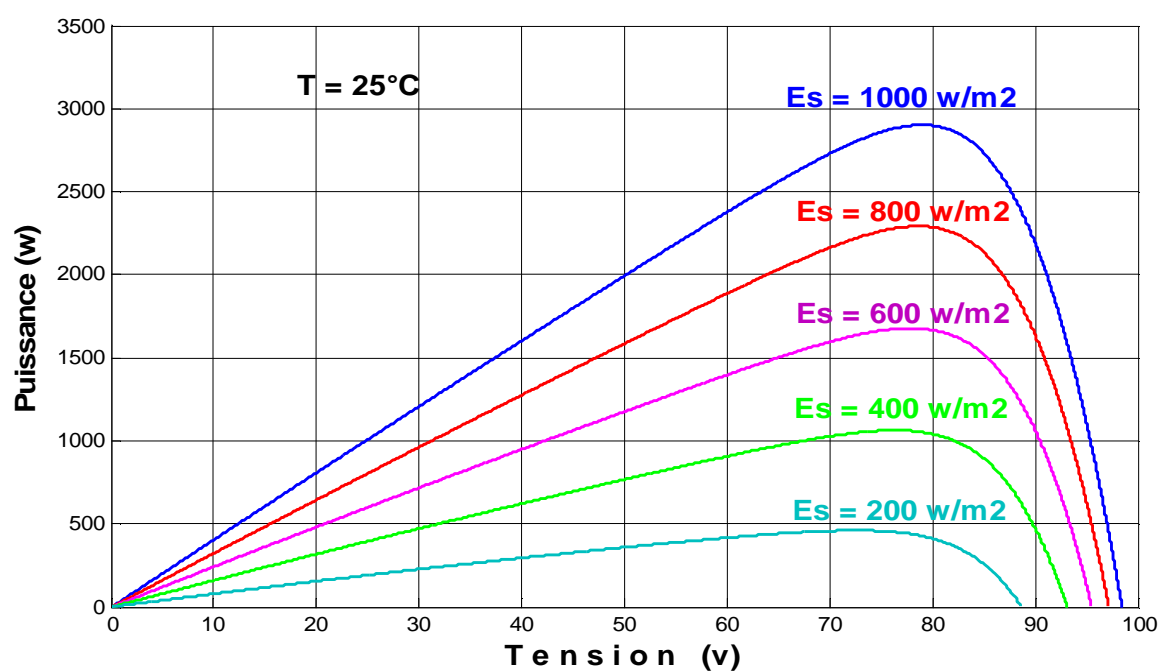


Figure (IV-3): Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique  $P(V)$

### ➤ Interprétation des résultats

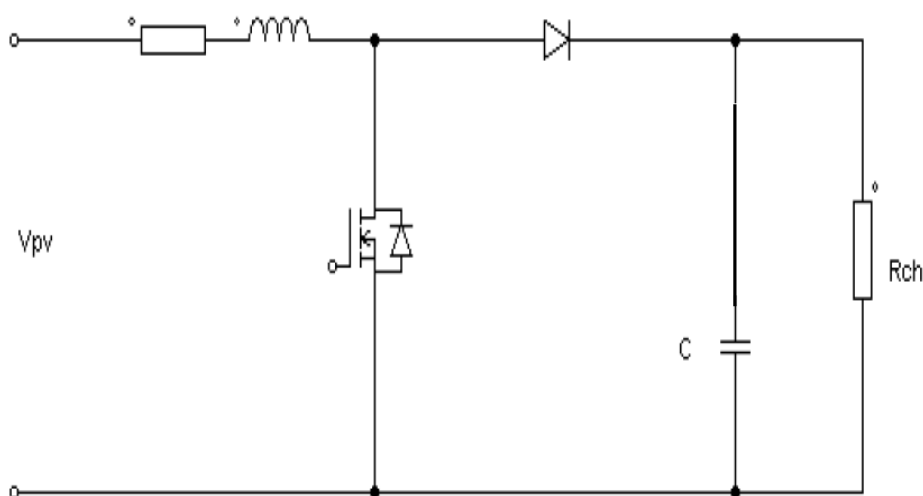
Le courant produit par le générateur GPV est pratiquement proportionnel à l'ensoleillement solaire  $E$ . Par contre, la tension  $V$  aux bornes de GPV varie peu, la tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec l'éclairement.

Il en résulte que la puissance optimale du GPV est pratiquement proportionnelle à l'éclairement et les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

### IV.4. Modélisations du hacheur :

Régulateur MPPT « Maximum Power Point Tracking », suivi de point de puissance maximale, c'est une commande qui cherche à obliger le panneau PV à fonctionner dans sa puissance optimale et cela en lui imposant une tension optimale via un hacheur survolteur.

Ce type sert à produire une tension plus élevée que celle fournie par les panneaux ou les batteries de stockage, leur réalisation est basée sur un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (MOSFET, IGBT, Bipolaire, etc.) et une diode [30].



**Figure (IV-4):** Schéma électrique équivalent d'un hacheur parallèle (boost)

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de  $0$  à  $\alpha T$ , l'interrupteur commandé est fermé (passant). Cette fois, la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée. Lors de la seconde partie du cycle, de  $\alpha T$  à  $T$ , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante [30].

Alors les relations électriques entre les grandeurs d'entrée du convertisseur (correspondant à  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  du générateur) et de sortie du convertisseur (respectivement  $I_{ch}$  et  $V_{ch}$ ) ne dépendent que du rapport cyclique  $\alpha$  et peuvent ainsi s'exprimer par les relations suivantes:

$$V_{pv} - R_L I_L - \frac{L dI_L}{dt} - \alpha V_{pv} = 0 \quad (IV-1)$$

$$(1-\alpha) I_L = \frac{C dV_{ch}}{dt} + \frac{V_{ch}}{R_{ch}} \quad (IV-2)$$

$$\frac{L dI_L}{dt} = V_{pv} - \alpha V_{ch} - R_L I_L \quad (IV-3)$$

$$\frac{C dV_{ch}}{dt} = (1-\alpha) I_L - \frac{V_{ch}}{R_{ch}} \quad (IV-4)$$

$$I_L = \int \frac{1}{L} (-V_{pv} - \alpha V_{ch} - R_L I_L) dt \quad (IV-5)$$

$$V_{pv} = \frac{1}{C} \int \left( (1-\alpha) I_L - \frac{V_{ch}}{R_{ch}} \right) dt \quad (IV-6)$$

## IV.5. Batterie

La batterie utilisée sous Matlab/simulink possède les caractéristiques suivantes :

Tension nominale  $V_n = 400 V$

Capacité nominale  $C_n = 100 Ah$

Capacité maximale  $C_{max} = 104,1667 Ah$

Etat de décharge initiale  $DOD = 60\%$

Courant nominal de décharge  $I_{nd} = 20 A$

Résistance interne  $R = 0,04 (\Omega)$

## IV.6. Charge

La charge est une résistance qui possède les caractéristiques suivantes :

Puissance nominale  $P_n = 2 kW$

Résistance  $R = 80 (\Omega)$

## IV.7. Simulation du système par la logique floue

### IV.7.1. Fuzzification

On suppose que le contrôle se fait par la satisfaction de deux critères relative à deux variables d'entrées du contrôleur flou proposé, qui sont: L'erreur (ER) et le changement de l'erreur (CER) à des instants échantillonnés (k).

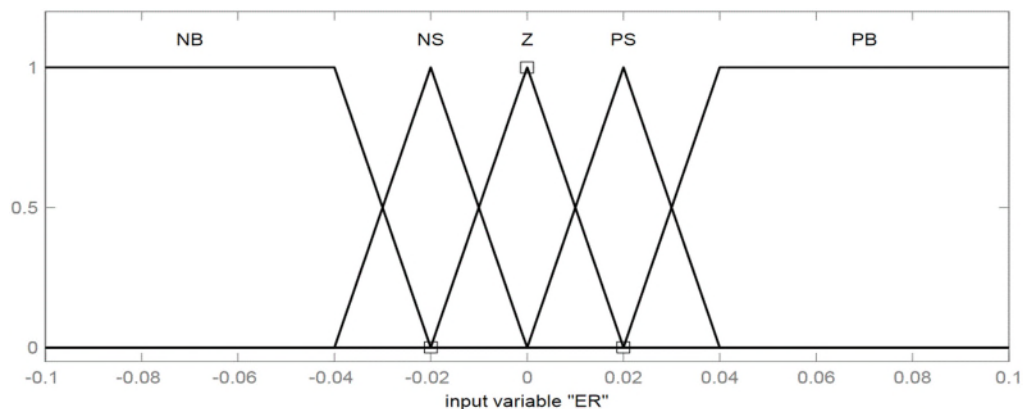
Les variables ER et CER sont exprimées comme suit:

$$ER(k) = \frac{P_{ph}(k) - P_{ph}(k-1)}{I_{ph}(k) - I_{ph}(k-1)} \quad (IV-7)$$

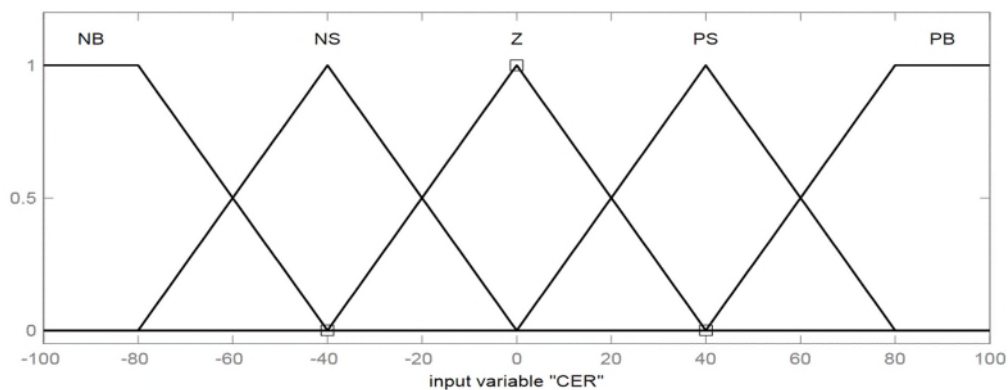
$$CER(k) = ER(k) - ER(k - 1) \quad (IV-8)$$

On donne :

NB (négatif grand), NS (négatif petit), Z (zéro), PS (positif petit), PB (positif grand)

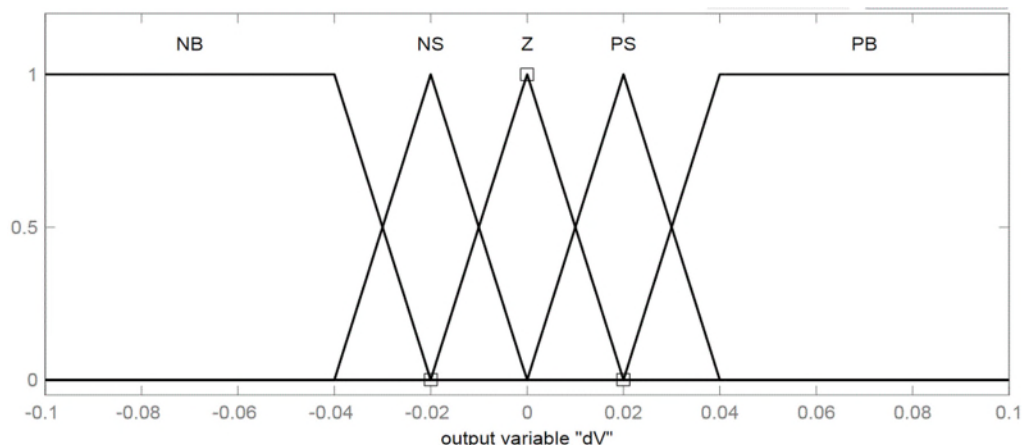


(a)



(b)





(c)

Figure (IV-5) : Fonctions d'appartenances de (a) L'entrée ER ; (b) L'entrée CER et (c) La sortie  $d\alpha$

### IV.7.2. Inférence

Le tableau (IV-1), montre la table de règles du contrôleur flou où toutes les entrées de la matrice sont :

Tableau (IV-1) : Table des règles floues

$d\alpha$	CER					
		NB	NS	ZE	PS	PB
ER						
NB		Z	Z	NB	NB	NB
NS		Z	Z	NS	NS	NS
ZE		NS	Z	Z	Z	PS
PS		PS	PS	PS	Z	Z
PB		PB	PB	PB	Z	Z

### IV.7.3. Déffuzification

Pour une représentation de données échantillonnées, le centre de gravité est calculé par :

$$S_{CG} = \frac{\sum (\mu_i x_i)}{\sum \mu_i} \quad (IV-9)$$

Tels que  $X_i$  et  $\mu_i$  sont les éléments de l'ensemble floue et leurs degrés d'appartenance respectivement.

Les valeurs de sorties sont déffuzzifiées et multipliées par le facteur d'échelle pour construire le signal de contrôle. Son rôle est de régler le contrôleur flou pour obtenir la poursuite du PPM [28].

### IV.8. Résultats de simulation

La figure (IV-6) illustre le schéma bloc sous MATLAB/ SIMULINK du système globale à étudier (GPV, MPPT, hacheur boost, charge).

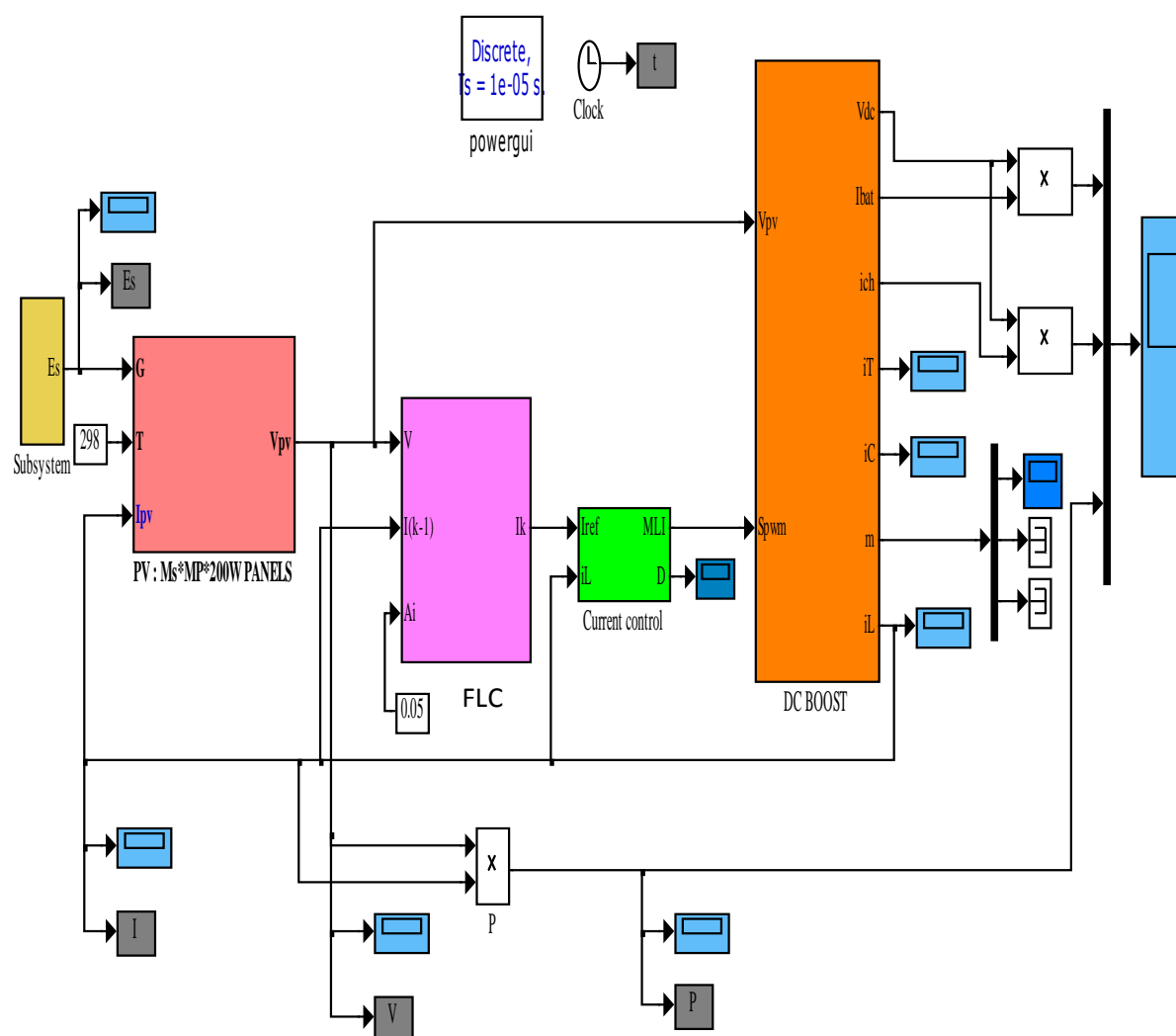


Figure (IV-6): Schéma bloc sous Matlab/simulink du Système globale

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « logique floue » sous un éclairage variable et température constante sont représentés sur les figures (IV-7,...,18) :

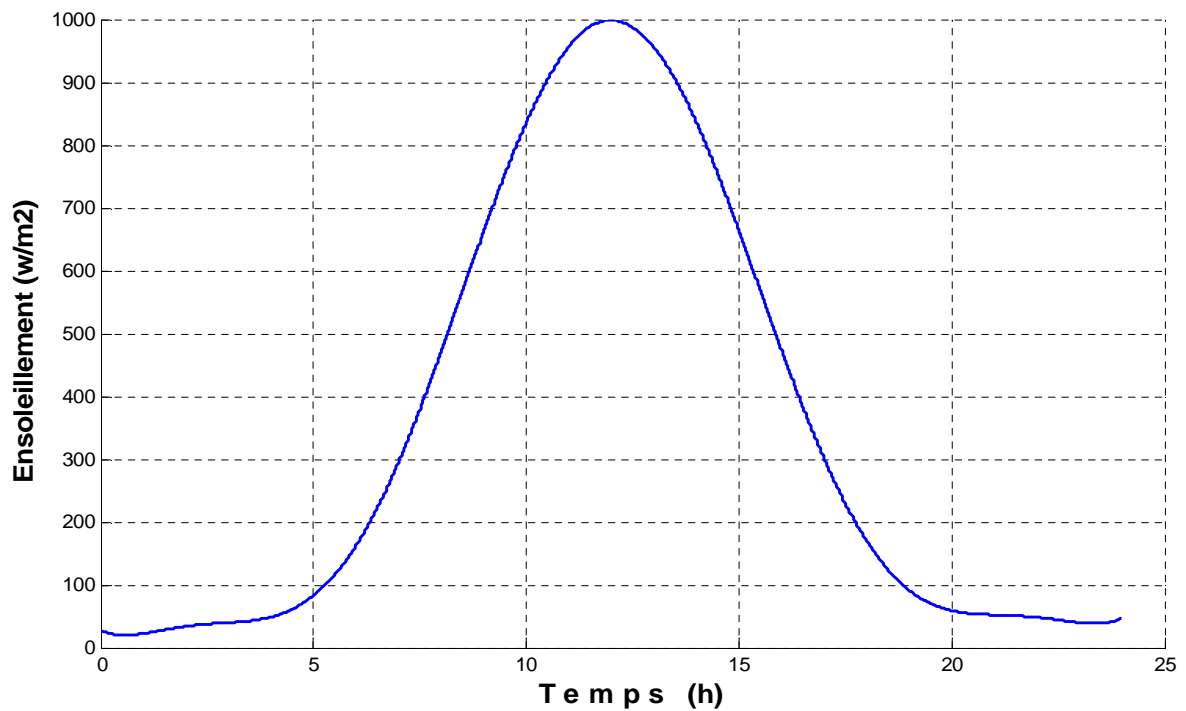


Figure (IV-7) : Profils typique d'ensoleillement au fil du temps

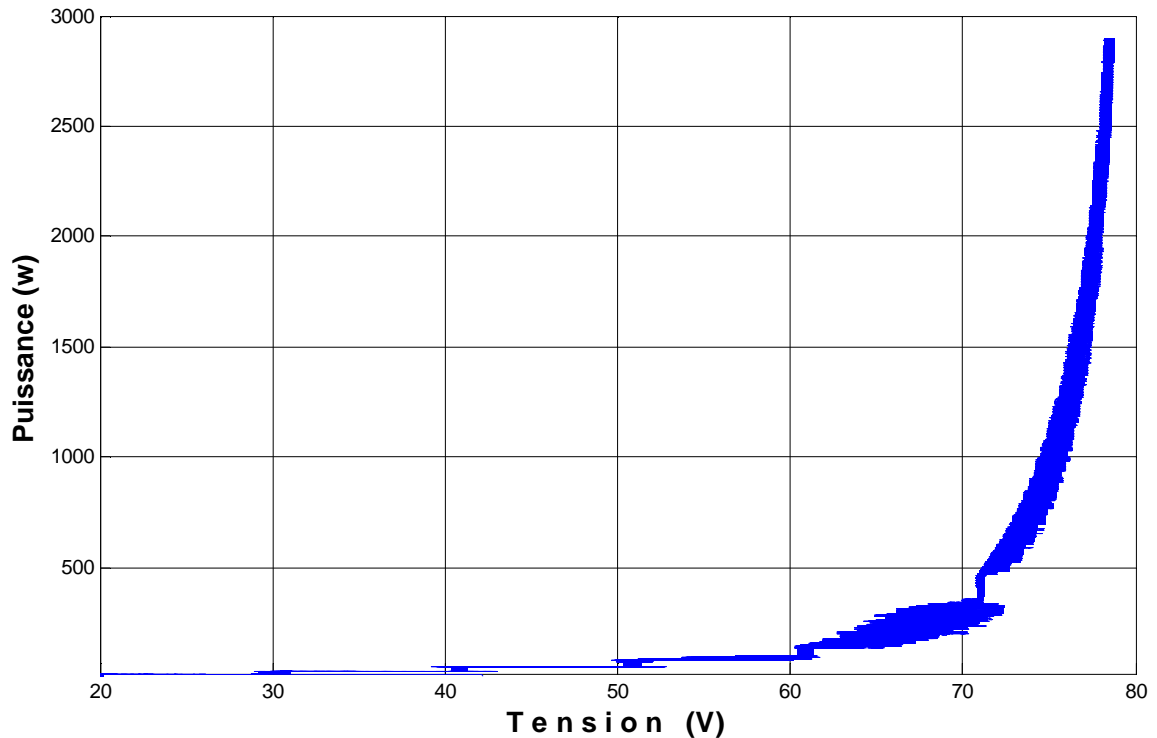


Figure (IV-8) : Courbe de la puissance  $p(v)$  avec la méthode FLC pour un profil typique d'ensoleillement

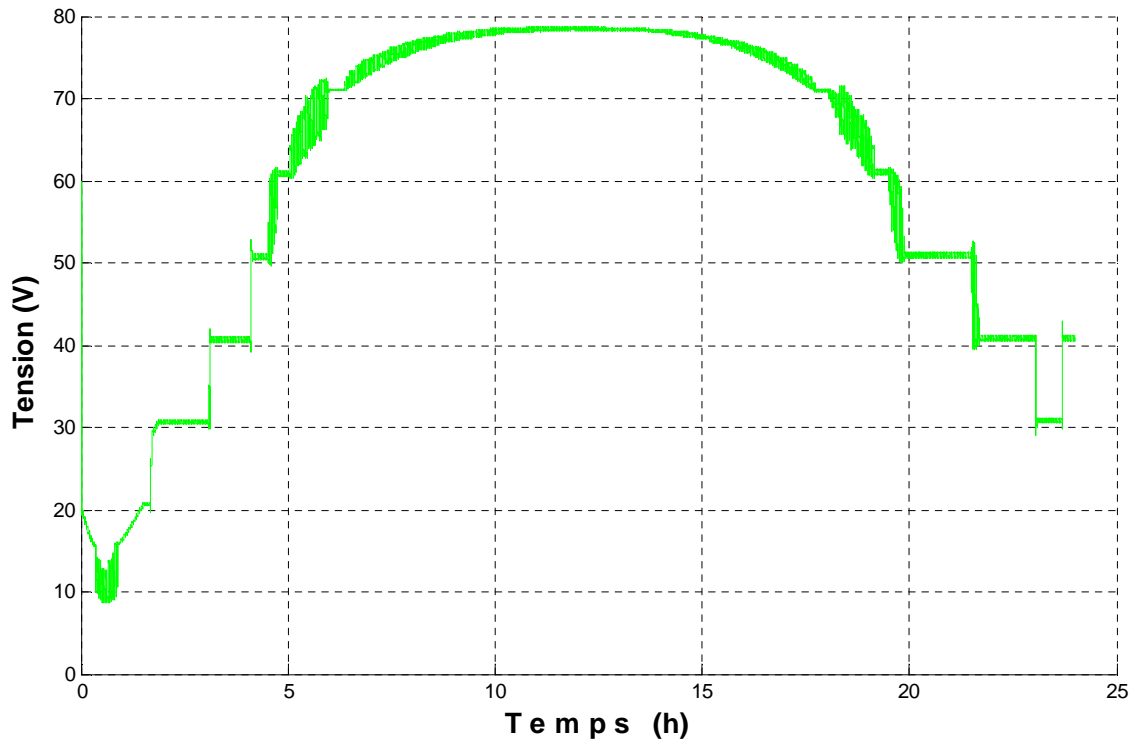


Figure (IV-9) : Courbe V(t) de générateur GPV

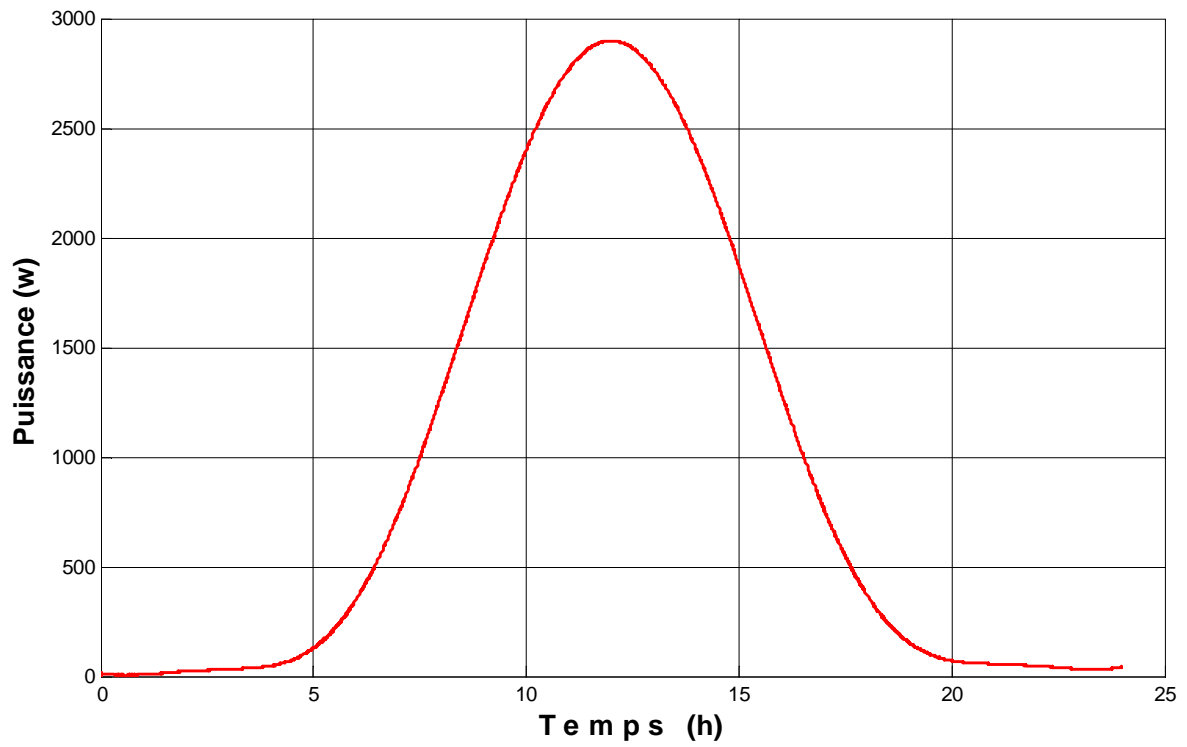


Figure (IV-10) : Courbe P(t) de générateur GPV

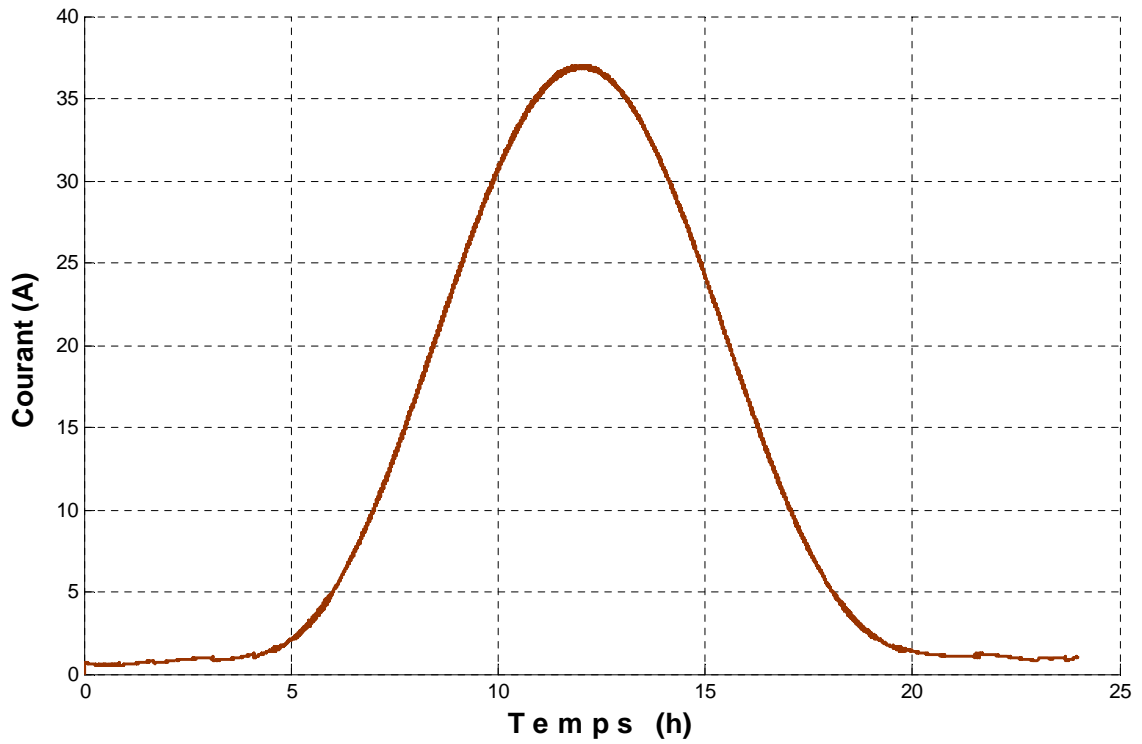


Figure (IV-11) : Courbe  $I(t)$  de générateur GPV

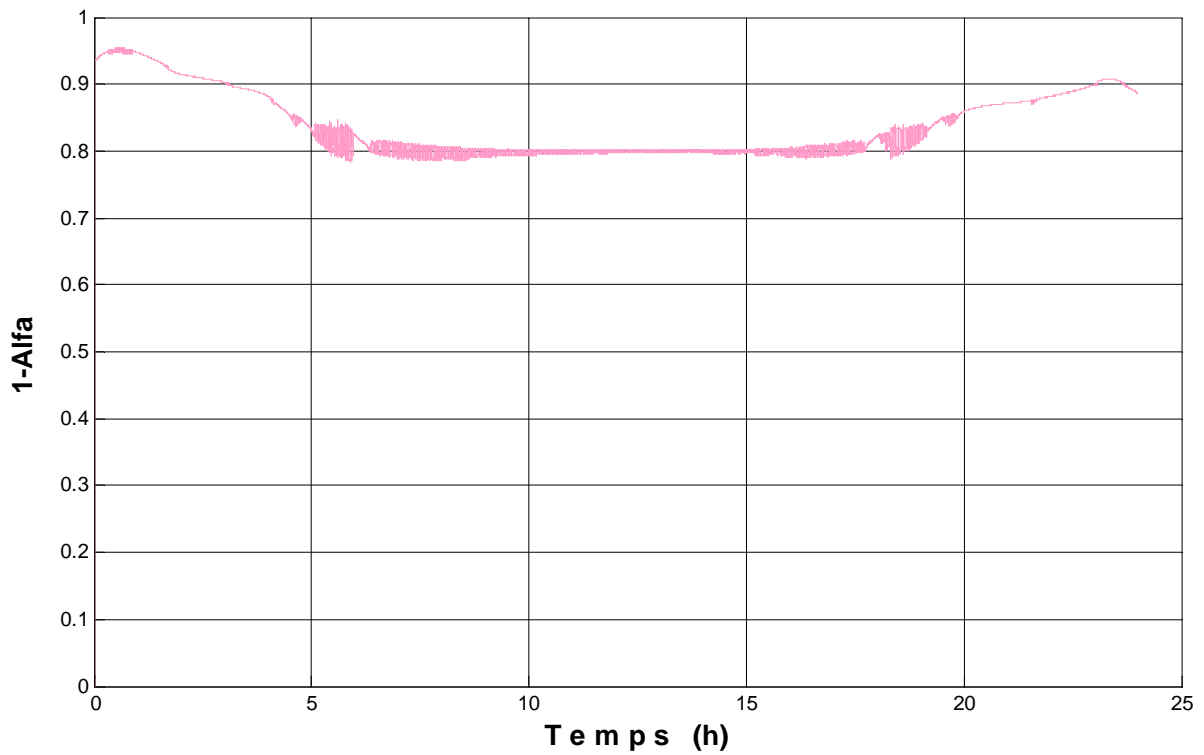


Figure (IV-12) : Courbe  $1-\alpha(t)$  a la sortie de MPPT

Simulation sous Matlab/simulink du signal commande hacheur boost :

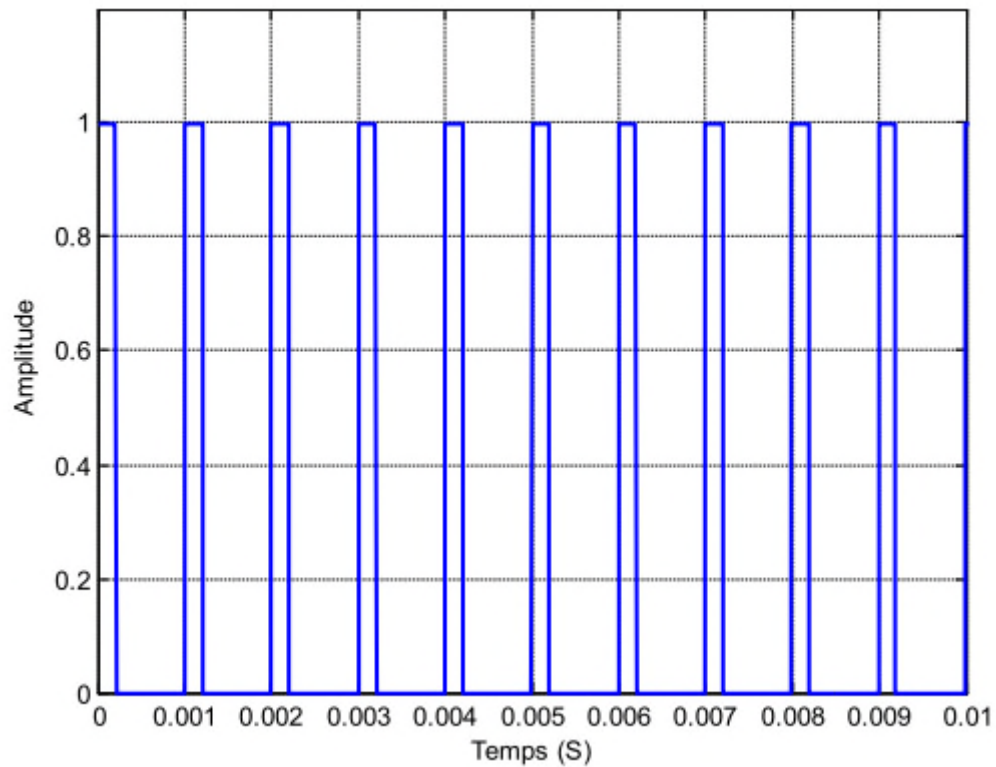


Figure (IV-13) : Signal commande DC/DC (gachette-d'hacheur)

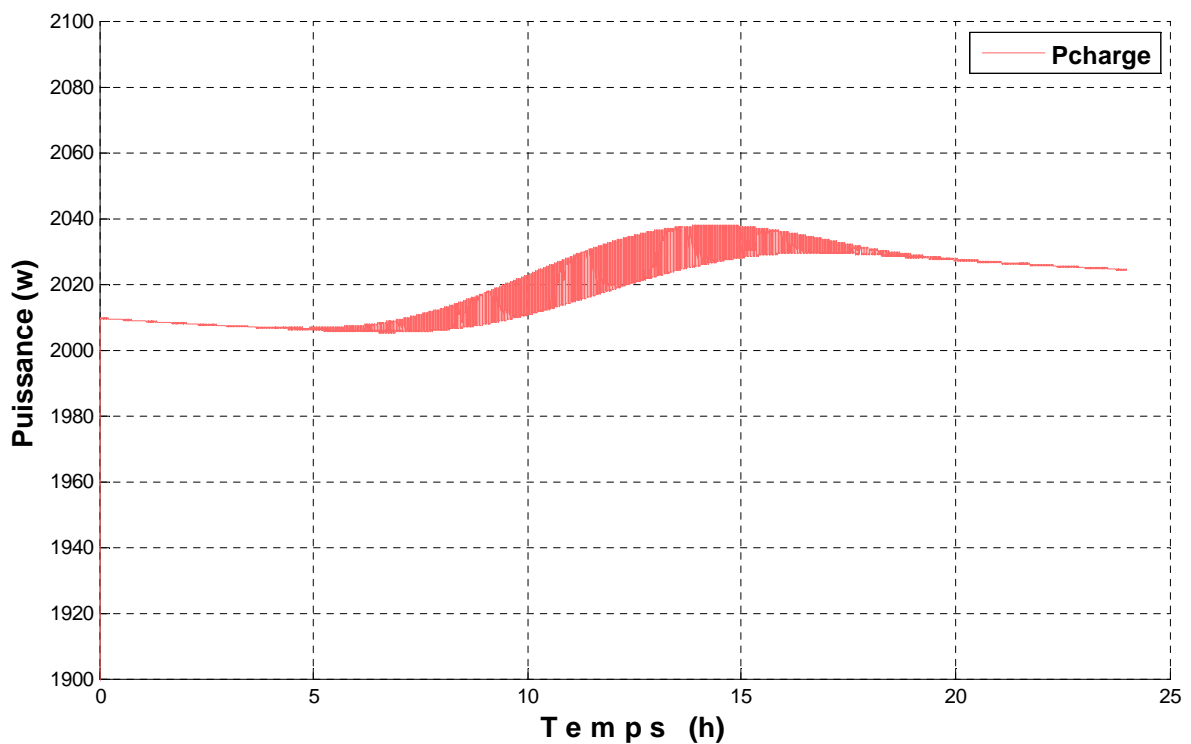


Figure (IV-14) : Courbe P(V) aux bornes de la charge

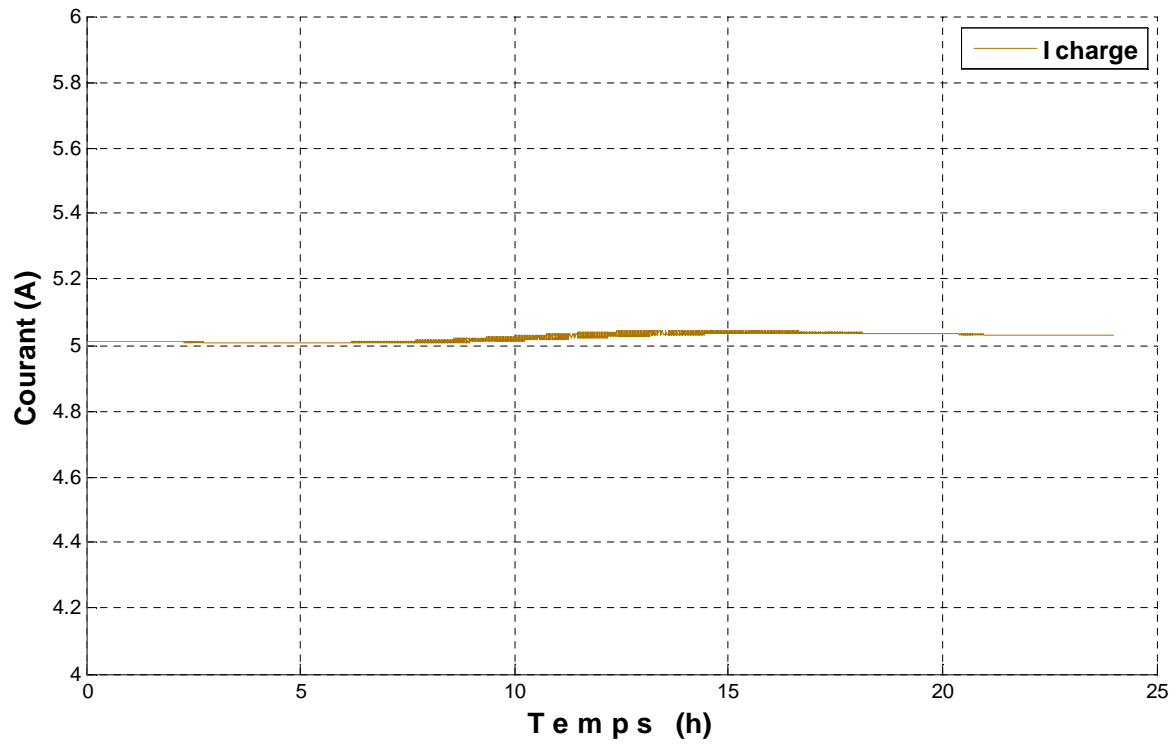


Figure (IV-15) : Courbe  $I(t)$  aux bornes de la charge

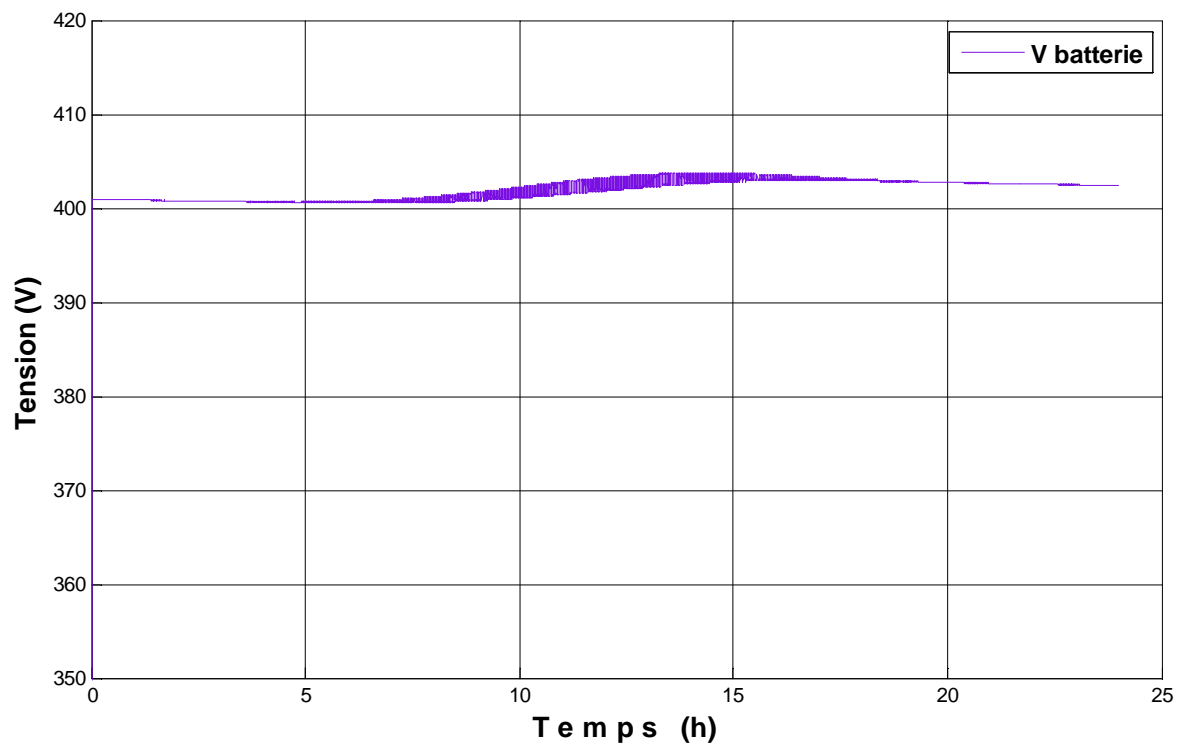


Figure (IV-16) : Courbe  $V(t)$  de la batterie

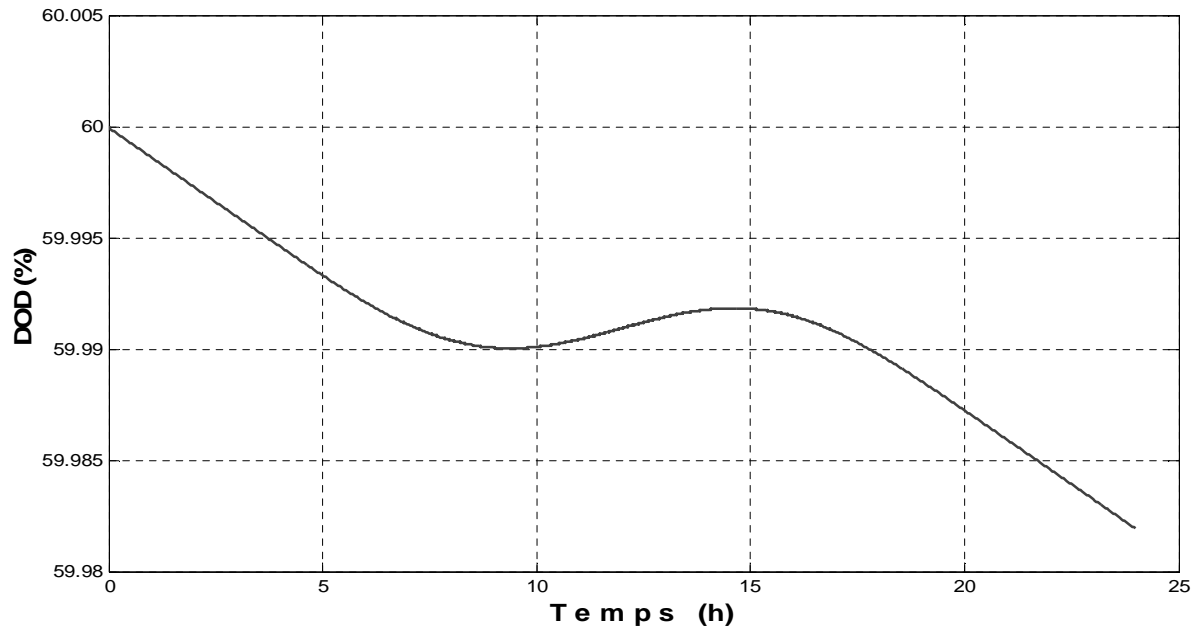


Figure (IV-17) : Etat de décharge de la batterie

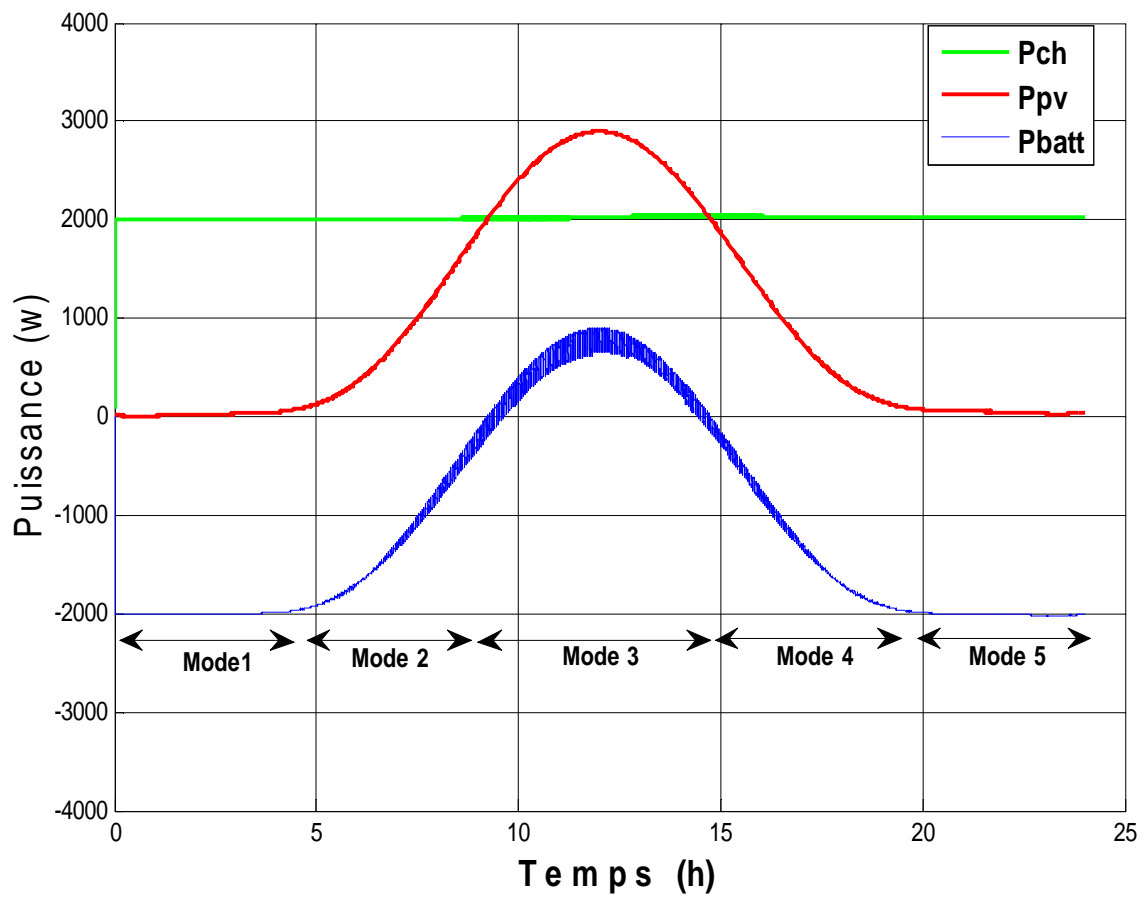


Figure (IV-18) : Simulation sous Matlab/simulink des puissances du système global



➤ **Interprétation des résultats**

• **Mode 1 :**

Ce mode correspond aux périodes où la puissance photovoltaïque est insuffisante pour satisfaire la demande de la charge.

Cependant, et la batterie qui est en charge va fournir la puissance total demandée par la charge pendant que le système photovoltaïque est inactif à cause de l'obscurité et du manque d'ensoleillement.

Cette situation est maintenue tant que le générateur ne fournit pas la puissance et que l'ensoleillement est quasi nul ne, au-delà de cette limite on bascule au mode(2) pour soulager la batterie et générateur photovoltaïque prendra la relève progressivement au fil du soleil.

• **Mode 2 :**

Le système photovoltaïque augmente sa production jusqu'à atteindre le maximum de puissance demandé par la charge et la batterie réduit de moins au moins la puissance qu'elle fournit a la charge pour ne rien fournir au bout d'un moment.

Une fois la limite demandée par la charge est atteinte, on aura un excès de production du système photovoltaïque qui entre en mode de fonctionnement 3 (mode 3).

• **Mode 3 :**

Le générateur atteindra son maximum de puissance au milieu de la journée, qui va baisser au fil du temps, ce qui implique une diminution de la puissance de recharge des batteries.

Il est à noter qu'en ce mode 3 les batteries ne seront pas sollicitées pour fournir de la puissance à la charge, car elles passeront en mode recharge à partir de l'excès de puissance produite par le générateur, et dont le but est son utilisation aux différents modes (1,2, 4,5).

• **Mode 4 :**

Dans ce mode le système photovoltaïque diminue sa production progressivement au fil du temps et la puissance est presque nulle en fin de journée (19h). Tandis que les batteries changeront de phase pour passer à la décharge et fournir en coordination avec système la puissance dont la charge a besoin.

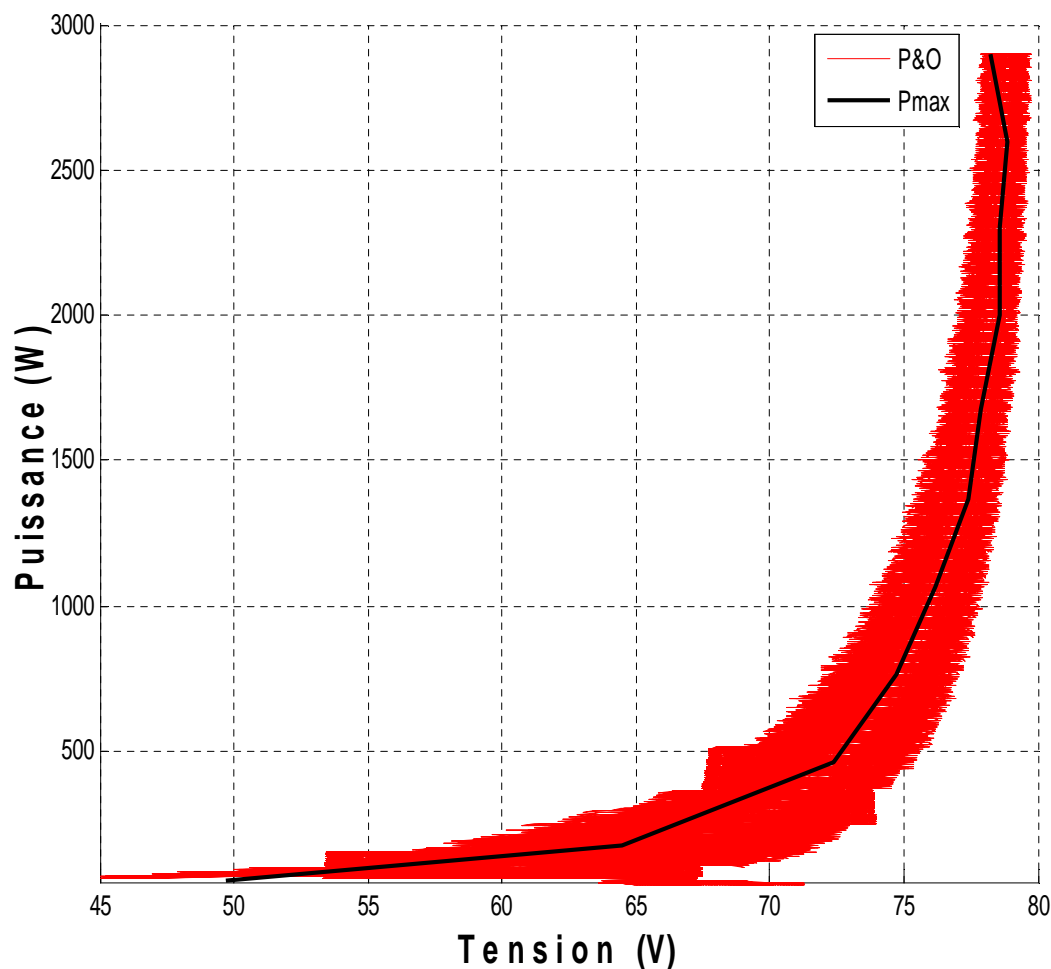
- **Mode 5 :**

La totalité de la puissance consommée par la charge est fournie par les batteries initialement chargée au mode 3. Alors que le panneau photovoltaïque ne cesse de générer de la puissance en raison du manque d'ensoleillement et de l'obscurité.

Ces résultats montrent que le hacheur survolteur et la commande MPPT « FLC » effectuent correctement leurs rôles.

### IV.9. Comparaison entre les trois méthodes

On donne la simulation des différentes méthodes pour différents ensoleillements :



**Figure (III-19):** Courbe P(V) par la méthode P&O pour un profil typique d'ensoleillement

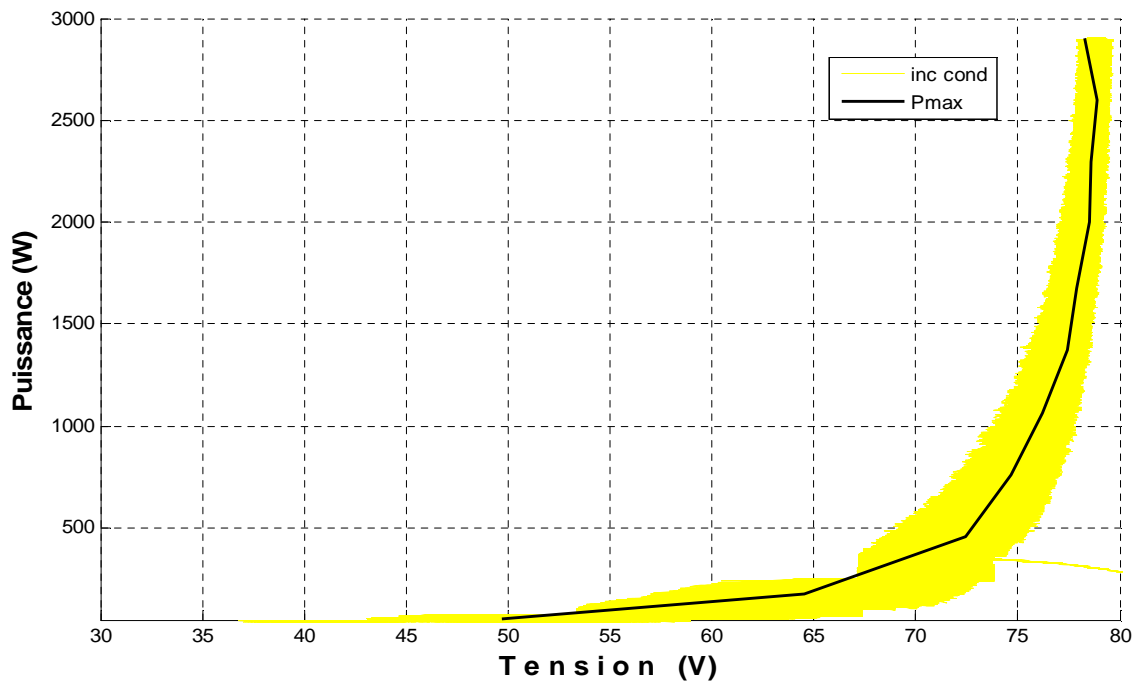


Figure (III-20): Courbe P(V) par la méthode d'incrémentation de conductance pour un profil typique d'ensoleillement

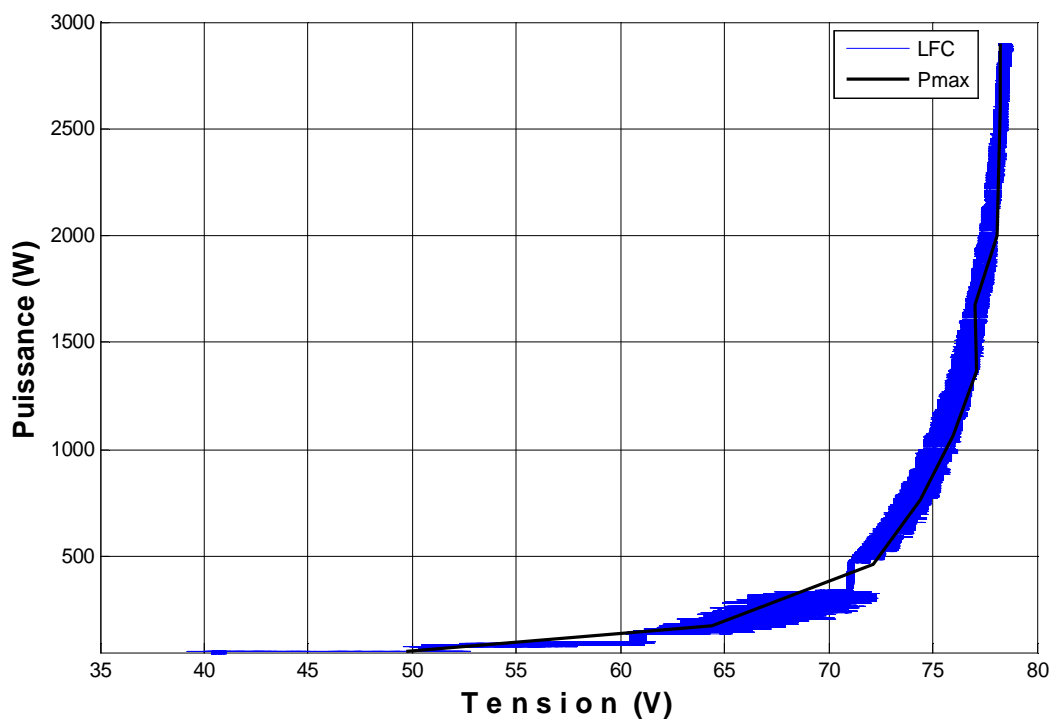


Figure (IV-21) : Courbe P(V) par la méthode FLC pour un profil typique d'ensoleillement

Les figures ci-dessus montre que la méthode perturbation et observation à une très grande fluctuation au niveau de la puissance par rapport a la méthode d'incrémentation de conductance .Par contre la méthode FLC donne une puissance qui varie peu comparée a la courbe de puissance maximale (Pmax), et elle a un très bon temps de réponse par rapport aux méthodes perturbation et observation, et incrémentation de conductance.

#### **IV.10. Conclusion**

Dans ce chapitre on a pu modéliser l'ensemble des composés : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT.

D'après les résultats de simulation, on conclue que:

- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles.
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.
- Les commandes P&O et INC sont largement utilisées mais la commande basée sur la logique floue montre un bon comportement et des meilleures performances par rapport aux autres méthodes.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittente selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients.

Notre travail consiste principalement à comparer entre trois méthodes d'optimisation de puissance (perturbation et observation, incrémentation de conductance, logique floue), et voir comment se comporte le système photovoltaïque.

Ce travail s'agit d'une étude comparative des méthodes de maximisation de puissance dans un système photovoltaïque. En optimisant la puissance générée, afin de se rapprocher du rendement maximal.

Dans le premier chapitre, on a abordé quelques généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques, la nécessité de faire l'assemblage des panneaux soit en série et parallèle, ensuite on a présenté la situation énergétique mondiale et les ressources que dispose l'Algérie en matière d'énergies renouvelables, ainsi que les efforts déployés pour la promotion et le développement de telles ressources.

Le deuxième chapitre, on a abordé les caractéristiques du générateur photovoltaïque  $I(V)$ ,  $P(V)$ , l'état de l'art des principales méthodes les plus utilisées dans la recherche du point de puissance maximale PPM, ainsi que leurs fonctionnements et les paramètres électriques variables, entrées et sorties de ces méthodes.

Dans le troisième chapitre, on a modélisé et simulé un modèle de panneau existant sur le marché. Nous avons décrit la nécessité d'étudier la caractéristique du modèle du générateur photovoltaïque en présentant les différentes zones de fonctionnement, l'influence des différents paramètres climatiques (température, ensoleillement) sur les caractéristiques  $I(V)$ ,  $P(V)$ .

La simulation du système a été effectuée en détails et en plusieurs étapes pour bien illustrer le fonctionnement du générateur photovoltaïque et son comportement face aux deux algorithmes MPPT (perturbation et observation, incrémentation de conductance) et sans MPPT.

Pour finir le chapitre quatre, on a présenté la configuration et l'influence des paramètres climatiques sur le système global étudié, et la modélisation de ces différents paramètres. Puis on a inclus la méthode de la logique floue dans le système globale pour améliorer les performances du système et simulé sur une charge résistive.

L'étude bibliographique sur les générateurs photovoltaïques nous a permis de bien comprendre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque et l'application des modules photovoltaïques dans la production de l'électricité.

Donc pour exploiter les générateurs photovoltaïques au maximum une commande MPPT doit être utilisée pour permettre le fonctionnement au PPM. Différentes méthodes ont été présentées (p&o, inc-con et flc). L'étude comparative révèle que l'algorithme de la logique floue présente des résultats meilleurs et des performances de point de vue recherche du PPM et aussi moins de pertes de puissance.

*Références  
bibliographiques*



## *Références bibliographiques*

- [01]: F. Gacem, « Simulation des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable ». Mémoire de magister, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Saad Dahleb de Blida, 2008.
- [02]: I. Hadj Mohammed, « Modélisation du générateur photovoltaïque ». Mémoire de magister, Département d'électronique. Ecole Nationale Polytechnique, 2003.
- [03]: C. Serir, « Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2012.
- [04]: A.Zerga «Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n-p» Mémoire de Magister, Tlemcen-1998.
- [05]: A. Labouret, M. Viloz, «Energie solaire photovoltaïque (Le manuel du professionnel)», édition DUNOD, Paris (France), août 2003.
- [06]: Z. Bendjellouli « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire»mémoire de magister universite de Bechar, 2009.
- [07]:F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [08]:M. Bois «Les cellules photovoltaïques». Classes préparatoires CPE Institution des Chartreux Année 2004-2005.
- [9]: P. Pernet « Développement de cellules solaires en Silicium amorphe de type 'n.i.p' sur substrats souples » Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Thèse n° :2303, 2000.
- [10]: S. Abada «Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic » Mémoire présenté à la faculté des études supérieures et post doctorales de l'université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique pour l'obtention du grade de maître des sciences (m.se.), 2011.
- [11]: T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement, manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie (AFME).

## *Références bibliographiques*

- [12] : C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger » 2006.
- [13] : Observ'ER, Observatoire des énergies Renouvelables, « Energie renouvelables bilan et perspectives », Douzième inventaire. Édition 2013.
- [14] : Ministère des Energies et des Mines, « [www.mem-algeria.org](http://www.mem-algeria.org) ».
- [15]: N. Toshihiko, S. Togashi and N. Roy, « Short-current Pulse-based Maximum-Power-Point Tracking Method For Multiple Photovoltaic-and-Converter Module System », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49. N°1, February 2002.
- [16]: T. Eswam and P.L. Chapman, «Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques», IEEE Transactions on Energy Conversion », Vol. 22, N°2, pp. 439 –449, 2007.
- [17]: M. El Ouariachi, T. Mrabti, M.F. Yaden, and K. Kassmi, « Analysis, Optimization and Modelling of Electrical Energies Produced by the Photovoltaic Panels and Systems », 18<sup>th</sup> Mediterranean Conference On Control and Automation (MED), IEEE, 23-25 June, 2010, pp.1614 – 1619, Marrakech, Morocco, 2010.
- [18]:M.F. Shraif, « Optimisation et Mesure de Chaîne de Conversion d'Energie Photovoltaïque en Energie Electrique », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2002.
- [19]: A.B.G. Bahgat, N.H. Helwa, G.E. Ahmad and E.T. El Shenawy, « Maximum Power Point Tracking Controller for PV Systems Using Neural Networks », Renewable Energy, Vol. 30,N°8, pp. 1257 – 1268, 2005.
- [20]: V. Salas, E.Oli'as, A. Barrado, A. La' zaro « Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic system », Solar Energy Materials & Solar Cells n°90 (2006), pp. 1555–1578.
- [21] : M.A.S. Masoum, et al. «Optimal power point tracking of photovoltaic system under all operating conditions », 17th Congress of the World Energy Council, Houston, TX, 1998.

## *Références bibliographiques*

[22]: J.J. Schoeman, J.D. van Wyk «A simplified maximal power controller for terrestrial photovoltaic panel arrays », IEEE Power Electronics Specialists Conference. PESC '82 Record. New York, NY, 1982, pp. 361–367.

[23]: M. Abou El Ela, J. Roger «Optimization of the function of a photovoltaic array using a feedback control system », Solar. Cells: Their Science, Technology, Applications and Economics 13 (2) (1984) 185–195.

[24]: T. Noguchi, et al. «Short-current pulse-based adaptive maximum power point Tracking for a photovoltaic power generation system », Elect. Eng. Japan 139 (1) pp. 65–72 (2002) .

[25] : C. Cabal «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Université de Toulouse III – Paul Sabatier, Thèse de doctorat, 2008.

[26]: K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino and M. Osakada, «Maximum Photovoltaic Power Tracking, an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions Generation », IEE Proceedings, Generation, Transmission and distributions, Vol. 142, N°1, pp. 59 – 64, 1995.

[27]: H.J. Möller, «Semiconductors for Solar Cells», Artech House, Inc, MA, 1993.

[28] : H. Buhler, «Réglage Par Logique Floue », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes CH-1015 Lausanne. 1994.

[29]: L.A. Zadeh, «Information and Control, Fuzzy Sets », vol 8, pp 338353, 1965.

[30]: AïtCheikh, C. Larbes, G.F. TchoketchKebir and A. Zerguerras, « Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°3 (2007).

# Annexes

1) Les paramètres électriques du panneau KYOCERAKC200GT 200W utilisés dans notre travail :

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau $P_m$	200 W
Puissance nominale $P_n$	200 W
Courant au point de puissance max $I_m$	7.61 A
Tension au point de puissance max $V_m$	26.3 V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	8.21A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	32.9 V
Coefficient d'incrémentatation du courant $I_{cc}(\alpha_{cc})$	3,18 mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension $V_{oc}(\beta_{oc})$	- 0.123 V/°C
Nombre de cellules en série $N_S$	54

2) Les paramètres de la charge :

- Puissance nominal  $P_n = 2 \text{ KW}$ .
- Résistance interne  $R = 80 (\Omega)$ .

3) Les paramètres de la batterie :

- Tension nominal  $V_n = 400 \text{ V}$ .
- Capacité nominal  $C_n = 100 \text{ Ah}$ .
- Capacité maximal  $C_{max} = 104,1667 \text{ Ah}$ .
- Etat de décharge initiale  $\text{DOD} = 60\%$ .
- Courant nominal de décharge  $I_{nd} = 20 \text{ A}$ .
- Résistance interne  $R = 0,04 (\Omega)$ .