



Faculté : Technologie

Département : Electrotechnique

Domaine : Science et technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Etude comparative des techniques MPPT destinées  
A un système photovoltaïque

Présenté par :

- Bouasla Mohamed Ali
- Bousentoh Ishak

Encadrant :

- MERABET Leila MCA BADJI Mokhtar – Annaba

Jury de Soutenance :

Bensiali Nadia	Prof	BADJI Mokhtar - Annaba	Président
Merabet Leila	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Encadrant
Kelaiaia Samia	MCB	BADJI Mokhtar - Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

# *Remerciements*

**Le plus grand merci s'adresse au bon Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé le courage, la volonté, la patience et la santé pour accomplir ce travail.**

**Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à notre promotrice Madame Merabet Leila qui nous a soutenus tout au long de ce travail. Pour sa Compétence et disponibilité à tout instant et surtout ses orientations.**

**Nous remercions également les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.**

**Nous rendons grâce à tous les enseignants du département d'électrotechnique, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui ont contribué, à ce que ce travail prenne forme. Nous souhaitons également adresser nos remerciements à nos parents, à nos frères et sœurs, à nos amis et à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de notre travail.**

# *Dédicace*

**Je tiens à remercier « ALLAH » le tout puissant, qui m'a donné la puissance  
 , la volonté et la patience pour élaborer ce travail. A mes très chers,  
 respectueux et magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, tendresse,  
 leur soutien et leurs prières tout au long de mes études Aucun hommage ne  
 Pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler.**

**Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.**

**A ma sœur Hadil et mon frère sifou et djawed et mi Luna pour leurs  
 appuis et leur encouragement.**

**A mon binôme Bousentoh Ishak.**

**Mes chers amis : Wassim, Hammada, Yahya, Noufel, Hichem, Chihab, Nassim.**

**A tous les amis (es)d'études surtout ceux d'électrotechnique promotion  
 2023.**

**A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur soutien,  
 pendant mes années d'études.**

**Bouasla Mohamed Ali**

# *Dédicace*

**Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail A mes très chers, respectueux et magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler.**

**Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.**

**A mes sœurs Isra et Doha pour leurs appuis et leur encouragement.**

**A mon binôme BOUASLA Mohamed Ali.**

**Mes chers amis.**

**A tous les amis (es)d'études surtout ceux d'électrotechnique promotion**

**2023**

**A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur soutien, pendant mes années d'études.**

**Bousentoh Ishak**

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## **CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE**

I.1 Introduction .....	4
I.2.1. Energie solaire .....	4
I.2.2 Types d'énergie solaire .....	5
I.2.3 Energie photovoltaïque en Algérie .....	7
I.2.4 Gisement solaire en Algérie .....	7
I.2.5 Potentiel solaire en Algérie .....	7
I.2.6 Potentiel énergétique en Algérie.....	9
I.2.7 Bilan des réalisations.....	10
I.3.1 Effet photovoltaïque.....	15
I.3.2 Généralités sur les systèmes solaires .....	16
I.3.3 Spectre solaire.....	17
I.3.4 Rayonnement solaire.....	17
I.3.5 Effet photovoltaïque.....	19
I.3.6 Les semi-conducteurs.....	20
I.3.7 Cellules photovoltaïques .....	22
I.3.8 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....	23
I.3.9 Les différents types des cellules photovoltaïques.....	23
I.3.10 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque.....	24
I.4.1 Association des cellules photovoltaïques en parallèle .....	28
I.4.2 Association des cellules photovoltaïques en série .....	29
I.4.3 Le module photovoltaïque.....	29
I.4.4 Panneau solaire .....	30
I.5 Protection des modules photovoltaïques .....	31
I.6 Différents types de systèmes photovoltaïques.....	32
I.6.1 Les systèmes autonomes .....	32
I.6.2 Les systèmes hybrides.....	33
I.6.3 Les systèmes connectés au réseau .....	34
Conclusion.....	35

## **CHAPITRE II MODELISATION DU SYSTEME PV ET DES TECHNIQUES MPPT**

II.1 Introduction .....	36
II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque .....	36
II.3 Générateur photovoltaïque(GPV).....	38
II.3.1 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) .....	38
II.4 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=F(V)$ et $P(V)$ .....	38
II.4.1 Influence de l'Éclairement .....	38
II.4.2 Influence de la Température.....	39
II.5 Étage d'adaptation d'un générateur photovoltaïque à la charge .....	40
II.5 .1 Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC.....	41
II.5.2 Circuit d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et la charge .....	42
II.6 Type des hacheurs .....	43
II.6.1. Hacheur Buck .....	44
II.6.2. Hacheur Boost .....	46
II.6.3. Hacheur Buck – Boost .....	49
II.7. Commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) .....	50
II.7.1. Principe du MPPT.....	50
II.7.2 Critères de sélection de la technique MPPT.....	52
II.8 Les différents algorithmes de contrôle MPPT .....	53
II.8.1 Technique MPPT conventionnelles .....	53
II.8.2 Techniques MPPT intelligentes.....	57
Conclusion.....	61

## **CHAPITRE III VALIDATION DES TECHNIQUES MPPT PAR SIMULATION**

III.1 Modélisation par Matlab Simulink du panneau PV .....	62
III.2 Modélisation du Hacheur boost avec Matlab Simulink.....	64
III.3 Efficacité de l'algorithme MPPT .....	66
III.4 Implémentation des techniques MPPT sous l'environnement Matlab Simulink .....	68
III.4.1 Implémentation de la technique P&O par Matlab Simulink.....	68
III.4.2 Implémentation de la technique de conductance incrémentale .....	68
III.4.3 Implémentation de la technique MPPT à base de logique floue sous Matlab /Simulink .....	69

III.5 résultats de simulation .....	72
III.6 Discussion.....	78
Conclusion.....	81
<b>Conclusion général.....</b>	<b>82</b>
<b>Bibliothèque</b>	

# Liste des figures

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

<b>Figure I.0</b> : Protégeant notre environnement.....	4
<b>Figure I.1</b> : Energie solaire thermique.....	5
<b>Figure I.2</b> : Energie solaire photovoltaïque.....	6
<b>Figure I.3</b> : L'énergie thermodynamique .....	7
<b>Figure I.4</b> : Irradiation solaire en Algérie .....	8
<b>Figure I.5</b> : Programme d'électrification de 20 villages du sud .....	9
<b>Figure I.6</b> : Programme complémentaire de soutien à la croissance .....	11
<b>Figure I.7</b> : Programme de développement des wilayas des hauts plateaux.....	11
<b>Figure I.8</b> : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	17
<b>Figure I.9</b> : composantes du rayonnement solaire.....	18
<b>Figure I.10</b> : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	19
<b>Figure I.11</b> : Effet photovoltaïque.....	20
<b>Figure I.12</b> : dopage de type N.....	21
<b>Figure I.13</b> : Dopage type p .....	21
<b>Figure I.14</b> : jonction PN .....	22
<b>Figure I.15</b> : zone de transition.....	22
<b>Figure I.16</b> : cellule photovoltaïque.....	22
<b>Figure I.17</b> : Structure d'une cellule photovoltaïque.....	23
<b>Figure I.18</b> : Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode .....	25
<b>Figure I.19</b> : caractéristiques électriques d'une cellule .....	26
<b>Figure I.20</b> : Schéma de cellules associées en parallèle .....	29
<b>Figure I.21</b> : Schéma de cellules photovoltaïques associées en série .....	29
<b>Figure I.22</b> : Module photovoltaïque .....	30
<b>Figure I.23</b> : Panneau photovoltaïque.....	31
<b>Figure I.27</b> : Protection d'un module par diode by-pass .....	31
<b>Figure I.28</b> : Protection d'un module par diode anti-retour.....	32
<b>Figure I.29</b> : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.....	33
<b>Figure I.30</b> : Configuration du système hybride à bus continu .....	34
<b>Figure I.31</b> : Système connecté au réseau.....	35

## CHAPITRE II : MODILISATION DU SYSTEME PV ET DES TECHNIQUE MPPT

<b>Figure II.1</b> : La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement.....	39
<b>Figure II.2</b> : La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement.....	39
<b>Figure II.3</b> : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température.....	40
<b>Figure II.4</b> : La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température .....	40
<b>Figure II.5</b> : Chaine de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC Contrôlé Par une commande MPPT sur charge DC.....	42
<b>Figure II.6</b> : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation .....	43
<b>Figure II.7</b> : Schéma électrique d'un hacheur Buck pour K ouvert .....	44
<b>Figure II.8</b> : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck.....	45
<b>Figure II.9</b> : Schéma électrique d'un hacheur Buck pour K fermé .....	45
<b>Figure II.10</b> : Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert.....	46
<b>Figure II.11</b> : Schéma électrique d'un hacheur Boost .....	46
<b>Figure II.12</b> : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost.....	47
<b>Figure II.13</b> : Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé.....	48
<b>Figure II.14</b> : Schéma électrique d'un hacheur Boost ouvert.....	48
<b>Figure II.15</b> : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur.....	49
<b>Figure II.16</b> : Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost .....	49
<b>Figure II.17</b> : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	50
<b>Figure II.18</b> : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale .....	52
<b>Figure II.19</b> : Principe de la méthode perturbation et observation.....	54
<b>Figure II.20</b> : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).....	55
<b>Figure II.21</b> : Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance .....	57
<b>Figure II.22</b> : Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.....	58
<b>Figure II.23</b> : Fonctions d'appartenance de chacune des variables linguistiques.....	60
<b>Figure II.24</b> : Différentes formes de fonctions d'appartenance .....	60

## CHAPITRE III : VALIDATION DES TECHNIQUES MPPT PAR SIMULATION

<b>Figure III.1.a</b> Modèle équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque .....	62
<b>Figure III.1.b</b> Paramètres électriques du panneau PV... ..	63

<b>Figure. III.2</b> Modèle du générateur PV avec MATLAB/Simulink...	64
<b>Figure III.3</b> Model de l'hacheur Boost avec Matlab Simulink.....	65
<b>Figure. III.4.b</b> Tensions à l'entrée et à la sortie du Boost .....	66
<b>Figure III.5</b> position du point MPP .....	67
<b>Figure III.6</b> Modèle Simulink de la technique P&O.....	68
<b>Figure III.7</b> Modèle Simulink de la technique de conductance incrémentale .....	68
<b>Figure III.8</b> schéma Simulink de la technique MPPT à base de logique floue.....	69
<b>Figure III.9</b> Fonctions d'appartenance.....	70
<b>Figure III.10</b> Introduction des règles sous l'environnement Matlab.....	71
<b>Figure III.11</b> Modèle global du système PV system avec les trois techniques MPPT.....	72
<b>Figure. III.12</b> Caractéristiques du PV sous éclairement variable ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).....	72
<b>Figure III.13</b> Caractéristiques du PV sous température variable ( $I_G = 1000 \text{ W/m}^2$ ).....	73
<b>Figure III.14.</b> Variation de l'éclairement.....	74
<b>Figure. III.15</b> Puissance du PV sous éclairement variable ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).....	74
<b>Figure. III.16</b> Zoom de la puissance du PV sous éclairement variable ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ) .....	75
<b>Figure III.17</b> dépassent lors de variation de l'éclairement .....	75
<b>Figure. III.18</b> Tensions à l'entrée et à la sortie de l'hacheur sous éclairement variable (P&O MPPT).....	76
<b>Figure. III.19</b> Courants à l'entrée et à la sortie de l'hacheur sous éclairement variable (P&O MPPT).....	76
<b>Figure III. 20 :</b> Evolution de la puissance du panneau PV en fonction de la tension .....	77
<b>Figure III. 21</b> Variation de la température.....	79
<b>Figure III. 22</b> Puissance de PV sous température variable .....	80

# Liste des tableaux

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

<b>Tableau I.1</b> Potentiel solaire en Algérie .....	8
<b>Tableau I.2</b> Puissance photovoltaïque installée dans le grand sud.....	10
<b>Tableau I.3</b> Quelques projets réalisés par l'UDES dans l'installation des panneaux solaires photovoltaïque .....	15
<b>Tableau I.4</b> Les différents types des cellules avec leur rendement .....	24

## CHAPITRE II : MODILISATION DU SYSTEME PV ET DES TECHNIQUE MPPT

<b>Tableau II.1</b> : Table de règles à cinq classes (matrice d'inférences) .....	60
---	----

## CHAPITRE III : VALIDATION DES TECHNIQUES MPPT PAR SIMULATION

<b>Tableau III.1</b> Paramètres électriques du PV .....	63
<b>Tableau III.2</b> Paramètres de l'hacheur Boost .....	68
<b>Tableau III.3</b> Table de règles à cinq classes (matrice d'inférences) .....	71
<b>Table III.4</b> Comparaison de l'efficacité des techniques MPPT .....	77
<b>Table III.5</b> Comparaison du comportement dynamique des techniques MPPT .....	78
<b>Table III.6</b> Comparaison de l'efficacité des techniques MPPT lors de changement De température .....	80

# Résumé

**Résumé** - Ce travail est une étude comparative de trois types de techniques MPPT destinées au système photovoltaïque. Les techniques MPPT les plus populaires, perturber et observer (P&O) et incrément de la conductance, sont comparées à une technique intelligente à base de la logique floue, 'LF'. Le point MPP change avec les variations climatiques qui sont la température et l'éclairement. Les résultats de simulations effectuées sur l'environnement Matlab-Simulink sont analysés afin de montrer les performances et les limites de chaque algorithme.

**Mots clés** : Système photovoltaïque, MPPT, Hacheur boost, P&O, CI, LF et Efficacité.

**Abstract** – This work is a comparative study of three types of MPPT techniques intended for the photovoltaic system. The most popular MPPT techniques, perturb and observe (P&O) and conductance increment, are compared with an intelligent technique based on fuzzy logic, 'LF'. The MPP point changes with the climatic variations, which are the temperature and the illumination. The results of simulations carried out on the Matlab-Simulink environment are analyzed in order to show the performance and limits of each algorithm.

**KEYWORDS:** Photovoltaic System, MPPT, Boost Converter, P&O, IC, FL and Efficiency

## المخلص-

هذا العمل عبارة عن دراسة مقارنة لثلاثة أنواع من تقنيات MPPT المخصصة للنظام الكهروضوئي. تتم مقارنة تقنيات MPPT الأكثر شيوعاً، والاضطراب والمراقبة (P&O وزيادة التوصيل، بتقنية ذكية تعتمد على المنطق الضبابي، "LF" لتتغير نقطة MPP مع التغيرات المناخية، وهي درجة الحرارة والإضاءة. يتم تحليل نتائج عمليات المحاكاة التي أجريت على بيئة Matlab-Simulink من أجل إظهار أداء وحدود كل خوارزمية

**الكلمات الرئيسية:** النظام الكهروضوئي، MPPT، محول التعزيز، P&O، IC، FL والكفاءة

# Abréviations

**CDER : Centre de développement des énergies renouvelable.**

**SKTM : Shariket Kahraba Wa Taket Moutadjadida.**

**ENR : Energie renouvelable.**

**Kwc : Kilo Watt crête.**

**PV : photovoltaïque GPV : générateur photovoltaïques.**

**FF : facteur de forme.**

**Ns : Nombre de cellules en série dans un module photovoltaïque.**

**Np : Nombre de cellules en parallèle dans un module photovoltaïque.**

**GPV : générateur photovoltaïques.**

**PPM : Le point de fonctionnement optimal.**

**MPPT : Maximum Power Point Tracking.**

**DC : courant continue (Direct Curent).**

**AC : Courant Alternatif (Alternative curent).**

**P&O: perturbé and observe.**

# Symboles

$\lambda$  : Longueur d'onde [m].

$I_{ph}$  : Photo-courant (A).

$R_s$  : La résistance série ( $\Omega$ ).

$R_{sh}$  : La résistance parallèle shunt (A).

$I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode.

$V$  : Tension thermique à la température T.

$q$  : Charge de l'électron ( $1.602 \times 10^{-19}c$ ).

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} j/k$ ).

$K_i$  : Constante ( $1.2A /cm^2 K^3$ ).

$n$  : Facteur de non idéalité de la jonction.

$T$  : Température effective de la cellule en degré Kelvin.

$E_g$  : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV).

$G$  : l'ensoleillement en  $W /m^2$ .

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit (A).

$V_{co}$  : Tension de circuit-ouvert (V).

$P_m$  : puissance maximale (W).

$I_m$  : courant du point de fonctionnement (A)

$V_m$  : tension du point de fonctionnement en Volt(V).

$S$  : surface de la cellule en  $m^2$ .

$I_{pv}$  : le courant de sortie du GPV(A).

$E$  : l'ensoleillement en  $W/m^2$ .

# Introduction générale

Aujourd'hui et dans ce monde l'utilisation croissante des combustibles fossiles a conduit les universitaires à concentrer leurs efforts sur les énergies renouvelables. Le système solaire est cependant la source d'énergie renouvelable la plus importante. Les émissions de bruit et de dioxyde de carbone sont absentes de cette forme d'énergie.

En réalité, l'énergie solaire est une source d'énergie propre et renouvelable qui a le potentiel de répondre à une grande partie de la demande croissante d'énergie dans le monde. Les systèmes photovoltaïques sont une technologie clé pour convertir l'énergie solaire en électricité. Cependant, la production d'énergie d'un système photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs, notamment l'intensité lumineuse, la température et la configuration du système. Pour maximiser la production d'énergie d'un système photovoltaïque, il est important d'utiliser des techniques de commande efficaces telles que les techniques MPPT.

Les techniques MPPT sont des algorithmes de commande qui ajustent en temps réel la tension de sortie du générateur photovoltaïque pour maintenir la puissance de sortie au point de puissance maximale. En d'autres termes, ces techniques permettent d'optimiser la production d'énergie du système en faisant en sorte que la tension de sortie du générateur photovoltaïque corresponde au point de puissance maximale pour les conditions environnementales actuelles.

Cela permet de maximiser le rendement du système photovoltaïque, d'augmenter sa durée de vie et de réduire les coûts d'installation et de maintenance.

Dans la recherche, on trouve des techniques MPPT classiques et intelligentes, chacune a ses avantages et ses inconvénients. Parmi les techniques conventionnelles, les plus courantes on distingue la technique de tension de circuit ouvert fractionnelle (Fractionnel Open Circuit Voltage FOCV), la technique du courant de court circuit (FSCC) Fractional short Circuit Current), l'algorithme perturbation et observation (Perturbé and Observe P&O) et l'algorithme incrémentation de conductance (Incrémental Conductance IC).

Vu les inconvénients des techniques conventionnelles de point de vu temps de réponse, oscillations au tour du point maximal de puissance (PPM) et dépassement ; les techniques MPPT ont été développées. Ils sont principalement basés sur des techniques d'intelligentes telles que la logique floue (FL), les réseaux de neurones artificiels (ANN), la technique hybride neuro-floue (ANFIS), la technique génétique (Particule Swarm Optimisation PSO) et d'autres techniques. Ils sont plus avantageux que les méthodes conventionnelles car ils permettent d'améliorer le temps de réponse, la précision du suivi et la minimisation du dépassement durant la phase transitoire et permanente, pour tout changement d'irradiation et de température.

Dans cette étude par simulation, nous allons explorer trois techniques MPPT utilisées pour les systèmes photovoltaïques pour évaluer leurs efficacités vis à vie les changements climatiques et pour déterminer la méthode la plus appropriée.

Ainsi, ce manuscrit a été organisé en trois chapitres. Le premier chapitre a été consacré à présenter un panorama complet de l'énergie solaire et des projets

futurs, en plus du principe de fonctionnement d'une chaîne de conversion photovoltaïque solaire.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du système PV constitué d'un panneau PV, un étage d'adaptation avec la charge constitué d'un hacheur boost, bloc MPPT qui génère l'impulsion de commande du semi-conducteur constituant l'hacheur boost tout en assurant le point PPM.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous discutons les résultats de la validation par simulation de ces techniques MPPT afin de juger de la méthode la plus appropriée pour la surveillance des points MPP sous des changements climatiques.

# CHAPITRE I

ETAT DE L'ART DU

SYSTEME

PHOTOVOLTAÏQUE

## I.1 Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. Les systèmes photovoltaïques (PV) sont de plus en plus populaires en raison de leur capacité à produire de l'énergie propre et renouvelable à partir de la lumière du soleil. Ces systèmes sont utilisés pour alimenter des applications allant des petits dispositifs portables aux grands réseaux électriques. L'état de l'art des systèmes PV est un domaine de recherche important pour comprendre les progrès technologiques, les tendances du marché et les défis futurs liés à l'adoption de cette technologie.

### I.2.1. Energie solaire

L'énergie solaire est l'énergie électromagnétique liée au rayonnement émis par le soleil. Par l'utilisation de cellules solaires, en produisant de l'électricité sans effet de serre, le solaire photovoltaïque (PV) est de loin le meilleur moyen de satisfaire nos besoins en énergie tout en

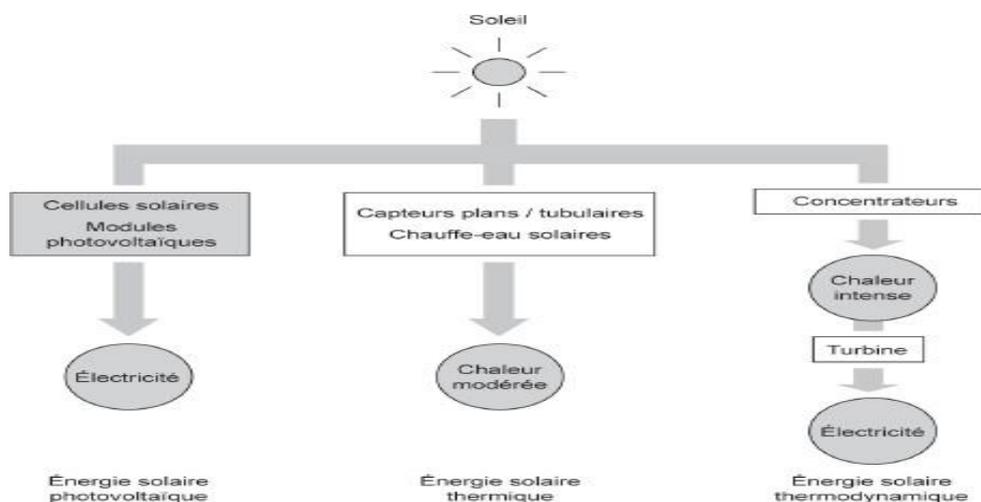


Figure I.0 Protégeant notre environnement [01].

## I.2.2 Types d'énergie solaire

Il existe différents types d'énergies solaires

- L'énergie thermique.
- L'énergie photovoltaïque.
- L'énergie thermodynamique.

### a- L'énergie solaire thermique

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude.

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires.



**Figure I.1** : Energie solaire thermique

### **b- L'énergie photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque, décrit par le physicien français Antoine Becquerel (le grand père du découvreur de la radioactivité) en 1839, dont le principe est simple : La lumière du soleil (les photons) est transformée directement en électricité (les électrons) par des cellules photovoltaïque. Ces cellules sont reliées entre-elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés en panneaux pour former un parc ou une installation solaire, qui alimente un réseau de distribution électrique. L'énergie solaire photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où, y compris en centre-ville, permettant d'économiser d'autant les besoins de fourniture par le réseau des bâtiments équipés. Elle est surtout utilisée pour la Fourniture d'électricité dans les sites isolés.



**Figure I .2** Energie solaire photovoltaïque

### **c- L'énergie thermodynamique**

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer une fluide haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante.



**Figure I .3** L'énergie thermodynamique

### **I.2.3 Energie photovoltaïque en Algérie**

L'Algérie, de par sa situation géographique, bénéficie des conditions favorables à l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, l'une des possibilités de l'exploitation de l'énergie solaire est sa transformation directe en une énergie électrique, au moyen des convertisseurs photovoltaïques. Plusieurs projets et programmes solaires ont été initiés et développé notamment par le centre de développement des énergies renouvelables (CDER) tel que le dimensionnement des équipements photovoltaïque, des visites des sites d'implantation, la réalisation et la mise en place des installations photovoltaïques, l'acquisition de matériels et des équipements spécialisés, l'entretien et la maintenance de ces équipements, etc... [2].

L'intensité de l'énergie solaire reçue à la terre est variable et très souvent les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement. Conséquemment, il est nécessaire d'équiper le système par des batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu.

### **I.2.4 Gisement solaire en Algérie**

Le gisement solaire est l'ensemble des caractéristiques de la ressource en énergie solaire disponible à un endroit et à un moment donné.

L'étude du réservoir solaire est le point de départ de toute recherche dans le domaine de l'énergie solaire.

### **I.2.5 Potentiel solaire en Algérie**

L'Algérie est probablement le pays Africain et Méditerranéen disposant du potentiel d'énergie renouvelable le plus important à l'échelle régionale, de même que les capacités les plus appropriées

au développement et à l'exploitation de ce potentiel. Un potentiel énergétique lié à plusieurs types de sources, mais dont l'énergie solaire demeure la plus importante en disponibilité et puissance et, sans doute aussi, la plus compétitive à développer à l'avenir sous diverses formes.

L'Algérie est en effet l'un des plus importants gisements d'énergie solaire au monde avec une durée d'insolation de 2.000 à 3.900 heures par an, et une irradiation journalière de 3.000 à 6.000 Wh/M2, soit l'équivalent de 10 fois la consommation mondiale [3].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Tableau I.1 Potentiel solaire en Algérie [4]

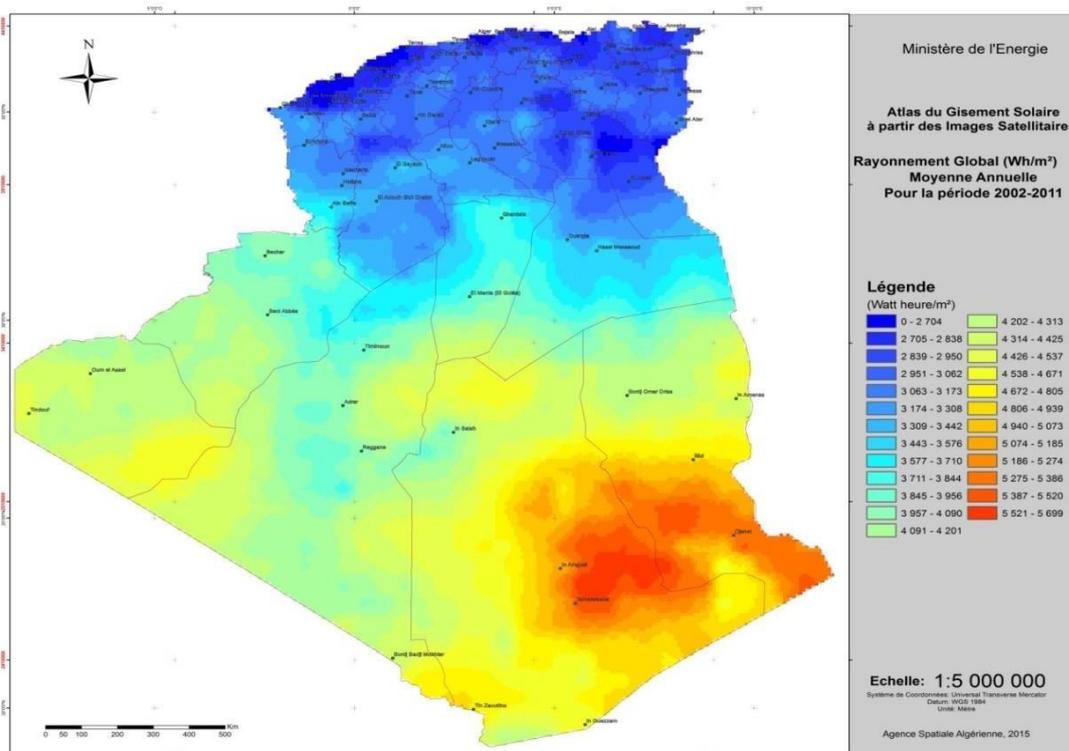


Figure I.4 : Irradiation solaire en Algérie [5].

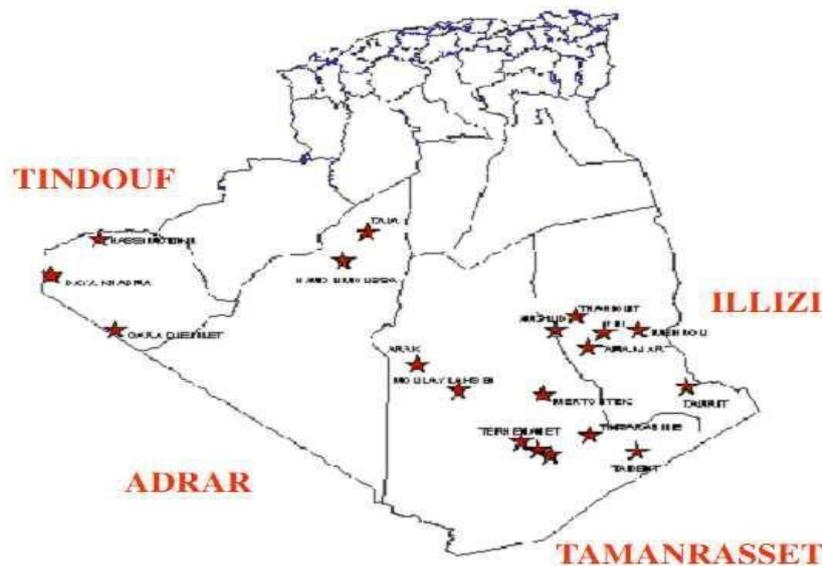
## I.2.6 Potentiel énergétique en Algérie

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année [6].

Le potentiel énergétique solaire permet de palier à certaines lacunes, quant à l'amélioration des conditions de vie des citoyens par le biais de la voie solaire d'origine photovoltaïque. Cette voie permet d'assurer entre autres [7] :

- L'électrification des sites isolés
- L'éclairage domestique et éventuellement public
- L'alimentation en eau potable et l'irrigation des surfaces agricoles
- L'alimentation énergétique des moyens de télécommunications
- Le dessalement des eaux de mer

Dans notre pays, les premières expériences sont apparues avec le programme d'électrification rurale solaire durant la période 1995-2002 qui a concerné 20 villages répartis dans 4 wilayas du grand sud de l'Algérie : Tamanrasset (9 villages), Tindouf (3 villages), Illizi (6 villages) et Adrar (2 villages), comme le montre la figure 1.1.2 Ces villages étaient caractérisés par leur isolement et leur éloignement de tout réseau de communication.



**Figure I.5** Programme d'électrification de 20 villages du sud

Leur alimentation par les filières classiques (diesel, réseau électrique), en plus des coûts de réalisation excessifs, auraient posé le problème de l'acheminement du combustible, et dans le cas du réseau, des difficultés certaines pour les travaux et la maintenance des lignes aériennes.

Le solaire photovoltaïque pourrait également constituer une alternative pour un programme ultérieur. Le tableau 1.2 indique la puissance installée pour chaque wilaya [8].

Wilaya	Puissance (kW)
Tamanrasset	149 703
Illizi	23 813
Tindouf	85 882
Adrar	25 145
<b>Total</b>	<b>284 543</b>

**Tableau I.2** Puissance photovoltaïque installée dans le grand sud

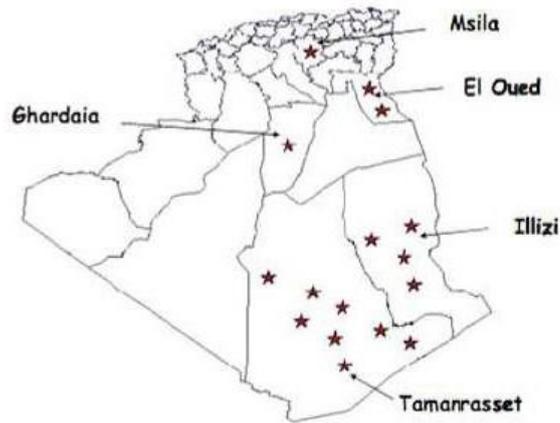
L'Algérie enregistre un taux faible en matière d'énergie renouvelable dans le bilan énergétique national qui ne représente que 0,02 % de la consommation nationale d'électricité

### I.2.7 Bilan des réalisations

- **Réalisation au sud**

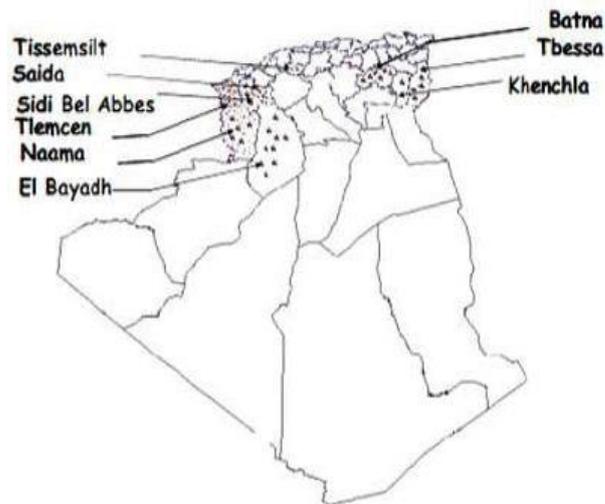
Suite aux plusieurs applications qui ont été réalisées, comme les installations pour les systèmes de télécommunications, l'éclairage public et le pompage de l'eau.... D'autres programmes ont été engagés, tel que :

Le programme complémentaire de soutien à la croissance qui concerne l'électrification de 16 villages du sud de l'Algérie à l'énergie photovoltaïque, comme le montre **Figure I.6** .



**Figure I.6** Programme complémentaire de soutien à la croissance

Le programme de développement des wilayas des hauts plateaux qui permettra d'électrifier une soixante de localités au niveau de la région steppique, illustré par la **figure I.7**.



**Figure I.7** Programme de développement des wilayas des hauts plateaux

- L'alimentation de plus de 100 sites de télécommunication d'une puissance de 650 KWc.
- La fourniture de 160 pompes solaires pour une puissance de 240 KWc
- **Réalisation au nord**
  - Dans le cadre de la coopération Algérois-Espagnole, la construction d'une centrale photovoltaïque de 10 KWc connectée au réseau national électrique est programmée

- Une station de services de Naftal alimentée en énergie solaire, est prévue à Staoueli d'une puissance de 7KWc.
- Des installations pilotent au profit de la gendarmerie nationale : alimentation en énergie photovoltaïque des postes de surveillances routières.

### **Projet de SKTM :**

Le projet des 343MWc, qui constitue un extrait de la première phase de déploiement du programme national des énergies renouvelables, constitue un cas d'école, non seulement pour la société SKTM, mais également à l'ensemble des intervenants dans le processus, gestionnaire du réseau de transport, les sociétés de distribution, l'opérateur du système électrique, les autorités locale...etc., Pour ne citer que ceux-là. Et qui commencent à appréhender les problématiques liées aux énergies renouvelables.

La société SKTM a placé des contrats de réalisation de 23 centrales en filière photovoltaïque, technique fixe poly cristalline, à l'entame de l'année 2014, après un appel à manifestation d'intérêt international ayant touché une trentaine de leaders mondiaux dans la filière photovoltaïques avec les opérateurs chinois, Groupement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.

Il est important de noter au passage, que sur l'ensemble des centrales lancées, dix-neuf (19) centrales sont déjà mises en service et injectent sur les réseaux 30KV et 60KV, totalisant une puissance installée de 268MWc.

La première centrale mise en service est celle de Djanet, le 19 février 2015, d'une puissance de 03MWc. Cinq (05) centrales totalisant une puissance de 48MWc a été raccordée au réseau durant l'année 2015, à savoir Djanet, Adrar, Kabertène, Tindouf et Tamanrasset. L'année 2016 a été marquée par le raccordement de quatorze (14) centrales totalisant une puissance de 220MWc, lesquelles : Timimoune, Aoulef, Reggane, In Salah, Zouyet Kounta, El Bayodh, Naâma, Sidi Belabes, Saida, Ouargla, M'sila, Souk Ahras, Djalfa (1) et Laghouat (1) [9].

### **Programme national de développement des EnR 2015-2030**

- L'Algérie s'est engagée 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 à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011 et révisée en mai 2015 et Février 2020.
- L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 16 000 MW à l'horizon 2035

dont 4 000 MW à l'horizon 2024 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent. [10].

### Projets de CDER :

Dans le cadre de développement de l'énergie solaire photovoltaïque, plusieurs projets et programmes ont été ainsi initiés et développés par la Division Energie Solaire Photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelables, pour de nombreuses applications dans le but de répondre aux besoins énergétiques des citoyens et des usagers vivants dans les zones isolées et où l'énergie conventionnelle n'est point disponible. En effet, les activités effectuées ont porté essentiellement sur une participation très active de la division à l'ensemble de ces projets. Il s'agit de l'élaboration des études de projets, du dimensionnement des équipements PV, du choix des architectures des installations et de l'ingénierie des systèmes PV, des visites des sites d'implantation, de l'acquisition des équipements spécialisés et de matériels, de la réalisation et de la mise en place des installations photovoltaïques, de l'entretien et de la maintenance de ces équipements [11].

ORGANISME	TYPE	PUISSANCE
<b>CRND</b>	Installation de dix-neuf systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque.	2,09 KWc
<b>CDTA</b>	Installation de vingt-six systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque.	2,86 KWc
<b>NAFTAL</b>	Installation de vingt-deux systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque et l'alimentation électrique de deux (02) volucompteurs en énergie solaire	7,22 KWc
<b>MDN</b>	Alimentation par énergie photovoltaïque d'une cabine de cuisson tractable	0,7 KWc
<b>Hôpital militaire de Ain naadja</b>	Installation d'un (01) système d'éclairage public par énergie photovoltaïque	0,11KWc
<b>ALGERIE TELECOM</b>	Alimentation d'un relais de transmissions par énergie photovoltaïque	4,2 KWc

<b>MESRS</b>	Installation de quarante (40) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	4,4 KWc
<b>Postes de surveillance routières et unités de la Gendarmerie Nationale</b>	Installation de systèmes d'éclairage public et alimentation des cabines <sup>10</sup>	07 KWc
<b>Ecole Nationale Supérieure de l'hydraulique</b>	Installation d'un (01) système d'éclairage public par énergie photovoltaïque	0,11KWc
<b>Université de Boumerdes</b>	Installation de (02) deux kits d'éclairage par énergie photovoltaïque	0,33KWc
<b>Complexe Touristique (Djenan ETAKAFA)</b>	Installation de douze (12) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	1,32 KWc
<b>AFSI BOUCHAOUI Gendarmerie Nationale</b>	Installation de vingt (20) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2,2 KWc
<b>Station de Veille de l'Atmosphère Globale (ONM) Assekrem W-Tamanrasset</b>	Installation d'une mini-centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation électrique des équipements de mesure	05 KWc
<b>Direction des Mines et de L'Industrie : Gara-Djebilet (Wilaya de Tindouf)</b>	Installation d'une mini-centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation électrique des maisons et l'éclairage extérieur	09 KWc

<b>Ministère de la Défense Nationale</b>	Fourniture de 21 systèmes photovoltaïques de 750 Wc pour l'alimentation électrique des appareils de transmissions	15,75 KWc
<b>Commandement de la Gendarmerie Nationale</b>	Fourniture de 189 systèmes photovoltaïques de 750 Wc pour l'alimentation électrique des équipements de transmissions	141,75 KWc

**Tableau 1.3 :** Quelques projets réalisés par l'UDES dans l'installation des panneaux solaires photovoltaïque [12]

### Programme national des énergies renouvelables

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social. L'Algérie projette de lancer un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22000 MW entre 2011 et 2030 dont 12000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10000 MW à l'exportation.

A la faveur de ce programme, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie : d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable. Le programme des énergies renouvelables est défini ainsi pour les différentes phases C :

- D'ici 2013, il est prévu l'installation d'une puissance totale de l'ordre de 110 MW ;
- A l'horizon 2015, une puissance totale de près de 650 MW serait installée ;
- D'ici 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2000 MW ;
- D'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10000 MW.

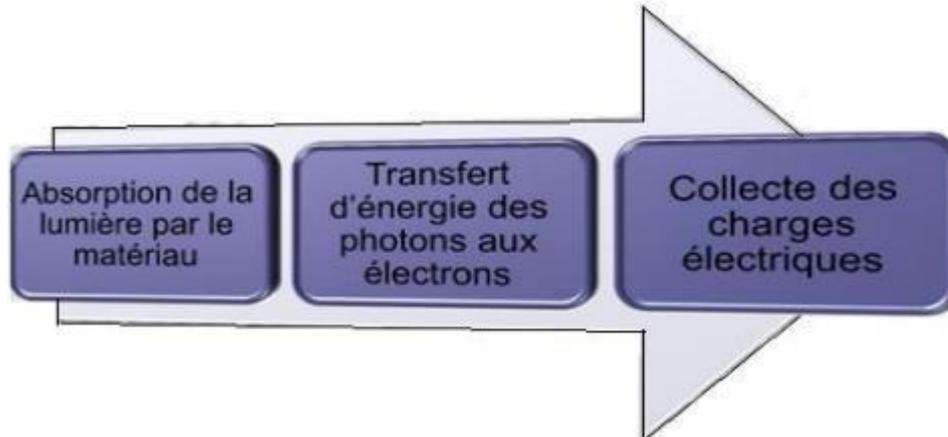
### I.3 EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

Effet photovoltaïque = conversion de lumière en électricité.

« L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Edmond Becquerel (1820-1891).

L'énergie solaire photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie du Soleil en électricité. Autrement dit, La lumière du soleil peut être transformée en électricité par des panneaux photovoltaïques. L'électricité produite peut être stockée dans des batteries. Elle constitue une énergie d'avenir.

Trois étapes sont nécessaires pour cette conversion, à savoir le diagramme suivant [13] :



#### I.4 Généralités sur les systèmes solaires

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

- Dans un isolant électrique : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- Dans un conducteur électrique (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- Dans un semi-conducteur : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il ya donc courant électrique sous l'exposition à la lumière.

## I.5 Spectre solaire

Le spectre solaire et la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) ou de la fréquence ( $\nu$ ). Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$  [15].

La (figure I.8) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6,4% dans la bande des ultraviolets ( $0,20 < \mu < 0,38 \mu\text{m}$ )
- 48% dans la bande visible ( $0,38 < \mu < 0,78 \mu\text{m}$ )
- 45,6% dans la bande des infrarouges ( $0,78 < \mu < 10 \mu\text{m}$ )

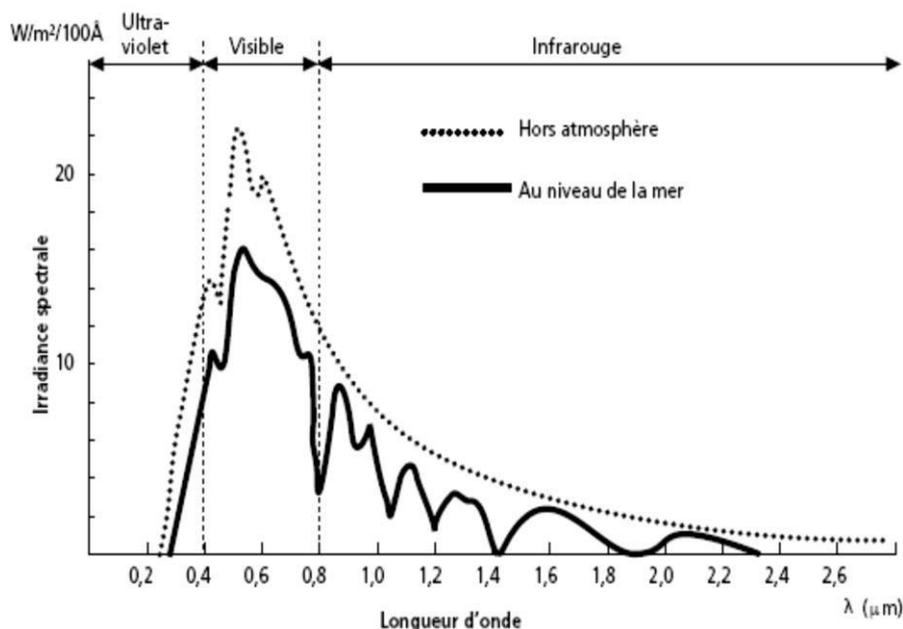


Figure I.8 Analyse spectrale du rayonnement solaire [15]

## I.6 Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la

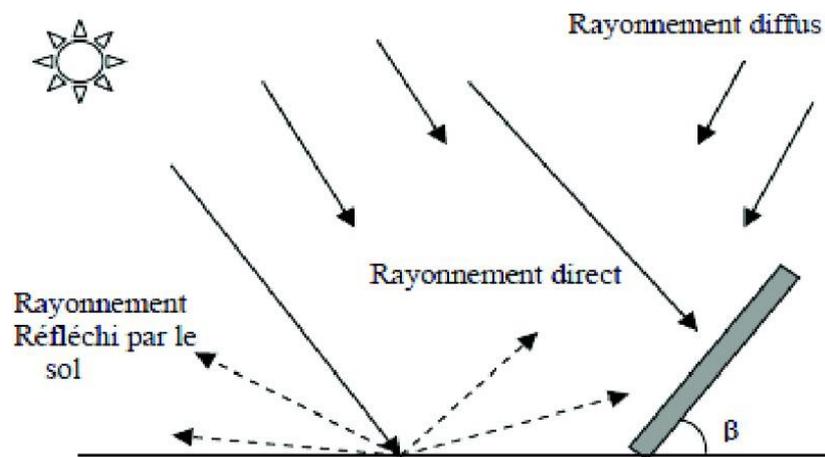
température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. [16]

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présenté un maximum pour une longueur d'onde d'environ  $0.5\mu\text{m}$ , la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ  $5780^\circ\text{K}$  :

Diamètre de soleil  $D_s = 1.39.10^9\text{m}$

Diamètre de la terre  $D_t = 1.27.10^7\text{m}$

Distance moyenne soleil\_ terre  $D_{ms} = 1.5.10^{11}\text{m}$



**Figure I.9** : composantes du rayonnement solaire [16]

On distingue trois composantes de rayonnement solaire :

### I.6.1-Rayonnement direct

Le rayonnement direct c'est le rayonnement reçu directement de soleil sans diffusion par l'atmosphère.

### I.6.2-Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus c'est le rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, le rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (les molécules d'air, les gouttelettes d'eau, les poussières, ...) et à sa réflexion par les nuages.

### I.6.3-Rayonnement réfléchi

Le rayonnement réfléchi c'est le rayonnement solaire qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant sur sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol (environnement du site), et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neiges, eau, etc). Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur des plans inclinés.

Donc, le rayonnement global est la contribution de diverses composantes du rayonnement solaire.

### I.6.4- Le rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un Pyromètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyromètre placé horizontalement à l'endroit requis.

Rayonnement global = rayonnement direct + rayonnement diffus + rayonnement réfléchi

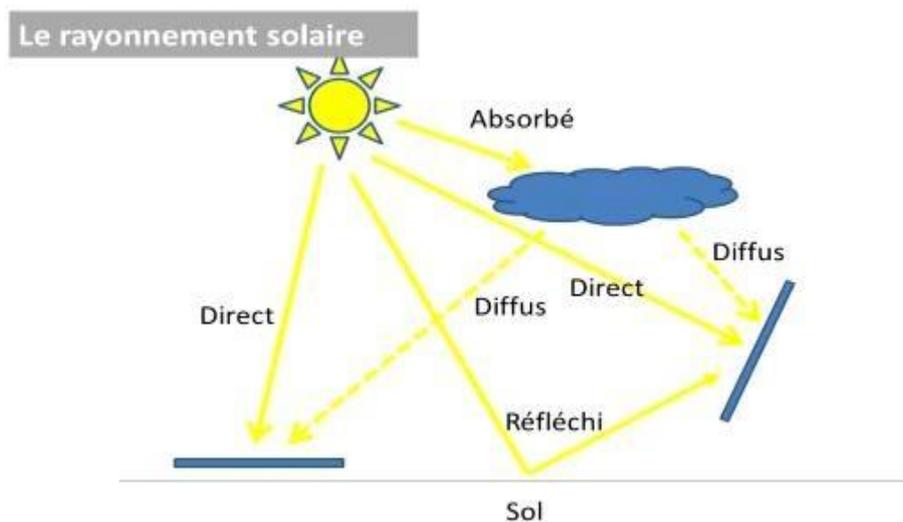


Figure I.10 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

## I.7 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux Appelés "semi-conducteurs" qui exposés à la lumière, produisent de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans 90% des panneaux solaires produits dans le monde.

[17]

Cet effet est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de

conduction) créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. Ils sont appelés photodiodes, phototransistors ou des photopiles. Cet effet photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaires photovoltaïques.

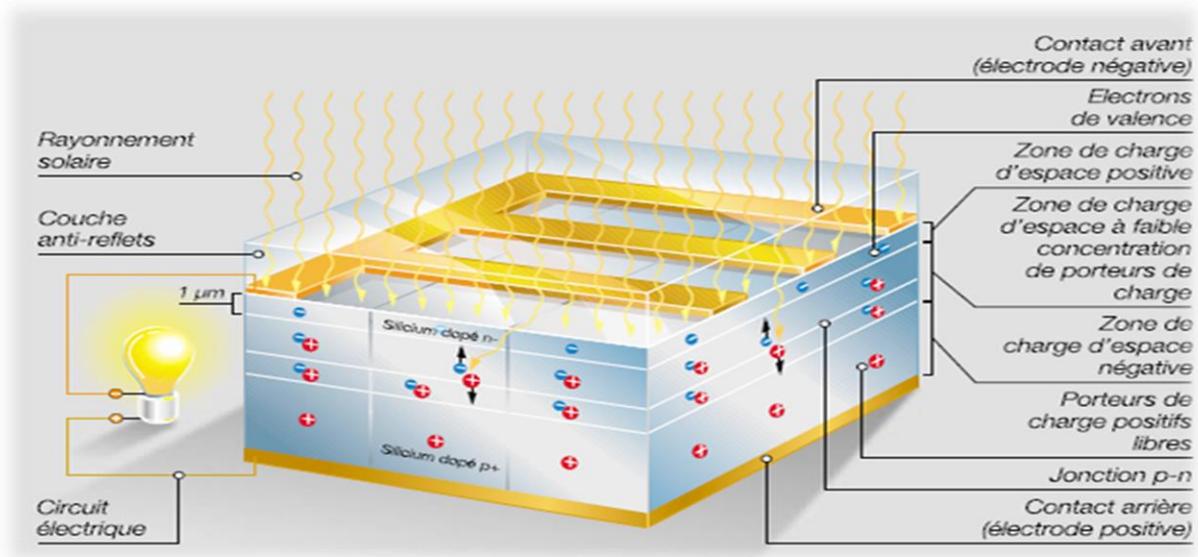


Figure I.11 : Effet photovoltaïque.

## I.8 Les semi-conducteurs

La filière la plus avancée sur le plan technologique et industrielle est la réalisation de cellules à base de silicium. Ce dernier est l'élément semi-conducteur le plus utilisé car il est peu coûteux et il se trouve en très grande quantité sur terre : il constitue 28% de l'écorce terrestre, sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique [18].

### ➤ Types de dopage

#### a. Dopage de type N

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

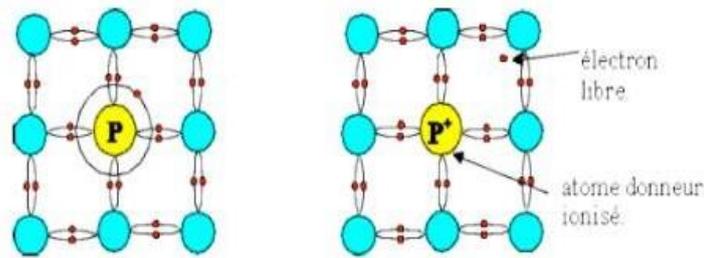


Figure I.12 : dopage de type N.

### b. Dopage de type P

Utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Le bore (B) est le dopant de type p le plus couramment utilisé pour le silicium. Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type p) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous). Un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque.

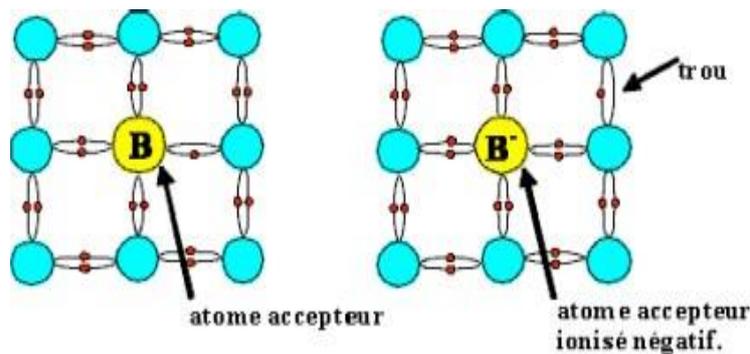


Figure I.13 : Dopage type p

### c. La jonction PN

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.

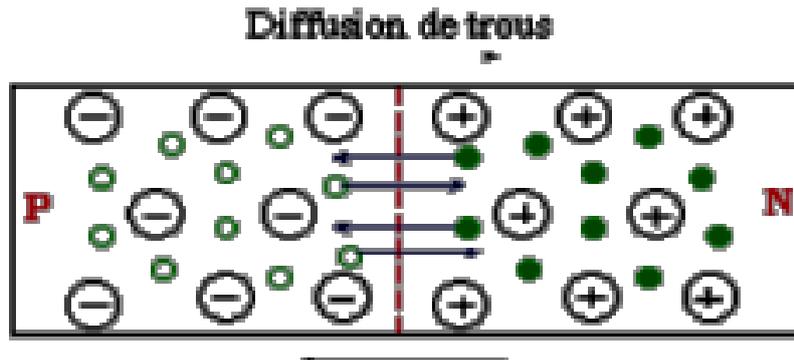


Figure I.14 : jonction PN

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.

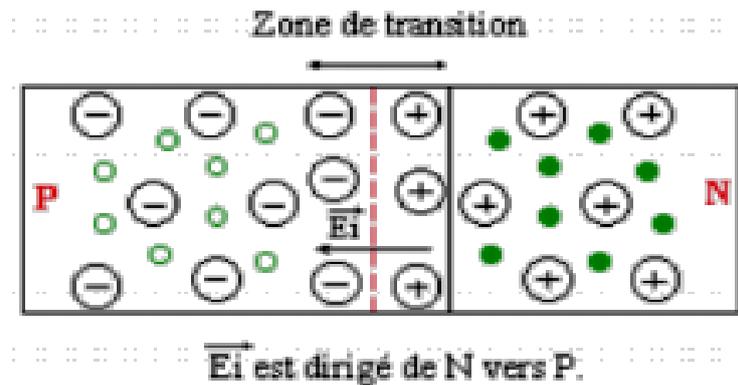


Figure I.15 : zone de transition.

### I.9 Cellules photovoltaïques

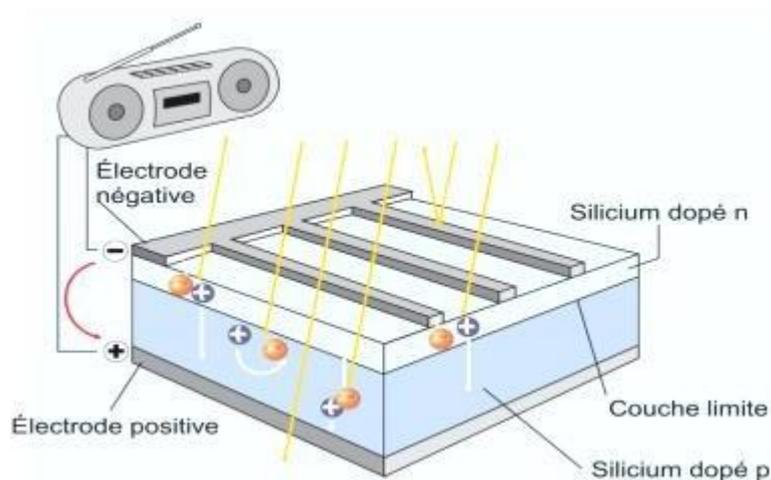
La cellule photovoltaïque (photopile) forme l'élément de base du générateur photovoltaïque, c'est une méthode optoélectronique de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est réalisée à base de matériaux semi-conducteurs, généralement le silicium.



Figure I.16 : cellule photovoltaïque.

### I.9.1 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [19]. La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la **figure (I.17)** ci-dessous :



**Figure I.17** : Structure d'une cellule photovoltaïque.

### I.9.2 Les Différents Types Des Cellules Photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres.

Type de Cellules	Caractéristiques	Représentation	Rendement
Les cellules monocristallines	-le meilleur rendement -coût très élevé -fabrications complexe		De 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 %
Les Cellules poly cristalline	-Un rendement plus faible - Leur conception est plus facile -leur coût de fabrication est moins important.		de 11% à 15% jusqu'à 19.8%
Les Cellules amorphes :	-Elles sont utilisées dans de petits produits : (calculatrices, des montres) - un rendement assez faible -un cout plus élevé.		5% à 8%, jusqu'à 13%

**Tableau I.4** Les différents types des cellules avec leur rendement.

## I.10 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque

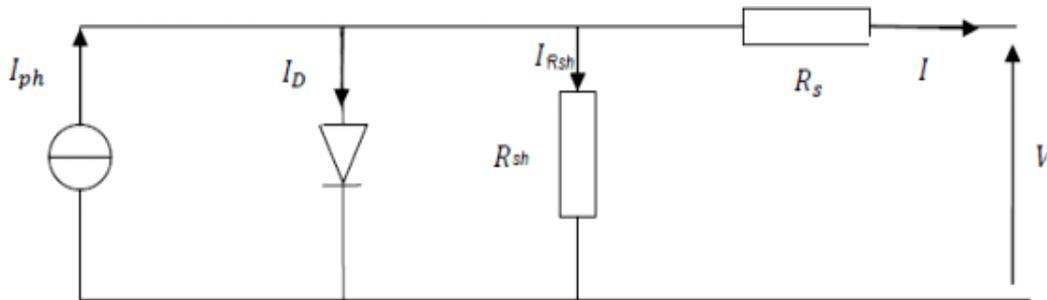
### I.9.1 Modèle électriques d'une cellule photovoltaïque :

La (**figure I.18**) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule [20] :

- Le générateur du courant ( $I_{ph}$ ) : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant Photo généré
- La résistance montée en série ( $R_s$ ) représente la résistance de contacte et de connexion (effet joule).

- La résistance shunt ( $R_{sh}$ ) montée en parallèle représente le courant de fuite.
- Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN.



**Figure I.18 :** Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad \text{Donc} \quad I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad \text{(I.1)}$$

L'expression résultante à une caractéristique courant-tension (I-V) après tout calcul est :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{V + (I \cdot R_s)}{nvt}\right) - 1 \right] - \frac{V + (I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad \text{(I.2)}$$

Les expressions de ( $I_{ph}$ ) et de ( $I_{sat}$ ) le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{ph} = [I_{sc} + (K_i \cdot (T - 298))] \cdot \frac{G}{1000} \quad \text{(I.3)}$$

$$I_{sat} = (I_s \cdot \exp\left[\left(\frac{V_{co}}{nvt}\right)\right] - 1) \cdot \left(\left(\frac{T}{298}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_g \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T}\right)}{n \cdot K}\right]\right) \quad \text{(I.4)}$$

D'ou :

$I_{ph}$  : Photo courant produit.

$I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode

$R_{sh}$  : La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.

$Vt = \frac{Kt}{q}$  = Tension thermique à la température T.

q : Charge de l'électron ( $1.602 \times 10^{-19}c$ )

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  j/k)

$K_i$  : Constante ( $1.2A/cm^2 K^3$ )

$n$  : Facteur de non idéalité de la jonction

$T$  : Température effective de la cellule en degré Kelvin

$E_g$  : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

$G$  : l'ensoleillement en  $W/m^2$

## I.10.2 Caractéristiques électriques d'une cellule

La cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres. Ces paramètres sont extraits des caractéristiques courants tensions qui permettent de comparer différentes cellules dans des conditions identiques. Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension.

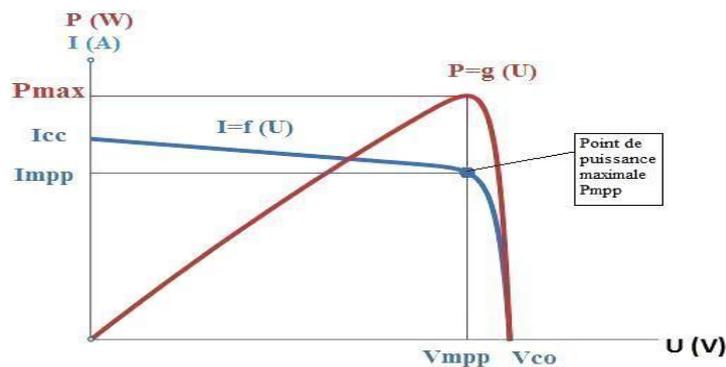


Figure I.19 caractéristiques électriques d'une cellule

Trois points sont importants sur cette courbe :

- Le point de fonctionnement à vide :  $V_{CO}$  pour  $I = 0A$
- Le point de fonctionnement en court-circuit :  $I_{CC}$  pour  $U = 0V$
- Le point de puissance maximale PMPP : c'est le point qui correspond à la puissance maximale que délivre le PV.

### I.10.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$ :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_s$  nulle et  $R_{sh}$  infinie), ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$  dans le cas

contraire, en annulant la tension  $V$  on obtient l'équation :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (\text{I.5})$$

### I.10.2 Tension à circuit-ouvert $V_{co}$ :

La tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans le dispositif PV. Elle dépend du type de cellule solaire et de l'éclairement et du type des matériaux de la couche active.

$$V_{co} = V_t \ln \left[ \frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (\text{I.6})$$

### I.10.3 Facteur de forme FF :

Le facteur de forme d'une cellule solaire dépend d'un ensemble de paramètres, il est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule il est obtenu par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{I.7})$$

### I.10.4 Le rendement de la cellule :

Le rendement d'une cellule solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule  $P_m$  à la puissance lumineuse d'incident.

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (\text{I.8})$$

$S$  : surface de la cellule en  $m^2$ .

$E$  : l'ensoleillement en  $W/m^2$ .

### I.10.5 Puissance d'une cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc....), la puissance électrique  $P(W)$  disponible aux bornes d'une cellule PV est :

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

$P(w)$  : puissance fournie par la cellule PV

$V(v)$  : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV

$I(A)$  : Intensité débitée par la cellule PV.

### I.10.6 Puissance maximale d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale  $P_{\max\text{-idéal}}$  correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :

$$P_{\max\text{-idéal}} = V_{co} \times I_{cc} \quad (I.10)$$

$P_{\max, idéal}(w)$  : La puissance fournie par la cellule PV.

$V_{co}(V)$  : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I_{cc}(A)$  : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

$$P_{\max} = V_{p\max} \times I_{p\max} \quad (I.11)$$

Ces paramètres sont importants pour caractériser les performances d'une cellule photovoltaïque et pour concevoir des systèmes photovoltaïques efficaces.

## I.11 Association de cellule photovoltaïque

### I.11.1 Association des cellules photovoltaïques en parallèle

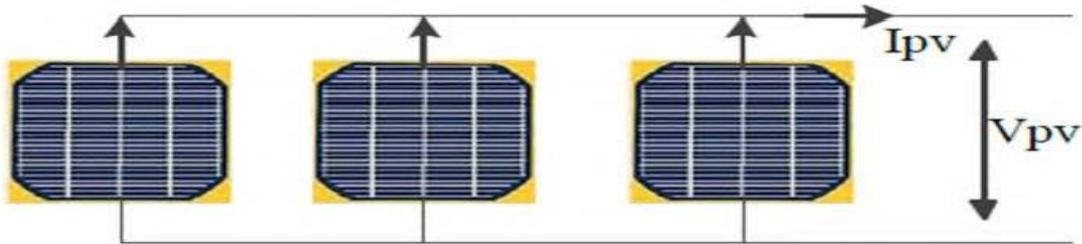
Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. L'équation (I.1) résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $N_p$  cellules. La figure (I. 20) ci-dessous montre le regroupement de  $N_p$  cellules en parallèle. [20]

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (I.12)$$

Avec :

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit.

$N_p$  : Nombre de cellules en parallèle.



**Figure I.20** : Schéma de cellules associées en parallèle.

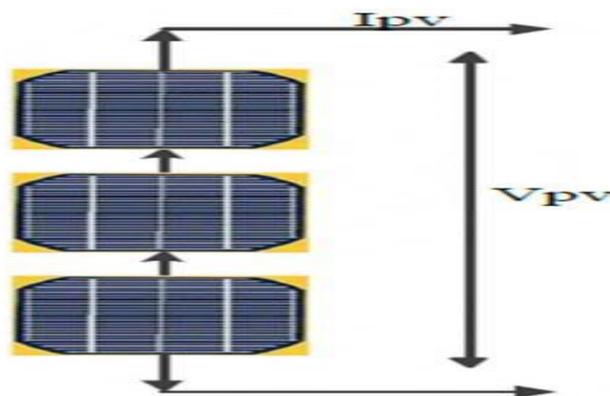
### I.11.2 Association des cellules photovoltaïques en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la Caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. L'équation (I.13) résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $N_s$  cellules. La figure (I.21) montre le regroupement de  $N_p$  cellules en série. [20]

$$V_{co} = N_s \cdot V_{co} \quad (I.13)$$

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

$N_s$  : nombre de cellules en série.



**Figure I.21** : Schéma de cellules photovoltaïques associées en série.

### I.11.3 Le module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de

quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mise en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série. [21]

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [21]



**Figure I.22 :** Module photovoltaïque

#### I.11.4 Panneau solaire

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. [22]



Figure I.23 : Panneau photovoltaïque.

## I.12 Protection des modules photovoltaïques

### A. Diode by-pass :

La mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre. Elle va s'échauffer et risque de se détruire.

En effet, une cellule "masquée" voit l'intensité qui la traverse diminuer. De ce fait, elle bloque la circulation de l'intensité "normale" produite par les autres modules. La tension aux bornes de cette cellule "masquée" augmente, d'où apparition d'une surchauffe.

Pour supprimer ce problème et protéger la cellule « masquée », on place des diodes « by-pass » en antiparallèles sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées.

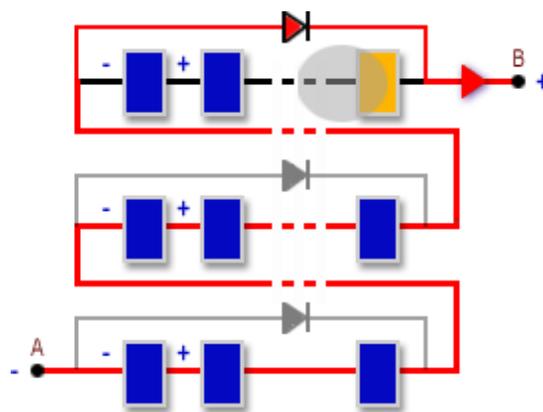


Figure I.27 Protection d'un module par diode by-pass

### B. La diode anti-retour :

Les diodes anti-retour sont utilisées lors de la mise en parallèle de plusieurs cellules et pour éviter qu'ils débitent les uns dans les autres s'ils ont une puissance inégale, ou s'ils ne reçoivent pas la même lumière ; ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

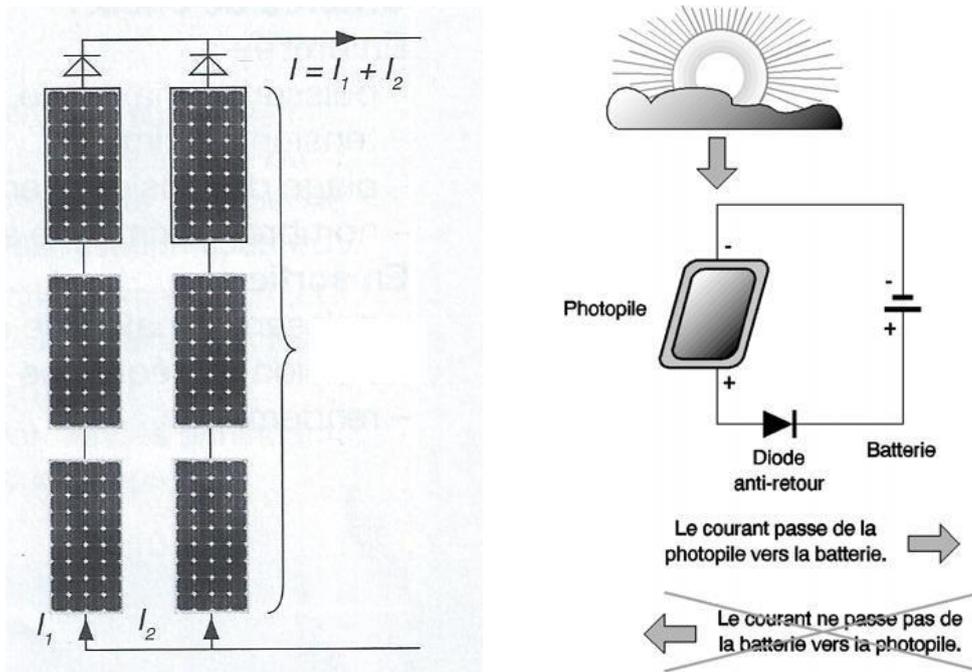


Figure I.28 Protection d'un module par diode anti-retour

## I.13 Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

### I.13.1 Les systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la

figure (I.29) qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique. Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous dans la plupart des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir)

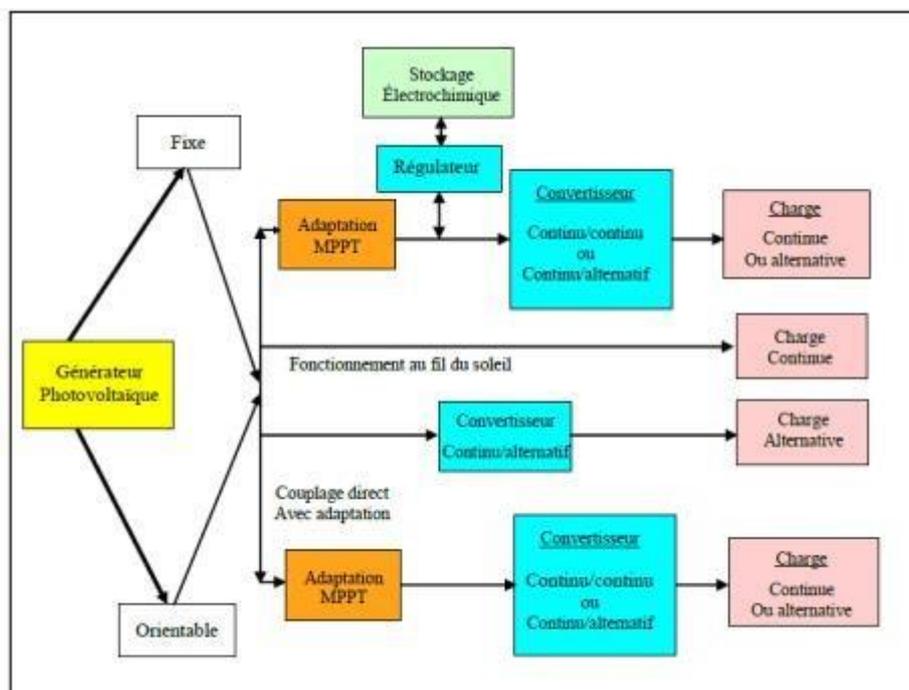
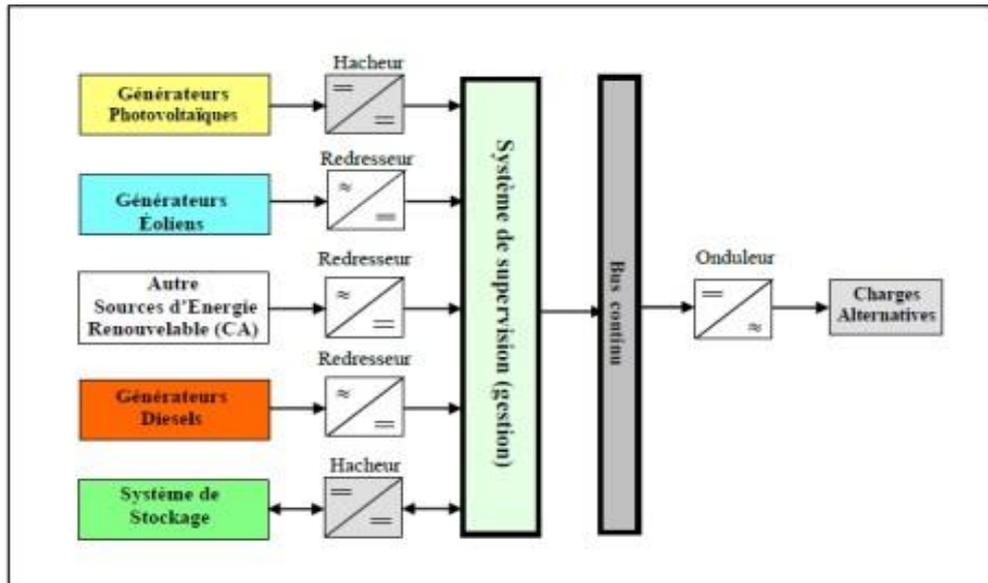


Figure I.29 : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.

### I.13.2 Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif [Abo 05], [Vec 05].



**Figure I.30 :** Configuration du système hybride à bus continu.

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu voir (figure I.30). Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être converti e ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative.

### I.13.3 Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure I.31) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau

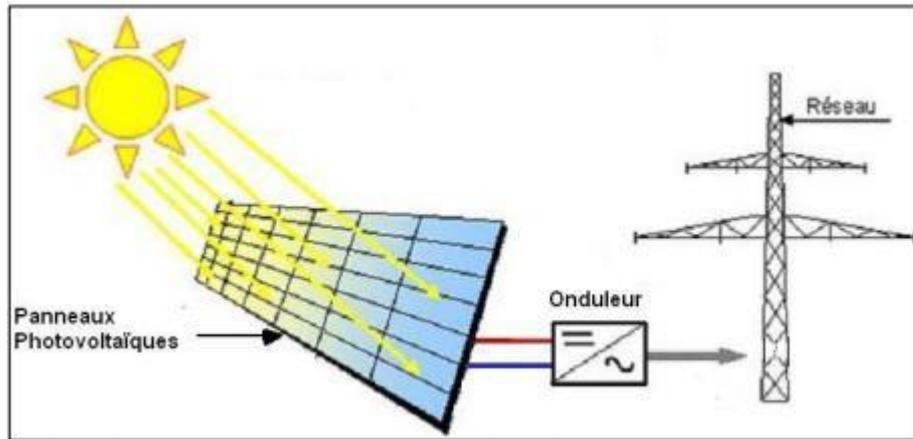


Figure I.31 : Système connecté au réseau

## I.14 Conclusion

On a vu dans ce chapitre que l'énergie renouvelable et de plus en plus très réponde dans la production mondiale de l'électricité. Nous avons décrit le photovoltaïque en Algérie, le potentiel solaire, le potentiel énergétique et les projets réalisés mis en service. Puis, nous avons procédé à la présentation des projets en cours de réalisation sur le territoire national qui couvrent différents domaines. Nous avons présenté des notions sur l'énergie solaire, rayonnements solaire et ses caractéristiques, ainsi la définition et le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque. En plus nous avons étudié le fonctionnement d'une cellule PV et en déduire son modèle mathématique. Nous avons aussi cité les différentes technologies de cellules ainsi que leurs associations afin de réaliser un générateur PV. Enfin les différents raccordements au réseau possible des panneaux solaires.

# CHAPITRE II

## MODELISATION DU SYSTEME PV ET DES TECHNIQUE MPPT

## II.1 Introduction

Le grand public a été contraint d'utiliser les énergies renouvelables ces dernières années en raison de l'augmentation de la demande énergétique mondiale et de la pollution causée par la combustion des combustibles fossiles. L'une des formes les plus importantes d'énergies renouvelables dans ce contexte est l'énergie solaire photovoltaïque.

Une partie de la lumière est directement convertie en électricité à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque. Un dispositif appelé cellule photovoltaïque (PV), qui produit une force électromotrice lorsqu'il est exposé à la lumière, effectue cette conversion. Il est basé sur un phénomène naturel connu sous le nom d'effet solaire. Selon le matériau utilisé pour fabriquer la cellule, une tension différente peut être générée.

Un générateur photovoltaïque (GPV) ayant une caractéristique de tension courante (I-V) avec un point de puissance maximum est créé en connectant un certain nombre de cellules en série et en parallèle. L'électricité générée aujourd'hui peut être utilisée directement (alimentée par une charge) ou stockée dans des batteries, selon la situation.

La modélisation et le contrôle des systèmes photovoltaïques (PV) sont devenus un domaine de recherche important ces dernières années en raison de la demande croissante pour une production d'énergie plus propre et plus durable. L'un des aspects clés de la modélisation du système PV est la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui permet d'optimiser la production d'énergie en suivant le point de puissance maximale de la cellule PV. Dans cette introduction, nous allons aborder les modélisations du système PV avec les techniques MPPT, En plus des différents types de convertisseurs statiques qui peuvent être utilisés dans le système photovoltaïque.

## II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

La modélisation d'un générateur photovoltaïque est importante pour comprendre son fonctionnement et pour optimiser sa performance. Un générateur photovoltaïque est composé de panneaux solaires qui convertissent la lumière du soleil en électricité. La modélisation du générateur photovoltaïque implique la compréhension de l'effet photovoltaïque, qui est le processus par lequel les panneaux solaires produisent de l'électricité.

La modélisation d'un générateur photovoltaïque peut être réalisée à l'aide de simulations informatiques qui prennent en compte les caractéristiques électriques et physiques des panneaux solaires ainsi que les conditions environnementales. Ces simulations peuvent être utilisées pour évaluer la performance d'un générateur photovoltaïque dans différentes conditions météorologiques et pour optimiser sa conception en fonction des besoins spécifiques.

La modélisation d'un générateur photovoltaïque peut également être utilisée pour prévoir la production d'énergie solaire dans une région donnée, ce qui est utile pour planifier l'intégration de l'énergie solaire dans un réseau électrique. Les modèles peuvent également être utilisés pour évaluer les coûts et les avantages de l'utilisation de l'énergie solaire dans différents scénarios.

En somme, la modélisation du générateur photovoltaïque est un outil important pour comprendre le fonctionnement de l'énergie solaire et pour optimiser la performance des installations photovoltaïques. Elle permet de prédire la production d'énergie solaire, de planifier l'intégration de l'énergie solaire dans un réseau électrique et de maximiser l'utilisation de cette source d'énergie renouvelable.

Il existe plusieurs modèles pour modéliser un générateur photovoltaïque, mais les deux modèles les plus couramment utilisés sont le modèle à deux diodes et le modèle à une seule diode.

Le modèle à une seule diode est le plus simple des deux modèles. Il utilise une seule diode pour représenter le comportement non linéaire des panneaux solaires et prend en compte la résistance série interne des panneaux solaires. Ce modèle permet de calculer le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert, qui sont deux des paramètres importants pour caractériser la performance d'un générateur photovoltaïque.

Le modèle à deux diodes est plus complexe et prend en compte les pertes de recombinaison et les pertes de conduction dans les panneaux solaires. Il utilise deux diodes pour modéliser les pertes de recombinaison et une résistance shunt pour représenter les pertes de conduction. Ce modèle est plus précis que le modèle à une seule diode et peut être utilisé pour simuler les performances des panneaux solaires dans différentes conditions environnementales.

En somme, le choix entre le modèle à une seule diode et le modèle à deux diodes dépend des besoins spécifiques de l'utilisateur. Le modèle à une seule diode est plus simple et plus rapide à utiliser, tandis que le modèle à deux diodes est plus précis mais plus complexe.

### **II.3 Générateur photovoltaïque(GPV)**

Un générateur photovoltaïque est l'association de plusieurs modules qui se constituent de plusieurs cellules photovoltaïques, connectées en série/parallèle. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera. [23]

#### **II.3.1 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)**

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [24]

### **II.4 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=F(V)$ et $P(V)$**

L'éclairement et la température sont deux des facteurs les plus importants qui influencent les caractéristiques du générateur photovoltaïque (PV). En effet, ces paramètres ont un impact direct sur les courbes I-V (intensité en fonction de la tension) et P-V (puissance en fonction de la tension) du générateur PV.

L'éclairement est la quantité de lumière solaire disponible à la surface du module PV. Plus l'éclairement est élevé, plus la production d'électricité sera importante. La variation de l'éclairement a un impact direct sur la courbe I-V du module PV. En effet, à mesure que l'éclairement augmente, la courbe I-V se déplace vers le haut, ce qui se traduit par une augmentation de l'intensité de court-circuit et de la tension de circuit ouvert

#### **II.4.1 Influence de l'Éclairement**

Les figures (II.1) et (II.2) présentons un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement : Nous avons fixé la température pour différents éclairements.

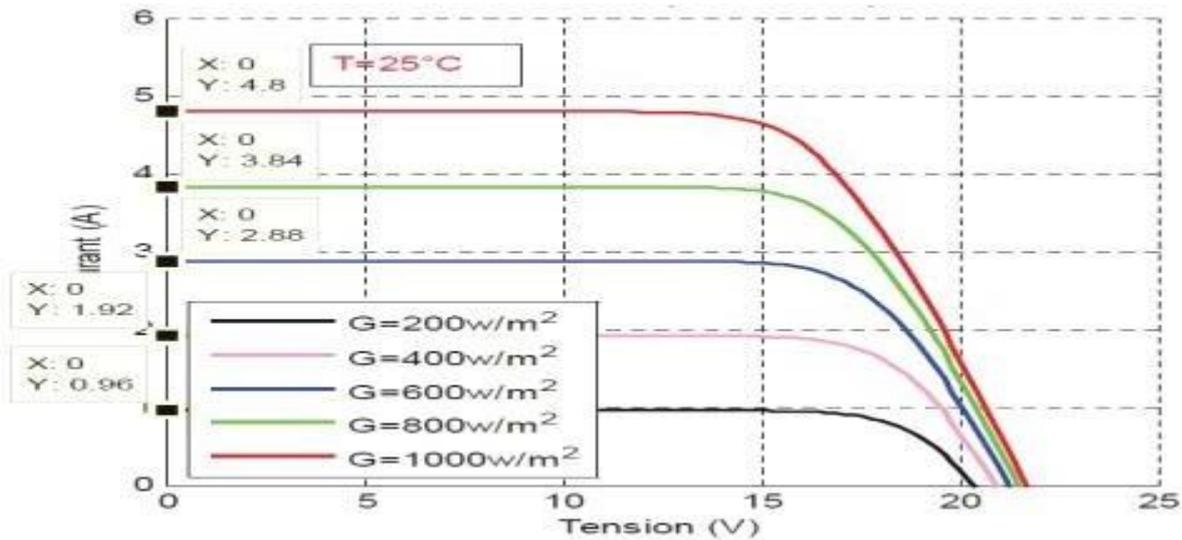


Figure II.1 : La caractéristique  $I=f(v)$  en fonction de l'éclairement [25].

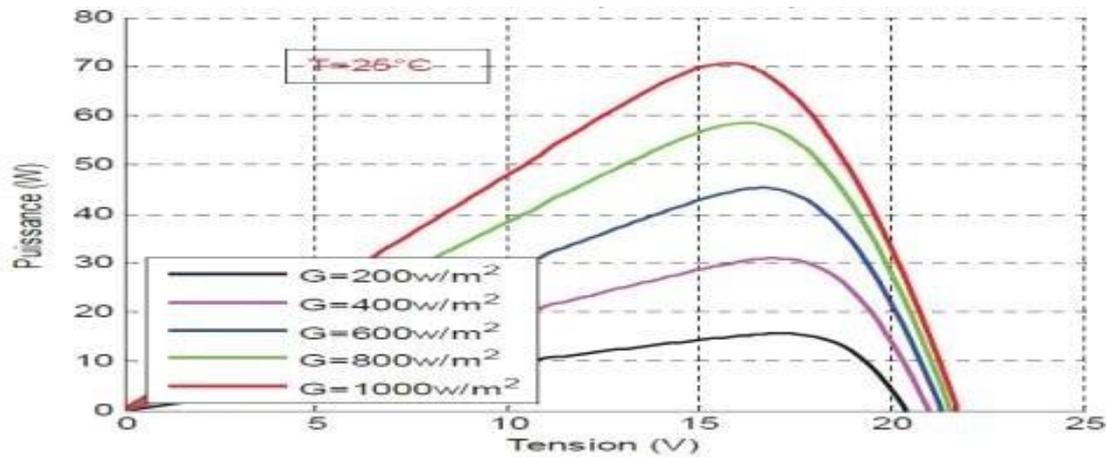
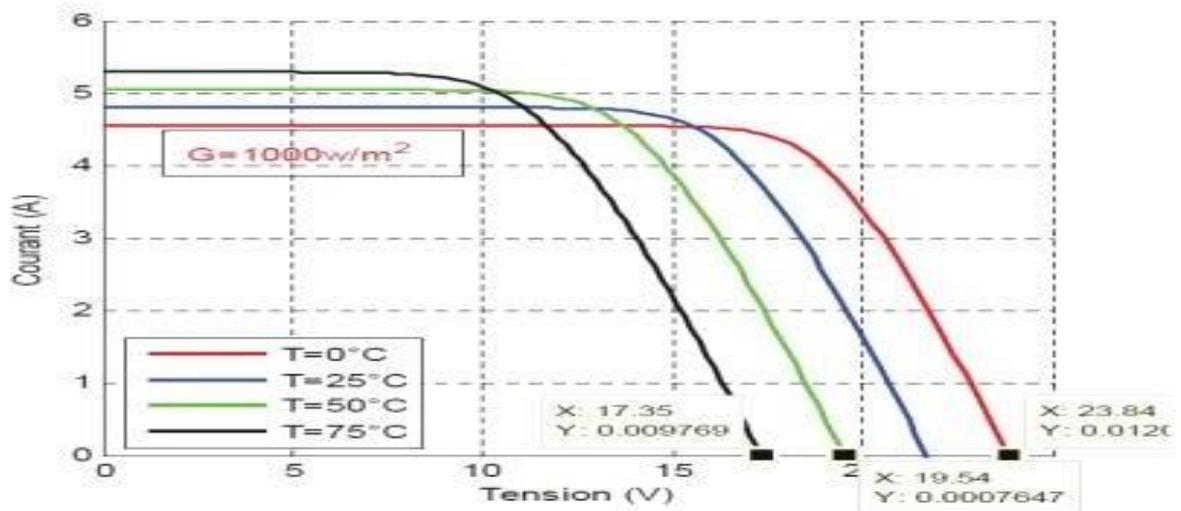


Figure II.2 : La caractéristique  $P=f(v)$  en fonction de l'éclairement [25].

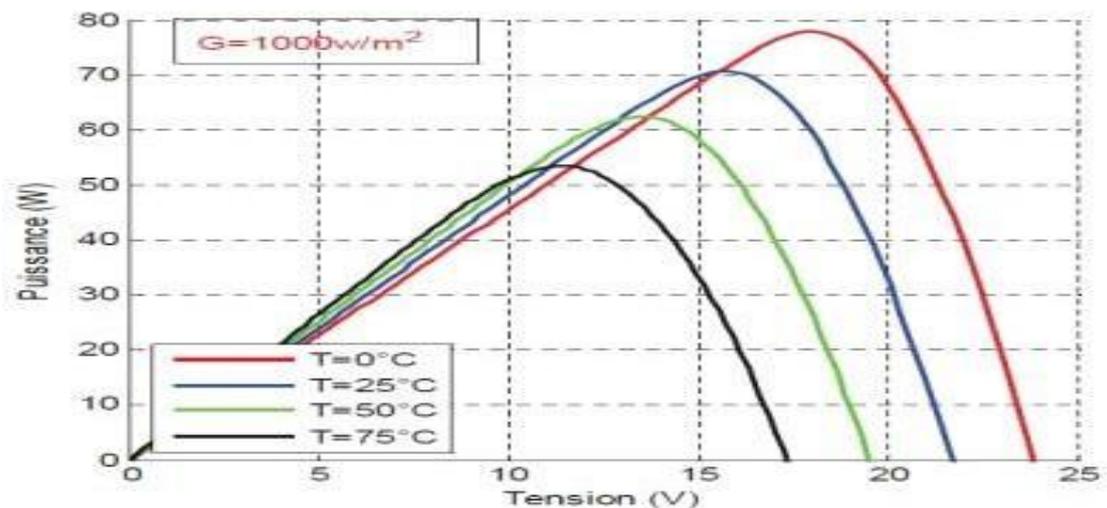
Pour la figure II.1 on remarque que pour l'éclairement  $G=1000 \text{ w/m}^2$  le courant  $I_{sc}=4.8\text{A}$  et pour  $G=800\text{w/m}^2$  le courant  $I_{sc}=3.84\text{A}$ . On peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit augmente, mais par contre la tension varie légèrement.

#### II.4.2 Influence de la Température

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V figure (II.3) et (II.4) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement  $G$  donné et pour différentes températures :



**Figure II.3 :** La caractéristique de  $I=f(V)$  en fonction de température [25].



**Figure II.4 :** La caractéristique de  $P=f(V)$  en fonction de température [25].

Pour la figure II.3 Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le Courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure II.4.

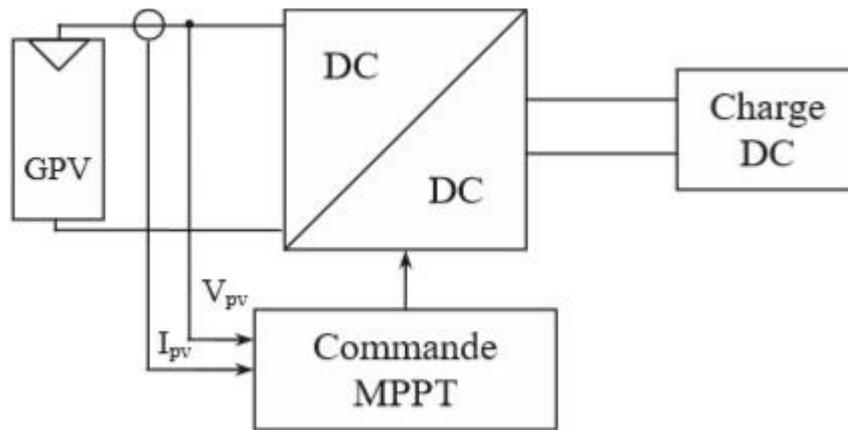
## II.5 Étage d'adaptation d'un générateur photovoltaïque à la charge

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion

très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie [26]

### II.5 .1 Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC

La Figure II.5 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie [27]. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stock d'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension (ballast...). Cet étage d'adaptation dispose d'une commande Maximum Power Point Tracking (MPPT) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé. De nombreuses recherches sur les commandes MPPT ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche de PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Les commandes MPPT développées au LAAS, par exemple, sont toutes basées sur une commande extrême de type Perturbé & Observe (P&O). Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes de commandes extrêmes présentant plus ou moins de précisions. A partir de l'évaluation ou de la mesure de la puissance fournie par le générateur, ces commandes utilisent le rapport cyclique du convertisseur de puissance (CS) pour appliquer une action de contrôle adéquate sur l'étage et pour suivre l'évolution au cours du temps du PPM. Un grand nombre de ces commandes ont l'avantage d'être précises et d'avoir une grande rapidité de réaction mais souffrent encore d'un manque d'optimisation de leur algorithme parfois trop complexe et consommant alors trop d'énergie.



**Fig. II.5** Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC Contrôlé par une commande MPPT sur charge DC [27].

### II.5.2 Circuit d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et la charge

Lorsqu'un générateur photovoltaïque est directement connecté à une charge, il y a souvent une incompatibilité entre la tension de sortie et le courant de la charge et les caractéristiques du générateur. En effet, la tension et le courant du générateur peuvent varier en fonction de la luminosité et de la température, tandis que la charge peut avoir une tension et un courant de fonctionnement fixes. Cette incompatibilité peut entraîner une perte d'efficacité, une baisse de la production d'énergie ou même une défaillance du système.

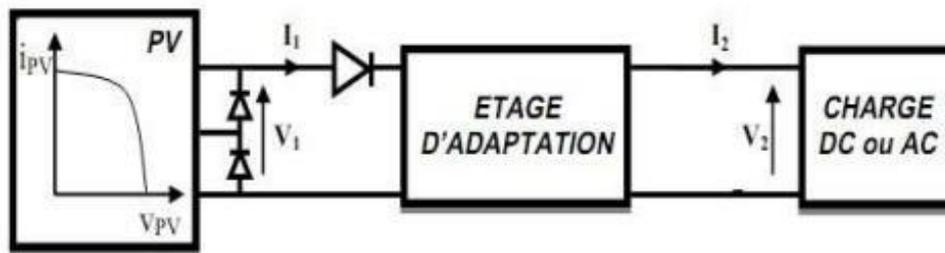
Un circuit d'adaptation est un ensemble de composants électroniques qui sont utilisés pour résoudre ce problème. Le circuit d'adaptation est constitué d'un convertisseur DC/DC et d'un convertisseur DC/AC.

Le convertisseur DC/DC est un composant électronique qui permet de convertir la tension du générateur PV en une tension adaptée à la charge. Par exemple, si la tension de sortie du générateur est plus élevée que la tension requise par la charge, le convertisseur abaisse la tension à un niveau approprié pour la charge. Si la tension de sortie du générateur est inférieure à la tension requise par la charge, le convertisseur augmente la tension à un niveau approprié pour la charge. Le convertisseur DC/DC est également utilisé pour ajuster le courant du générateur PV en fonction du courant de la charge.

Le convertisseur DC/AC est un composant électronique qui permet de convertir le courant continu produit par le générateur PV en courant alternatif utilisé par la charge. Si la charge nécessite un courant alternatif, le convertisseur DC/AC est essentiel. Le convertisseur DC/AC peut également être utilisé pour synchroniser le courant produit par le générateur PV avec le

réseau électrique, afin que le courant produit par le générateur PV puisse être utilisé localement ou vendu sur le réseau électrique.

En utilisant un circuit d'adaptation, la production d'énergie du générateur PV peut être optimisée et la compatibilité entre la charge et le générateur peut être assurée. Cela permet de maximiser l'efficacité du système, d'augmenter la production d'énergie et d'améliorer la durée de vie du système, figure (II.6).



**Figure. II.6 :** Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation

## II.6 Type des hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [28].

Les convertisseurs DC-DC sont classés en deux types : les convertisseurs non isolés et les convertisseurs isolés de la source. [29]

a) Non isolés de la source :

Quatre configurations de base sont :

- Convertisseur abaisseur « BUCK »
- Convertisseur élévateur « BOOST »
- Convertisseur abaisseur- élévateur « BUCK-BOOST »
- Convertisseur « SEPIC », « Cuk »

b) Isolés de la source : Comme le convertisseur « Fly-back »

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions et la topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Il existe aussi des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles

que le Buck-Boost, le Cuk, et le Sepic. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC. [29]

**II.6.1. Hacheur Buck**

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur Buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant.

L'interrupteur K figure (II.7) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [30].

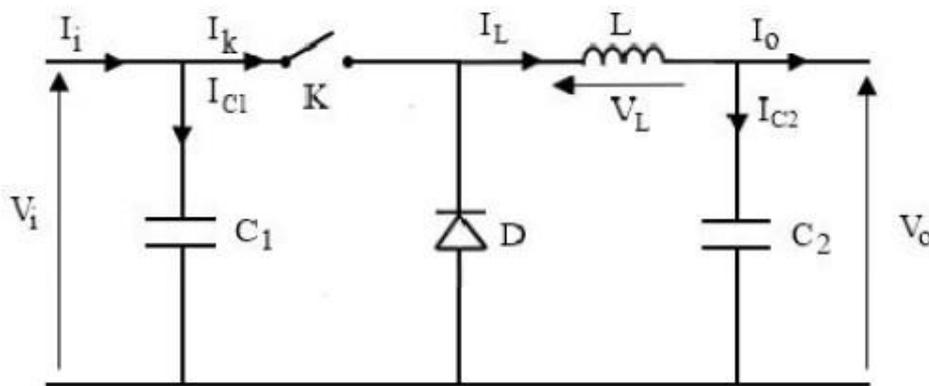


Figure II.7 : Schéma électrique d'un hacheur Buck pour K ouvert.

**II.6.1.1. Fonctionnement**

On note  $\alpha$  : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur K.

$T_e$  : étant la période des impulsions.

$f_e = \frac{1}{T_e}$  est la fréquence de découpage de l'interrupteur K

- Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée ( $\alpha T_e$ ), la source  $V_i$  fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance.
- Pendant le temps  $t \in [\alpha T_e, T_e]$  l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [30].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure (II.8) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on considère que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [30].

$$V_0 = \alpha V_i \quad \left. \vphantom{V_0 = \alpha V_i} \right\} \quad \text{II.1}$$

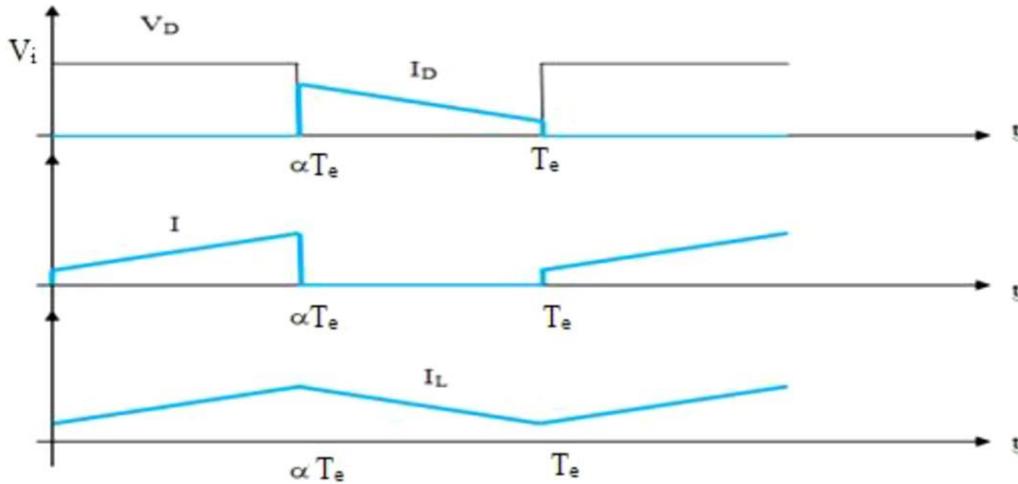


Figure II.8 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck.

**II.6.1.2. Modèle mathématique équivalent**

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (II.9) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur K fermé, tandis que la figure (II.10) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant (1-  $\alpha$ )  $T_e$  [30].

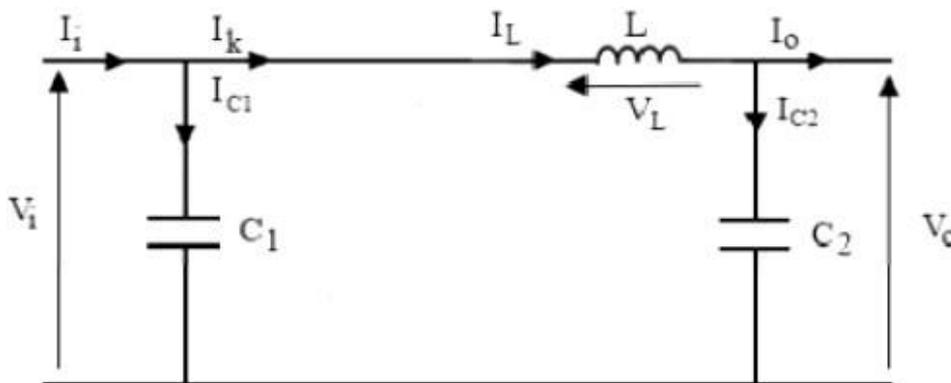


Figure II.9 : Schéma électrique d'un hacheur Buck pour K fermé.

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus (K fermé) on aura les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 I_{c1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\
 I_{c2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{II.2}$$

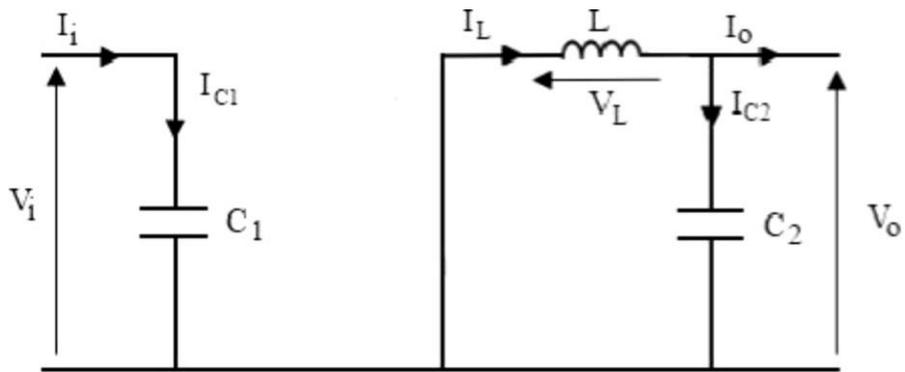


Figure II.10 Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert.

Lorsque K est ouvert on aura le système d'équations suivant :

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \\
 I_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{II.3}$$

### II.6.2. Hacheur Boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K figure II.11 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [30] ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.12).

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

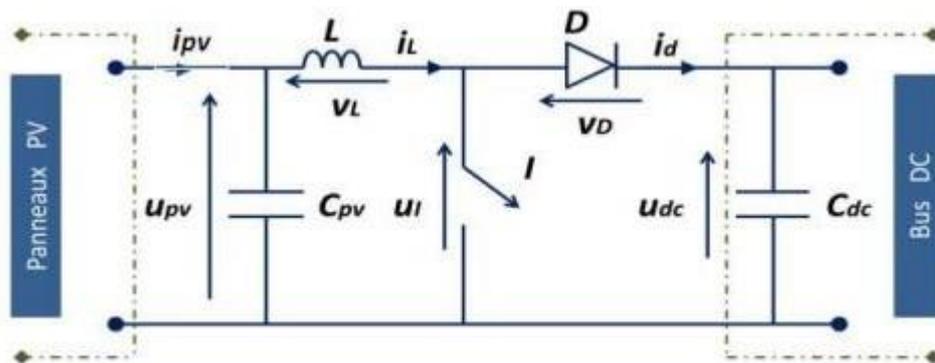


Figure II. 11 : Schéma électrique d'un hacheur Boost.

- L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source.

- La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

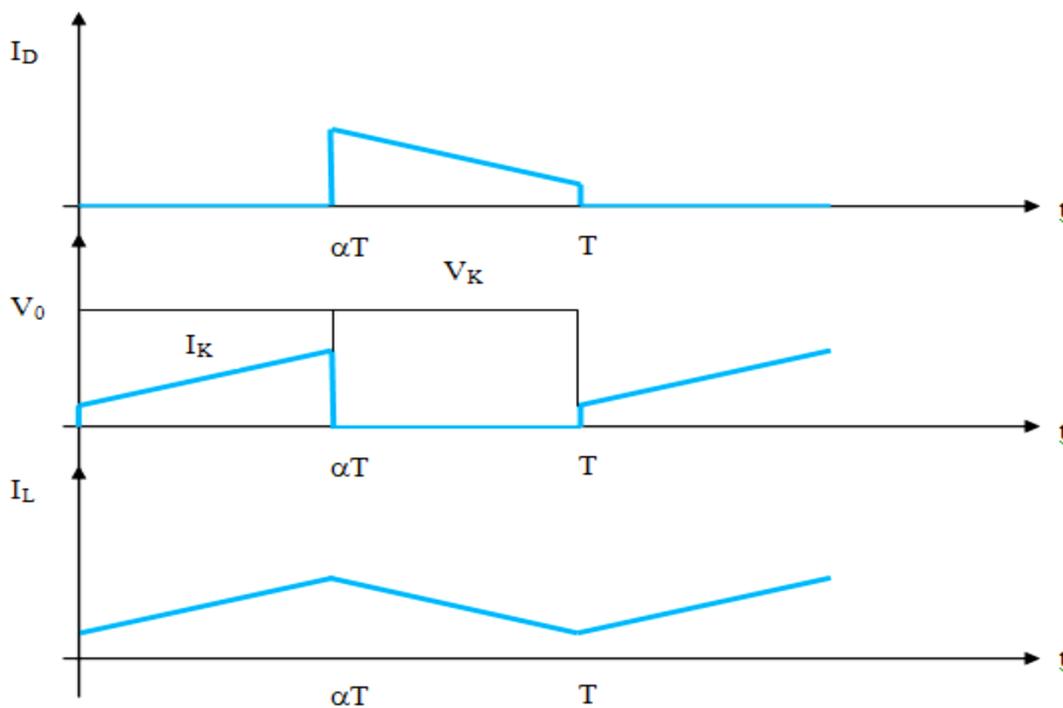
Au premier temps ( $\alpha T$ ), l'interrupteur (I) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. L'interrupteur (I) s'ouvre et l'inductance (L) s'oppose à la diminution de courant ( $i_L$ ) et génère une tension qui s'ajoutera à la tension de source.

**II.6.2.1. Fonctionnement**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D.

Sachant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [30]

$$V_0 = \frac{V_i}{1-\alpha} \quad \text{II.4}$$



**Figure II.12 :** Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost.

**II.6.2.2. Modèle mathématique équivalent**

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions de l'hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. La figure (II.13) présente le circuit équivalent du Boost lorsque K est fermé c.-à-d. d'entre  $[0, \alpha T_e]$  [30].

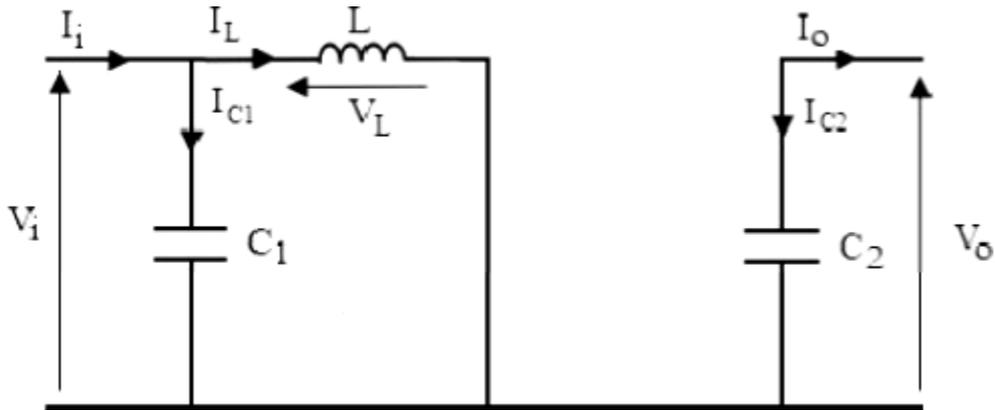


Figure II.13 : Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé.

Comme pour le circuit Buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent le système d'équation suivante :

$$\left. \begin{aligned} IC1(t) &= C1 \frac{dvi(t)}{dt} = Ii(t) - IL(t) \\ IC2(t) &= C2 \frac{dvo(t)}{dt} = -Io(t) \\ VL(t) &= L \frac{dIL(t)}{dt} = Vi(t) \end{aligned} \right\} \text{II.5}$$

Pour l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :

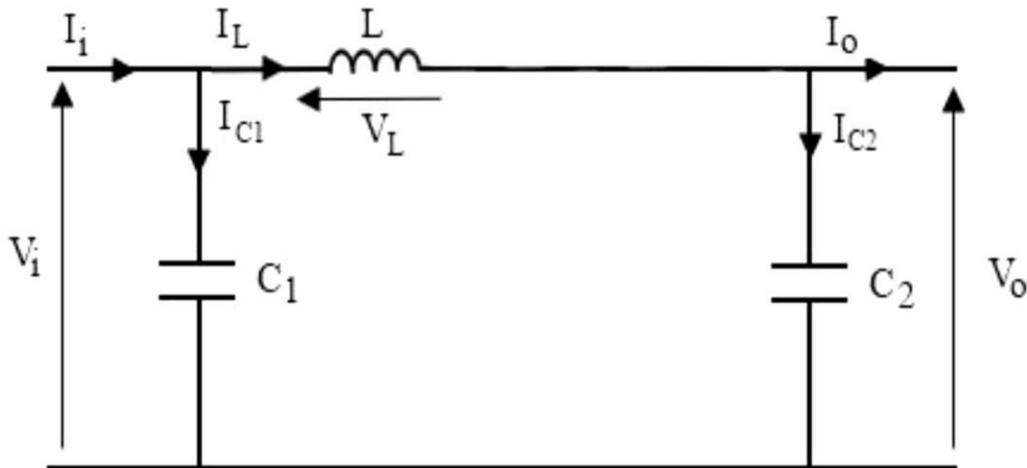


Figure II.14 : Schéma électrique d'un hacheur Boost ouvert.

$$\left. \begin{aligned} IC1(t) &= C1 \frac{dvi(t)}{dt} = Ii(t) - IL(t) \\ IC2(t) &= C2 \frac{dvo(t)}{dt} = IL(t) - Io(t) \\ VL(t) &= L \frac{dIL(t)}{dt} = Vi(t) - Vo(t) \end{aligned} \right\} \text{II.6}$$

**II.6.3. Hacheur Buck – Boost**

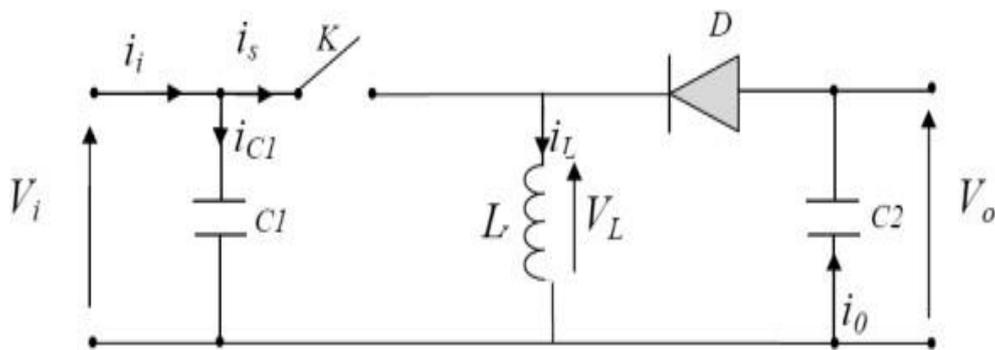
La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la figure II.15. Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off). La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

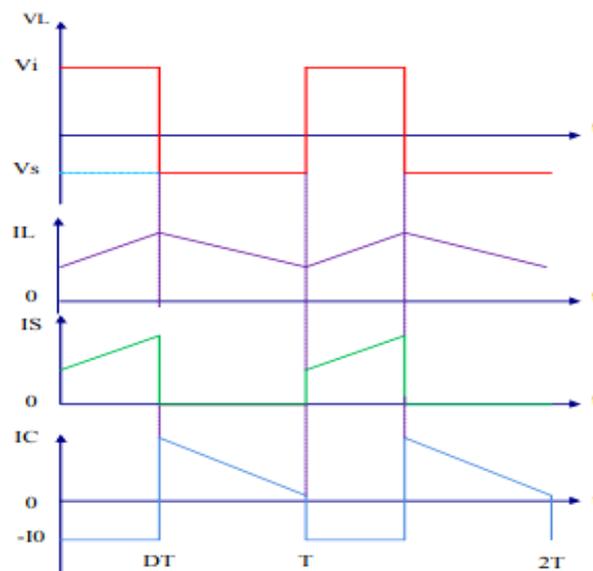
Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit [29] :

$$V_o = \frac{\alpha}{\alpha-1} V_i \quad \text{II.7}$$

Le courant et de la tension de charge sont données par la figure II.16



**Figure II.15 :** Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur.



**Figure II.16 :** Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost.

## II.7. Commande MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [13].

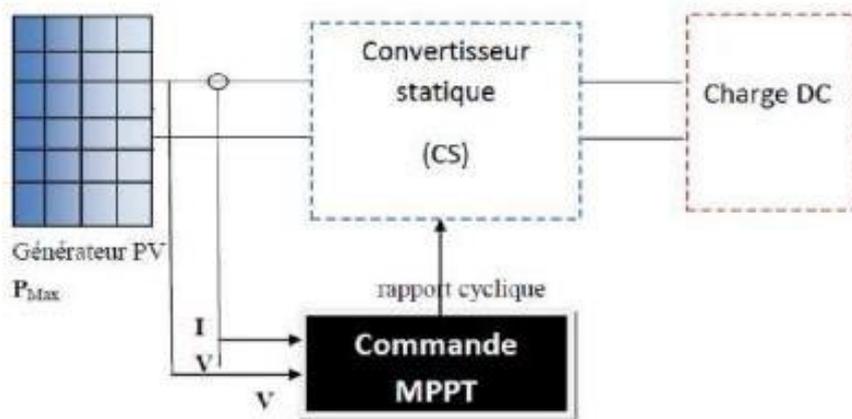
La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application.

### II.7.1. Principe du MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement

Maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ) [13].

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure II.17.



**Figure II. 17 :** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement

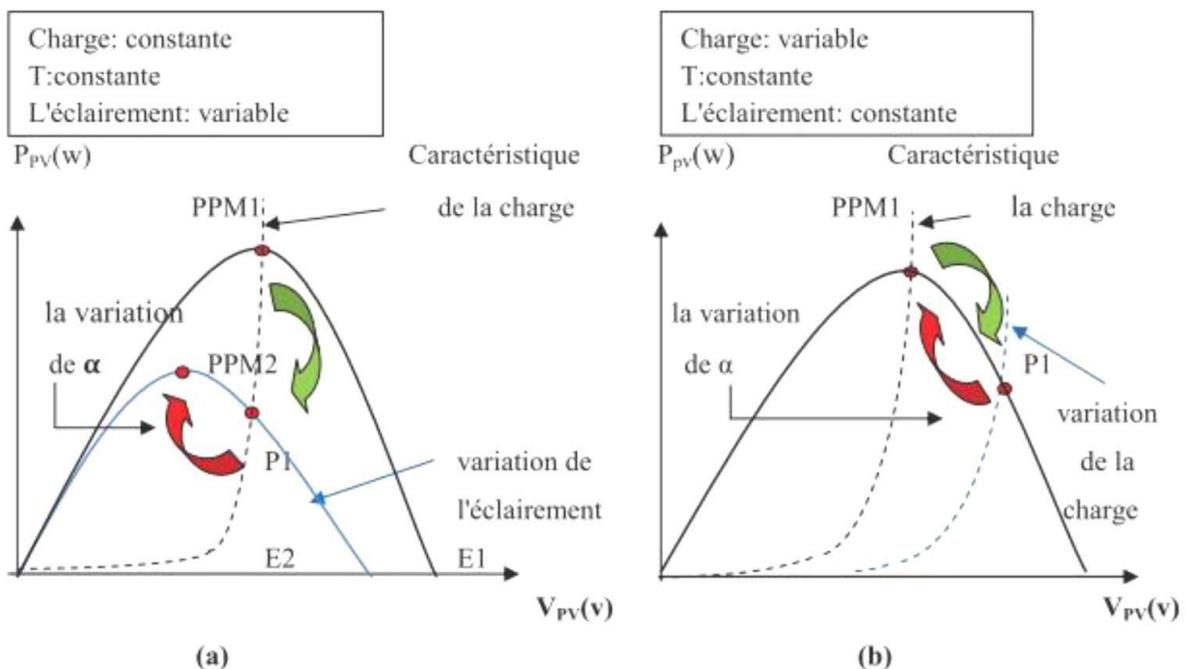
qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

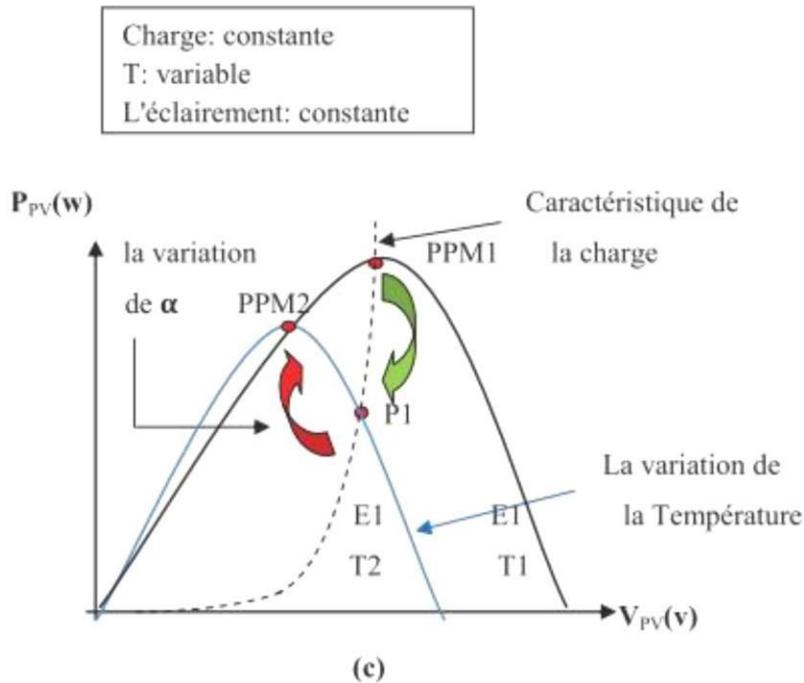
La figure (II.18) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

- Pour une variation d'ensoleillement (cas a), Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.
- Variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.
- Pour une variation de charge (cas b) ; on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumé, le suivi du PPM réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV.

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [11].





**Figure II.18:** Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale

- a) Suite à une variation d'éclairement,
- b) Suite à une variation de charge,
- c) Suite à une variation de température.

### II.7.2 Critères de sélection de la technique MPPT

Le choix d'un MPPT (Maximum Power Point Tracking) dépend de plusieurs critères. On peut citer parmi ces critères les plus importants à prendre en compte lors de la sélection d'un MPPT :

- Puissance de la charge : Le MPPT doit être capable de fournir suffisamment de puissance pour la charge. Il est important de sélectionner un MPPT qui peut gérer la puissance nominale de la charge.
- Tension de la batterie : Le MPPT doit être compatible avec la tension de la batterie utilisée dans le système. Il est important de choisir un MPPT qui peut gérer la tension nominale de la batterie.
- Tension et courant du générateur PV : Le MPPT doit être capable de gérer la plage de tension et de courant du générateur PV. Il est important de choisir un MPPT qui peut fonctionner dans la plage de tension et de courant du générateur PV.

- Efficacité : L'efficacité du MPPT est un critère important car elle détermine la quantité d'énergie perdue dans le système. Il est important de choisir un MPPT qui a une efficacité élevée pour maximiser la production d'énergie.
- Stabilité : La stabilité du MPPT est importante pour assurer un fonctionnement fiable du système. Il est important de choisir un MPPT qui est stable dans toutes les conditions de fonctionnement.
- Coût : Le coût du MPPT est un facteur important à prendre en compte. Il est important de sélectionner un MPPT qui convient au budget du projet.
- Facilité d'installation et d'utilisation : La facilité d'installation et d'utilisation du MPPT est importante pour réduire les coûts d'installation et de maintenance. Il est important de sélectionner un MPPT qui est facile à installer et à utiliser.

En résumé, la sélection d'un MPPT dépend de plusieurs critères, notamment la puissance de la charge, la tension de la batterie, la plage de tension et de courant du générateur PV, l'efficacité, la stabilité, le coût et la facilité d'installation et d'utilisation. Il est important de choisir un MPPT qui répond aux besoins spécifiques du système et qui est compatible avec les autres composants du système.

## II.8 Les différents algorithmes de contrôle MPPT

Il existe de nombreux algorithmes [8], utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Ces techniques sont classées en deux grandes catégories qui sont les techniques conventionnelles et les techniques intelligentes. Ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées. Dans cette partie, on présentera l'aspect théorique de quelques méthodes (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque.

### II.8.1 Technique MPPT conventionnelles

La méthode de courant fractionnel (Fractional Short-Circuit Current FSOC).

La méthode de tension fractionnelle (Fractional Open -Circuit Voltage FOVC).

La méthode P&O (perturber et observer)

La méthode de conductance incrémentale (Incremental Conductance)

Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients, et le choix de la méthode dépend des spécifications du générateur PV et de la charge. Parmi ces techniques MPPT classiques ; dans ce travail on va s'intéresser aux deux dernières méthodes (P&O) et la méthode conductance incrémentale.

### a- Algorithme perturbation et observation (P&O)

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC,), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (D). Si la valeur de la puissance actuelle du générateur est supérieure à la valeur précédente alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent, voir figure II.19.

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la Figure II.20 [8].

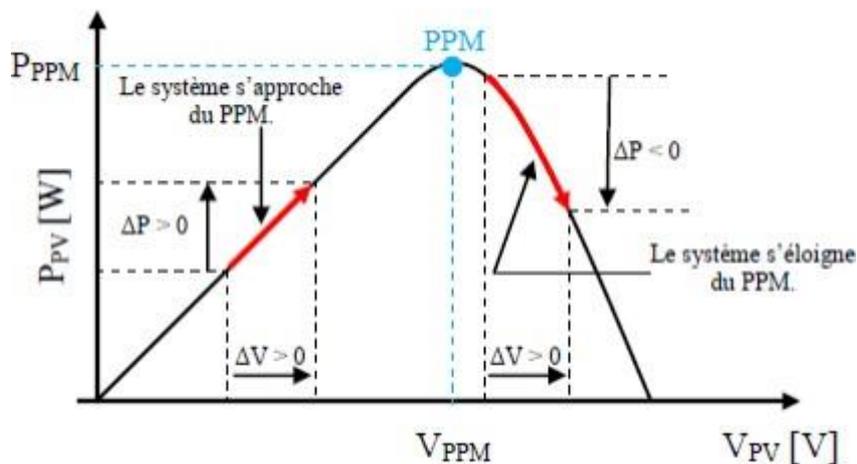
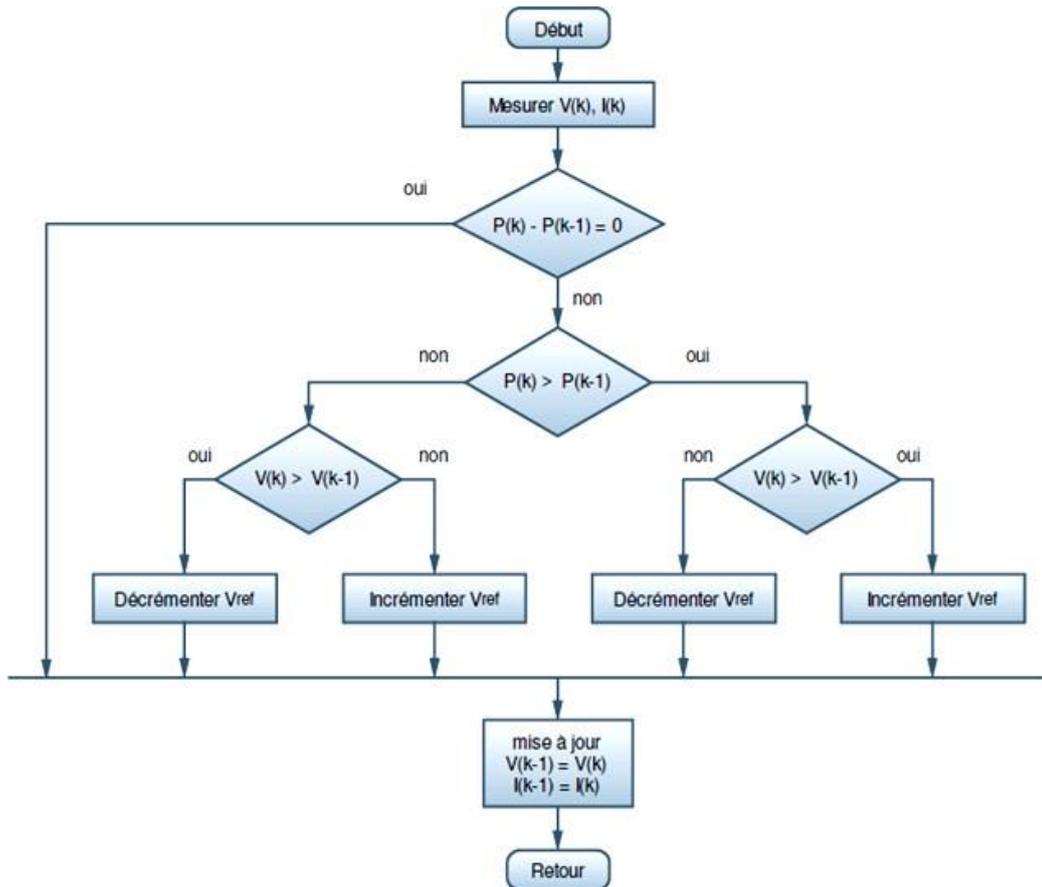


Figure II.19 : Principe de la méthode perturbation et observation



**Figure II.20 :** Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).

Cependant, la méthode P&O présente l'inconvénient que, si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [31].

### **b- Algorithme incrémentation de la conductance**

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes [32] :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad \left. \vphantom{\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}} \right\} \text{II. 8}$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad \left. \vphantom{\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}} \right\} \text{II.9}$$

$\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  : représente la conductance instantanée du panneau photovoltaïque.

$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$  : représente le terme d'incrémentatation de conductance [33].

On définit la conductance de la source et incrémentatation de la conductance puisque la tension V du panneau est toujours positive, la relation (II.9) explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source est égale à l'incrémentatation de la conductance de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure à l'incrémentatation de la conductance et vice-versa [8], comme suit :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dp}{dv} > 0 \quad \dot{s} \quad \frac{1}{V} > -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dp}{dv} = 0 \quad si \quad \frac{1}{V} = -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dp}{dv} < 0 \quad \dot{s} \quad \frac{1}{V} < -\frac{dI}{dV} \end{array} \right\} \text{II.10}$$

D'où l'organigramme représenté par la figure suivante :

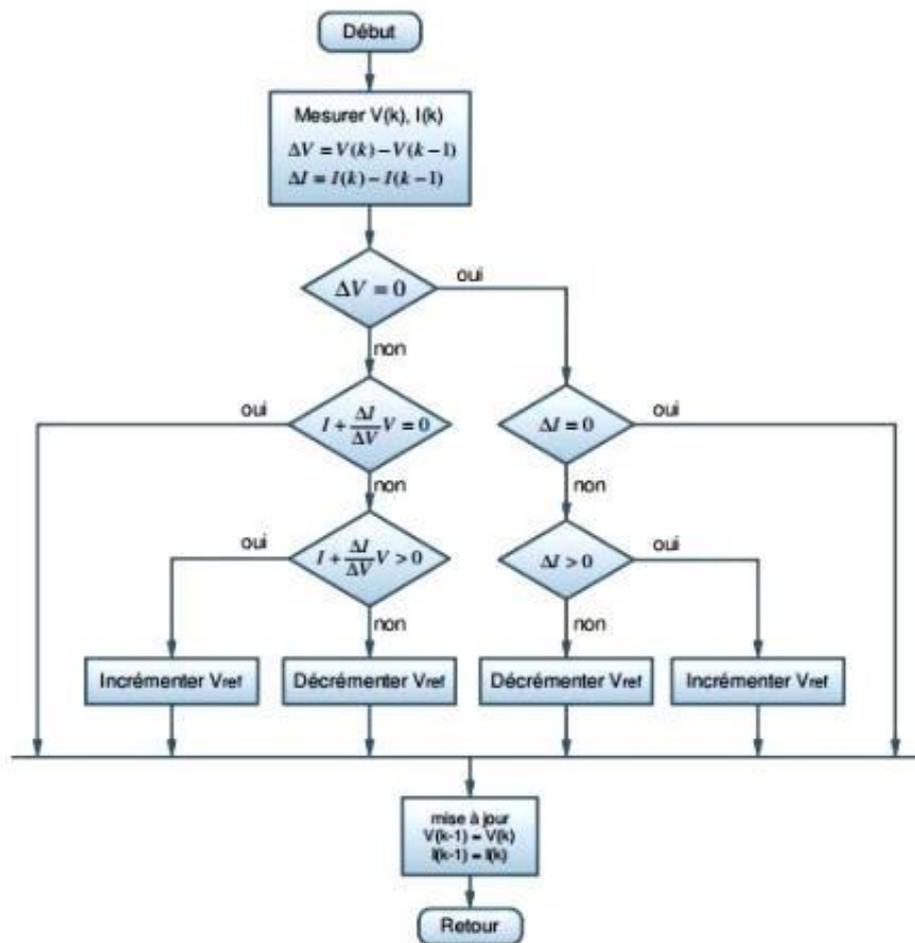


Figure II.21 : Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance

## II.8.2 Techniques MPPT intelligentes

### II.8.2.1 MPPT à base de logique floue

La logique floue (Fuzzy Logic) est une borne de l'intelligence artificielle tout comme les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques. Au cours de cette dernière décennie, un nombre important de travaux et d'articles scientifiques ont été associés à la commande floue afin d'augmenter le rendement des panneaux photovoltaïques, ainsi que des études comparatives avec les techniques citées précédemment (P&O et IC).

#### a- Principe de la logique

La logique floue est une technique opérationnelle dans le contrôle avancé qui fait une entrée discrète, mais appréciée par les automaticiens, dans de contrôle industriel. Notamment la commande par logique floue a été utilisée dans des systèmes de poursuite de puissance maximale. Et comme bonus, elle présente l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer même si elle nécessite l'expertise humaine et une bonne connaissance modèle à réguler [16]. Le principe de la commande a pour le but d'obtenir une

loi de commande efficace à partir d'une description linguistique qualitative du système. Etudier un tel problème par des méthodes classiques exige souvent des notions avancées en mathématique, cette étude est souvent entachée des erreurs et des imprécisions qui accompagnent la modélisation. La commande floue exploite des connaissances et des expériences acquises par l'opérateur à l'aide des règles basées sur un vocabulaire symbolique. Donc l'idée de la logique floue et de transmettre cette richesse de raisonnement humain à un ordinateur. Cette logique peut être considérée comme une technique puissante pour le traitement de connaissances incertaines, prenant comme exemple des mots ou des expressions naturelles telle que froid, tiède, chaud...etc.

Le principe général et la théorie de base de la logique floue est la description d'un phénomène qui contient en général des expressions floues comme : Chaude, froid. Rapide, lent. Grand, moyen, petit. Max, min. Positive, nulle, négative...etc. Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont : Les variables linguistiques, les ensembles flous et les fonctions d'appartenance.

#### b- Structure d'une commande floue

Le contrôleur flou comporte les trois blocs suivants :

- Le premier module traite les entrées du système, cette étape est appelée la fuzzification, elle consiste à attribuer à la valeur réelle de chaque entrée, au temps  $t$ , sa fonction d'appartenance à chacune des classes préalablement définies, donc à transformer l'entrée réelle en un sous-ensemble flou.
- Le deuxième module consiste en l'application des règles. Ce module est constitué d'une base de règle et d'un moteur d'inférence qui permet le calcul.
- Le troisième module décrit l'étape de défuzzification qui est la transformation inverse de la première. Il permet de passer d'un degré d'appartenance à la détermination de la valeur exacte.

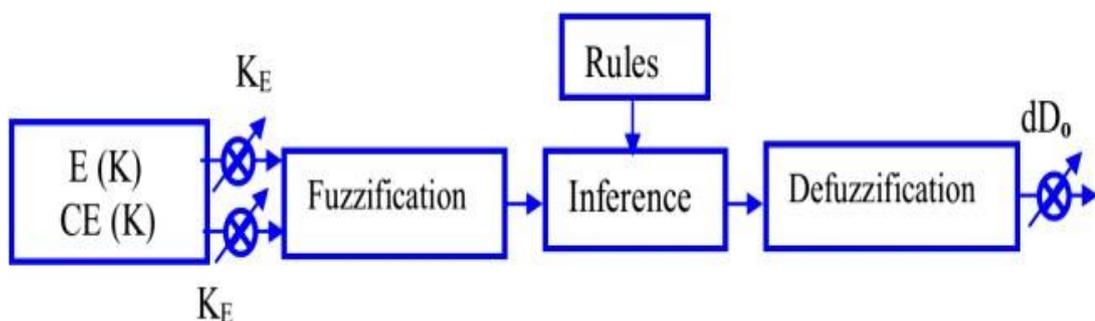


Figure II.22 : Schéma synoptique général d'un contrôleur floue.

On procède tout d'abord à la partition en sous-ensembles flous des différents univers de discours (ou référentiels) que le système impose. Ensuite on détermine la base de règles qui va caractériser le fonctionnement désiré du système. Puis il faut transformer les variables réelles, c'est à dire celles qui ont une réalité physique, en variables floues. C'est l'étape de la fuzzification.

On utilise alors ces variables floues dans un mécanisme d'inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie en utilisant les opérations sur les fonctions d'appartenance.

Enfin, on opère à la défuzzification qui consiste à extraire une valeur réelle de sortie à partir de la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou de sortie établi par le mécanisme d'inférence. Calcul de la variation de cette commande est par les étapes suivantes :

- **Fuzzification**

La commande est déterminée sur la base de la satisfaction de deux critères concernant deux variables d'entrées de contrôleur proposé, à savoir l'erreur(E) et le changement d'erreur(CE), à un instant d'échantillonnage k.

Les variables E et la CE sont exprimés comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad \} \quad \text{II.11}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad \} \quad \text{II.12}$$

Où P(k) et V(k) sont la puissance et la tension de module PV, respectivement. Par conséquent, E(k) est zéro au point de puissance maximale du module PV. Ces variables d'entrée sont exprimées en termes de variables ou étiquettes linguistiques telles que le GP (grand positif), PP (petit positif), Z0 (zéro), PN (petit négatif), GN (grands négatifs) en employant les sous-ensembles flous de base [29].

- **Méthode d'inférence**

Le tableau 2.1 montre les règles du contrôleur flou, ou toutes les entrées de la matrice sont les ensembles flous de l'erreur (E), le changement de l'erreur (CE) et le changement du rapport cyclique (dD) du convertisseur. Dans le cas de la commande floue, la règle de la commande doit être conçue pour que la variable d'entrée E doit toujours être zéro.

Les règles de contrôle sont indiquées dans le tableau 2.1 avec E et CE comme entrées et D comme sortie.

Fuzzy Rules		E(k)				
		NB	NS	ZE	PS	PB
CE(k)	NB	ZE	PB	PS	ZE	NB
	NS	PB	PS	ZE	ZE	NB
	ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
	PS	PB	ZE	ZE	NS	NB
	PB	PB	ZE	NS	NB	ZE

Tableau II.1 : Table de règles à cinq classes (matrice d'inférences).

Les fonctions d'appartenant adaptées par l'erreur (E), changement d'erreur (CE) et la commande (D) sont illustrées par la figure suivante :

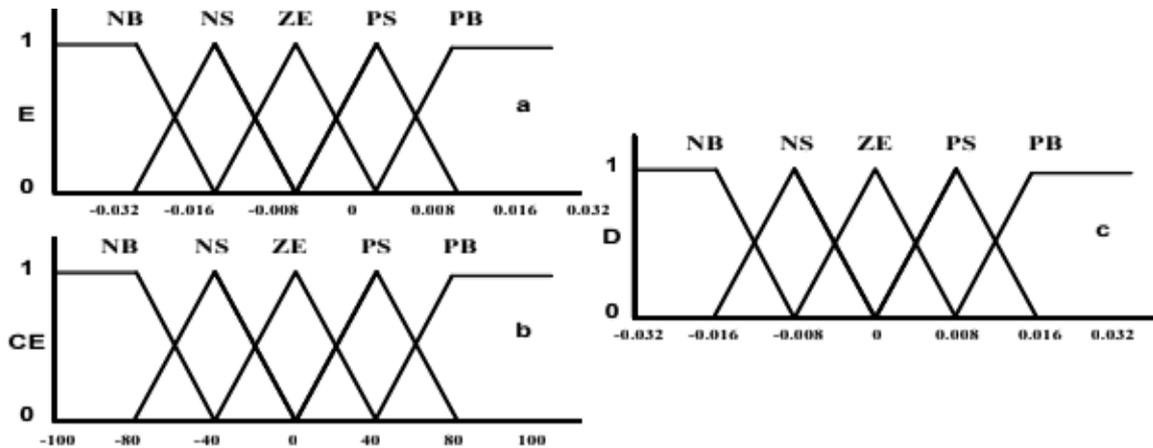


Figure II. 23 : Fonctions d'appartenance de chacune des variables linguistiques

a : l'erreur.

b : changement d'erreur.

c : commande (rapport cyclique).

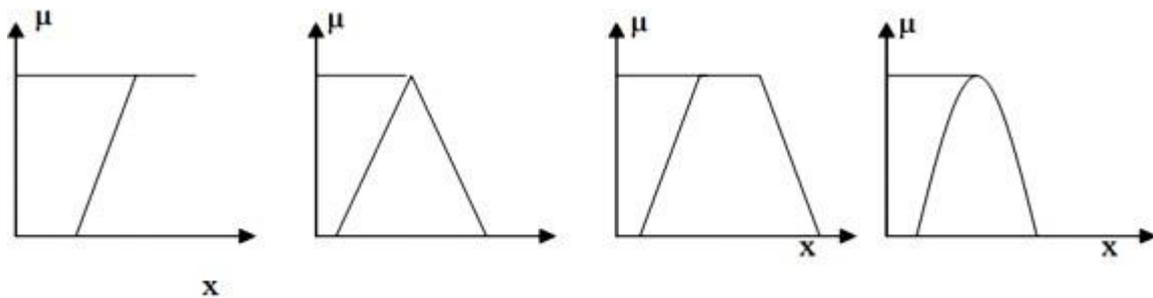


Figure II.24 : Différentes formes de fonctions d'appartenance

- **Défuzzification**

La défuzzification peut être fonctionné normalement par deux algorithmes [30] :

- La méthode de critère maximale (MCM).
- La méthode centre de gravité.

## **II.9 Conclusion**

Dans ce chapitre on a détaillé tous les éléments intervenant dans le système PV, hacheur, méthodes MPPT tel que l'algorithme d'incrémention de l'inductance, méthode de perturbation et observation et la méthode MPPT à base de la logique floue. Le chapitre III sera consacré à la validation de ces méthodes par simulation à l'aide du logiciel Matlab.

# CHAPITRE III

## VALIDATION DES TECHNIQUES MPPT PAR SIMULATION

Afin de valider les techniques MPPT proposées nous avons procédé à la validation par simulation de ces techniques via l’environnement Matlab Simulink.

### III.1 Modélisation par Matlab Simulink du panneau PV

Le panneau solaire utilisé est le 1SOLTECH 1STH-250-WD composé de 60 cellules solaires par module. Le tableau 1 donne les paramètres électriques du panneau solaire. L’équation (III.1) donne le modèle mathématique [34] du panneau PV. La figure III.1 montre le modèle équivalent de la cellule PV. Afin d’augmenter, la tension ou le courant ou la tension et le courant simultanément du panneau, les cellules PV sont associées en série, en parallèle ou en série-parallèle.

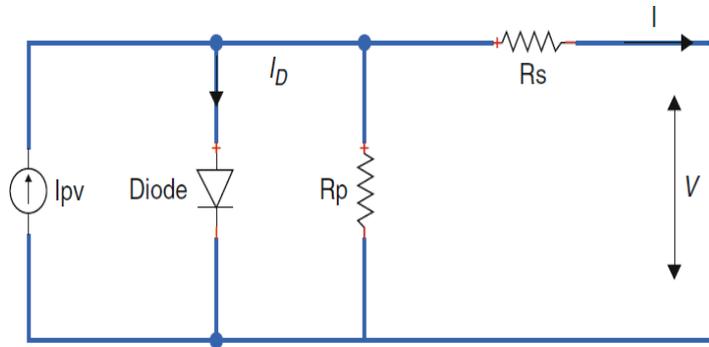


Figure III.1.a Modèle équivalent à une diode d’une cellule photovoltaïque

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{aV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad \text{(III.1)}$$

Si la température et l’éclairement sont différents des valeurs standard ( $T_n = 25 \text{ °C}$  and  $G_n = 1000 \text{ W/m}^2$ ) ;

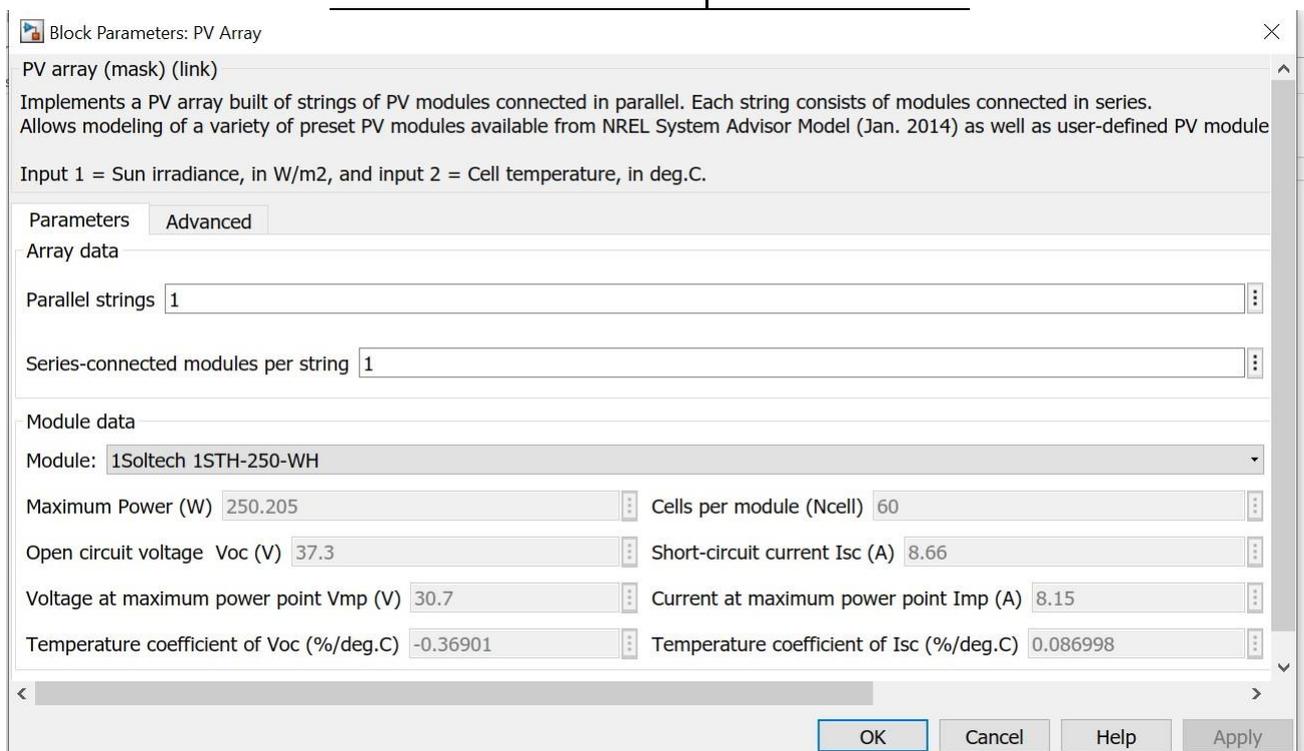
$I_{pv}$  and  $I_0$  sont calculés à partir des équations (III.2) and (III.3) :

$$I_{pv} = (I_{pvn} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad \text{(III.2)}$$

$$I_0 = \frac{I_{scn} + K_i \Delta T}{\exp \left( \frac{V_{ocn} + K_v \Delta T}{aV_t} \right) - 1} \quad \text{(III.3)}$$

**Tableau III.1.** Paramètres électriques du PV

$P_{MPP}$	250.205 W
$V_{MPP}$	30.7V
$I_{MPP}$	8.15A
$V_{OC}$	37.3V
$I_{SC}$	8.66A

**Figure III. 1. b** Paramètres électriques du panneau PV

Le modèle équivalent du générateur PV effectué sous l'environnement Matlab Simulink est représenté par la figure III.2.



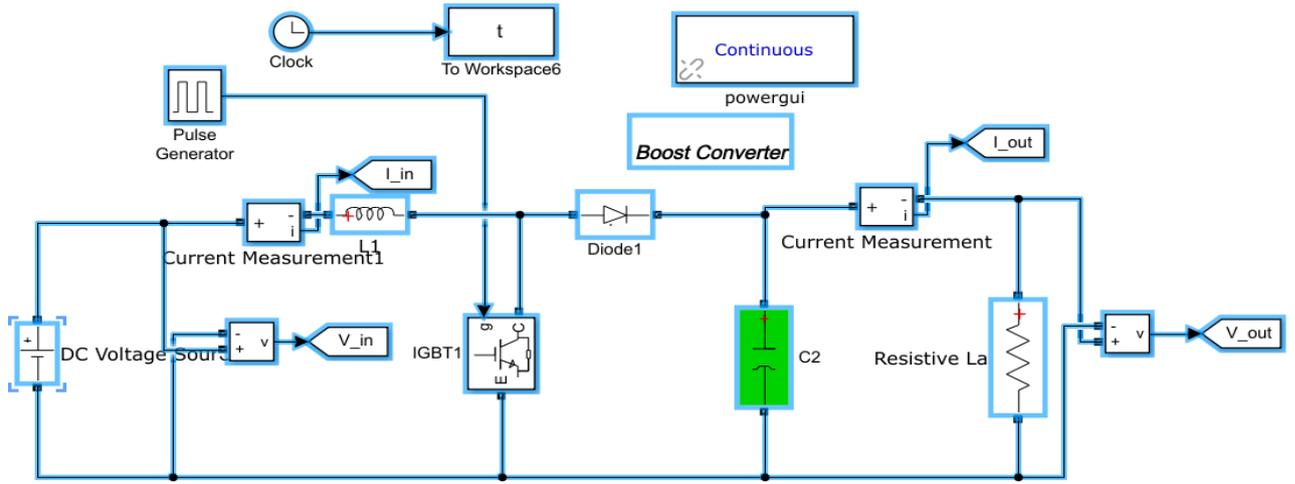


Figure III.3 Model de l’hacheur Boost avec Matlab Simulink.

La relation entre les tensions à l’entrée et à la sortie du Boost peut être écrite sous la forme suivante [35] :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}} = \frac{1}{1-D} \tag{III.4}$$

D est le rapport cyclique

$$D = \frac{t_{on}}{T} \tag{III.5}$$

Avec

$t_{on}$  est le temps de fermeture du IGBT et  $T_s$  est la période de hachage.

$f_H$  est la fréquence de hachage ;  $f_H = \frac{1}{T}$

$V_{out}, V_{in}$  sont les tensions à la sortie et à l’entrée respectivement.

$I_{out}, I_{in}$  sont les courant à la sortie et à l’entrée du Boost respectivement.

- **Dimensionnement de l’inductance et de la batterie constituant l’hacheur Boost**

L’inductance est calculée de sorte à minimiser l’ondulation du courant comme mentionné dans [36] d’après l’équation III.6

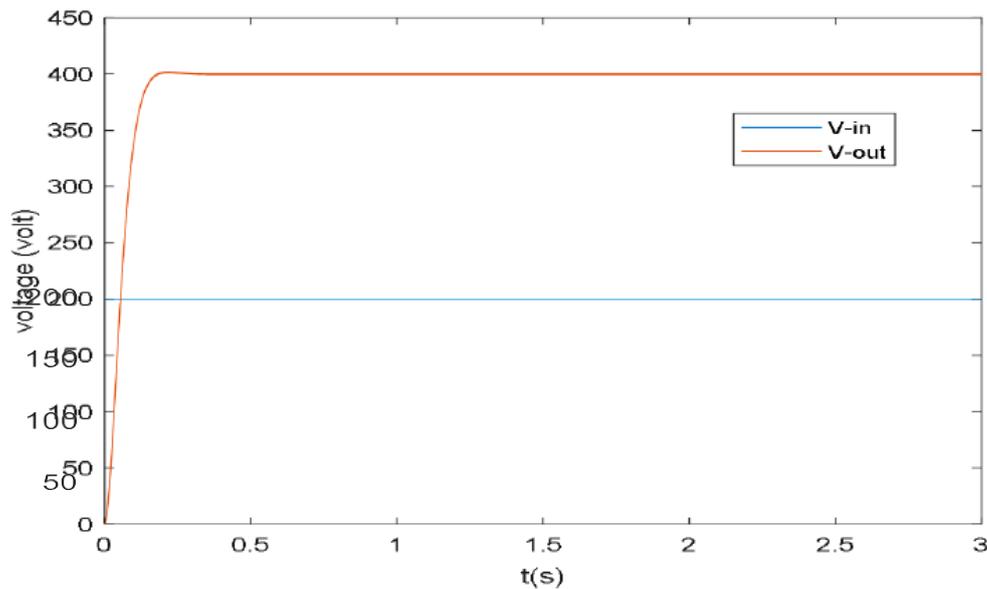
$$L \geq \frac{V_{out}}{4f_s \Delta I_{Lmax}} \tag{III.6}$$

La capacité de la batterie est dimensionnée de sorte à minimiser les ondulations de la tension à la sortie de l’hacheur. Sa valeur est déterminée par la relation suivante [13] :

$$C > \frac{D_{max} V_{out}}{R f_s \Delta V_{out}} \quad (III.7)$$

- **Test de l'hacheur Boost**

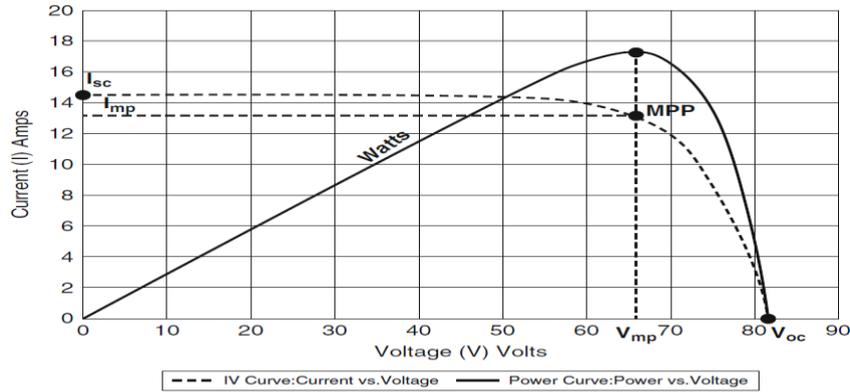
Afin de tester le convertisseur élévateur, nous utilisons une inductance  $L = 300\text{mH}$ , un condensateur de sortie égal à  $1000\mu\text{F}$  et un rapport cyclique  $D = 0,5$ . Si la tension d'entrée est  $V_{in} = 200\text{ V}$  ; la tension de sortie est  $V_{out} = 400\text{V}$ . Les résultats de simulation (figure III.4), montrent que la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.



**Figure. III.4.b** Tensions à l'entrée et à la sortie du Boost

### 4.3 Efficacité de l'algorithme MPPT

La méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT) détecte la puissance maximale du panneau PV en cas de variations de température et d'irradiation [37, 38, 39, 40]. Ceci est possible en agissant sur le rapport cyclique  $D$  de l'hacheur élévateur. Si le point de puissance maximale n'est pas atteint (figure III.5), de grandes pertes de puissance augmentent.



**Figure III.5** position du point MPP

Une technique MPPT efficace doit fournir [41] :

- Un MPP précis
- Une vitesse de suivi élevée.
- Efficacité en cas d'ensoleillement constant et partiel.
- Efficacité dans des conditions atmosphériques à évolution rapide.
- Efficacité pour différents systèmes PV.
- Une simplicité.
- Aucune oscillation autour de MPP.

La précision d'une méthode de poursuite du point maximale de puissance MPP est estimée par l'extraction correcte du MPP. L'efficacité d'un MPPT est donnée par l'équation (III.8) [42].

$$\eta = \frac{P_{MPPT}}{P_{max}} \quad (III.8)$$

Avec :  $P_{MPPT}$  puissance obtenue par l'algorithme MPPT et

$P_{max}$  puissance maximale du panneau aux conditions climatiques standard ; donnée par :

$$P_{max} = V_{mp} I_{mp} \quad (III.9)$$

L'efficacité de la méthode MPPT est un facteur très important en cas de variation rapide des conditions climatiques.

### III.4 Implémentation des techniques MPPT sous l'environnement Matlab Simulink

Lors de la validation par simulation, on considère une résistance de charge de  $65 \Omega$ . Les paramètres de l'hacheur Boost sont regroupés dans le tableau suivant :

Paramètres du hacheur	$C_1$	$C_2$	$L_1$
	$1000\mu\text{F}$	$1000\mu\text{F}$	$0.4 \text{ mH}$

Tableau III.2 Paramètres de l'hacheur Boost

Le semi- conducteur utilisé lors du hachage est un IGBT, voir figure III.11.

#### III.4.1 Implémentation de la technique P&O par Matlab Simulink

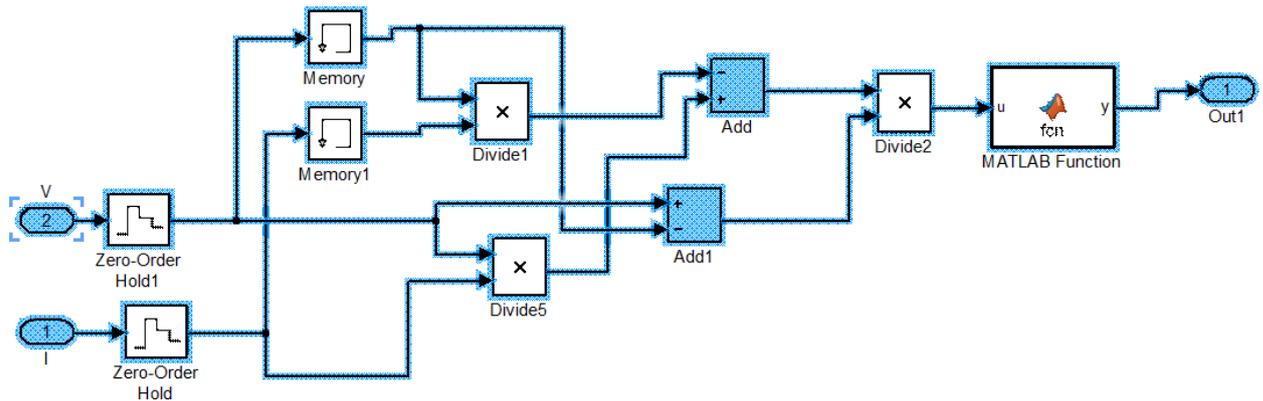


Figure III.6 Modèle Simulink de la technique P&O

#### III.4.2 Implémentation de la technique de conductance incrémentale

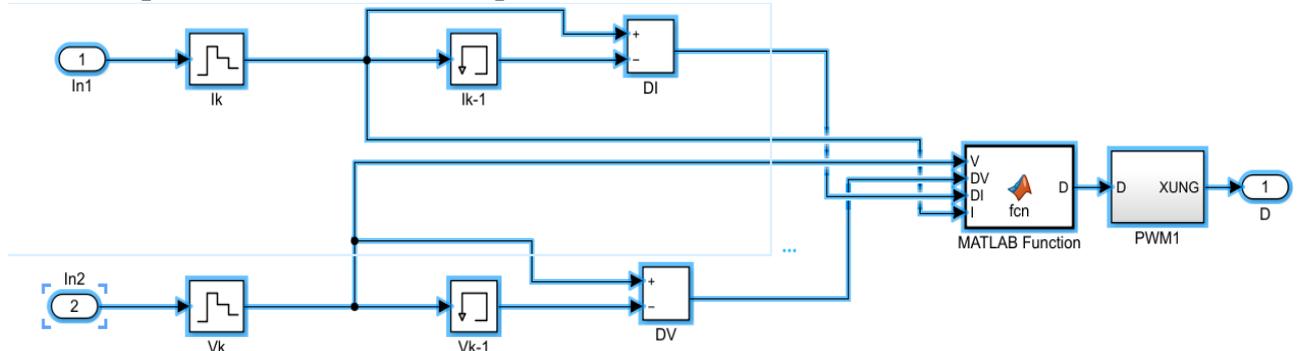


Figure III.7 Modèle Simulink de la technique de conductance incrémentale

III.4.3 Implémentation de la technique MPPT à base de logique floue sous Matlab /Simulink

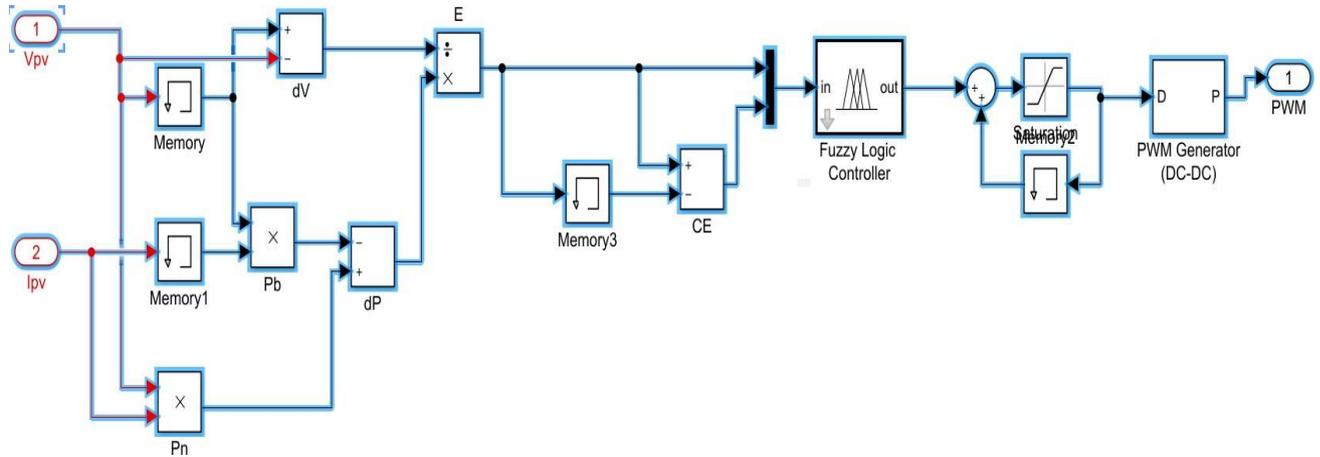


Figure III.8 schéma Simulink de la technique MPPT à base de logique floue

➤ Fuzzification

La commande est déterminée sur la base de la satisfaction de deux critères concernant deux variables d'entrées de contrôleur proposé, à savoir l'erreur( $E$ ) et le changement d'erreur( $CE$ ), à un instant d'échantillonnage  $k$ .

Les variables  $E$  et  $CE$  sont exprimés comme suit :

$$E = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \tag{III.10}$$

$$CE = E(k) - E(k - 1) \tag{III.11}$$

Où  $P(k)$  et  $V(k)$  sont la puissance et la tension de module PV, respectivement. Par conséquent,  $E(k)$  est zéro au point de puissance maximale du module PV.

Ces variables d'entrée sont exprimées en termes de variables ou étiquettes linguistiques telles que le  $PB$  (grand positif),  $PS$  (petit positif),  $Z$  (zéro),  $NS$  (petit négatif),  $NB$  (grands négatifs) en employant les sous-ensembles flous de base ; pour l'erreur et la dérivée d'erreur et  $Z$  (zéro),  $M$ (moyen),  $S$ (petit),  $B$ (grand),  $VB$  (très grand) pour la commande  $D$ .

Les fonctions d'appartenant adaptées par l'erreur ( $E$ ), changement d'erreur ( $CE$ ) et la commande ( $D$ ) sont illustrées par la figure suivante :

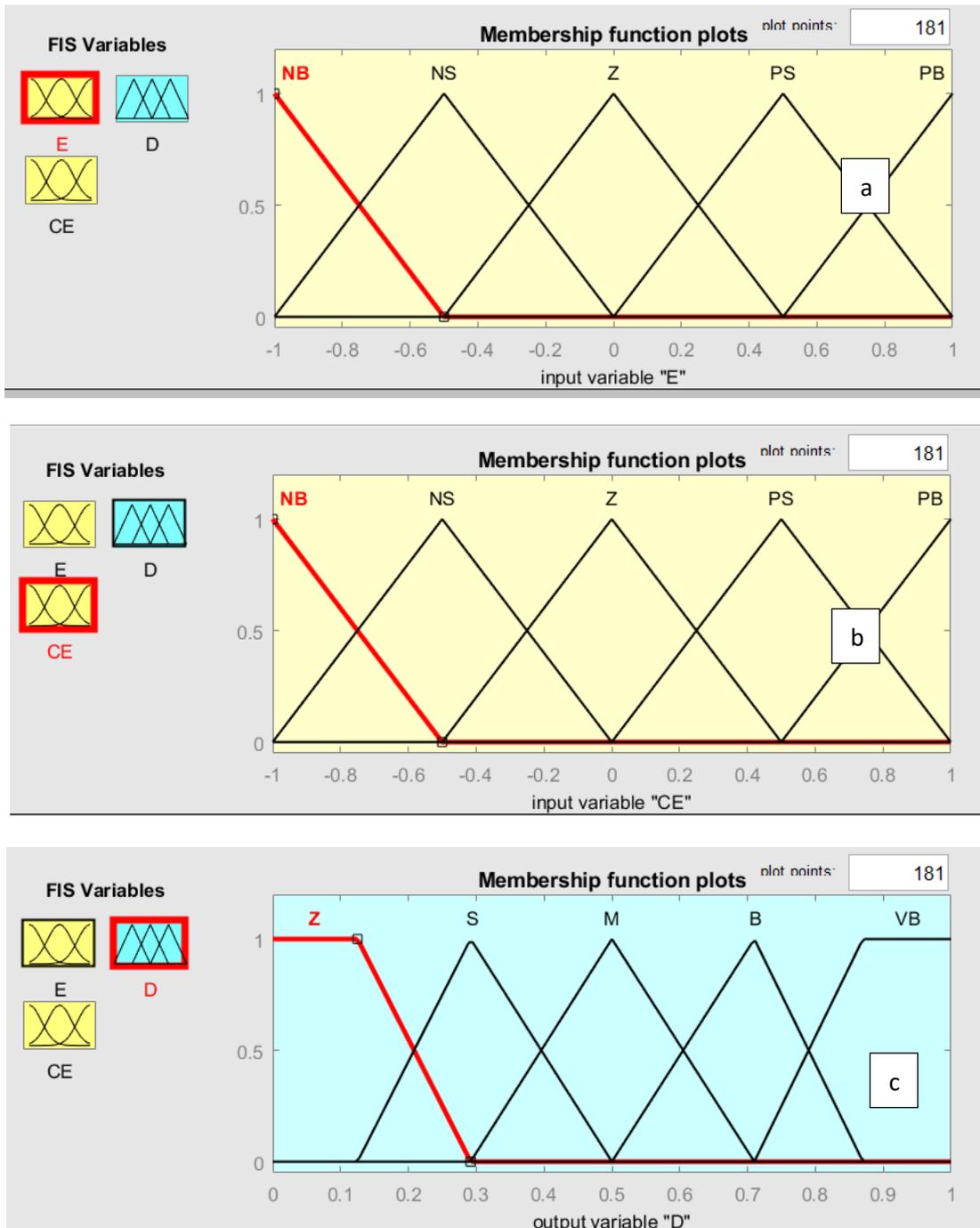


Figure III.9 Fonctions d'appartenance de :

a : l'erreur

b : changement d'erreur

c : commande (rapport cyclique)

➤ **Méthode d'inférence**

Le tableau III.3 montre les règles du contrôleur flou, où toutes les entrées de la matrice sont les ensembles flous de l'erreur (*E*), le changement de l'erreur (*CE*) et le rapport cyclique (*D*)

du convertisseur. Dans le cas de la commande floue, la règle de la commande doit être conçue pour que l'erreur  $E$  doive toujours être égale à zéro.

Règles floues		E(k)				
		NB	NS	Z	PS	PB
CE(k)	NB	Z	Z	Z	S	M
	NS	Z	Z	B	M	S
	Z	Z	S	M	VB	B
	PS	B	M	S	VB	VB
	PB	M	B	VB	M	B

Tableau III.3 Table de règles à cinq classes (matrice d'inférences)

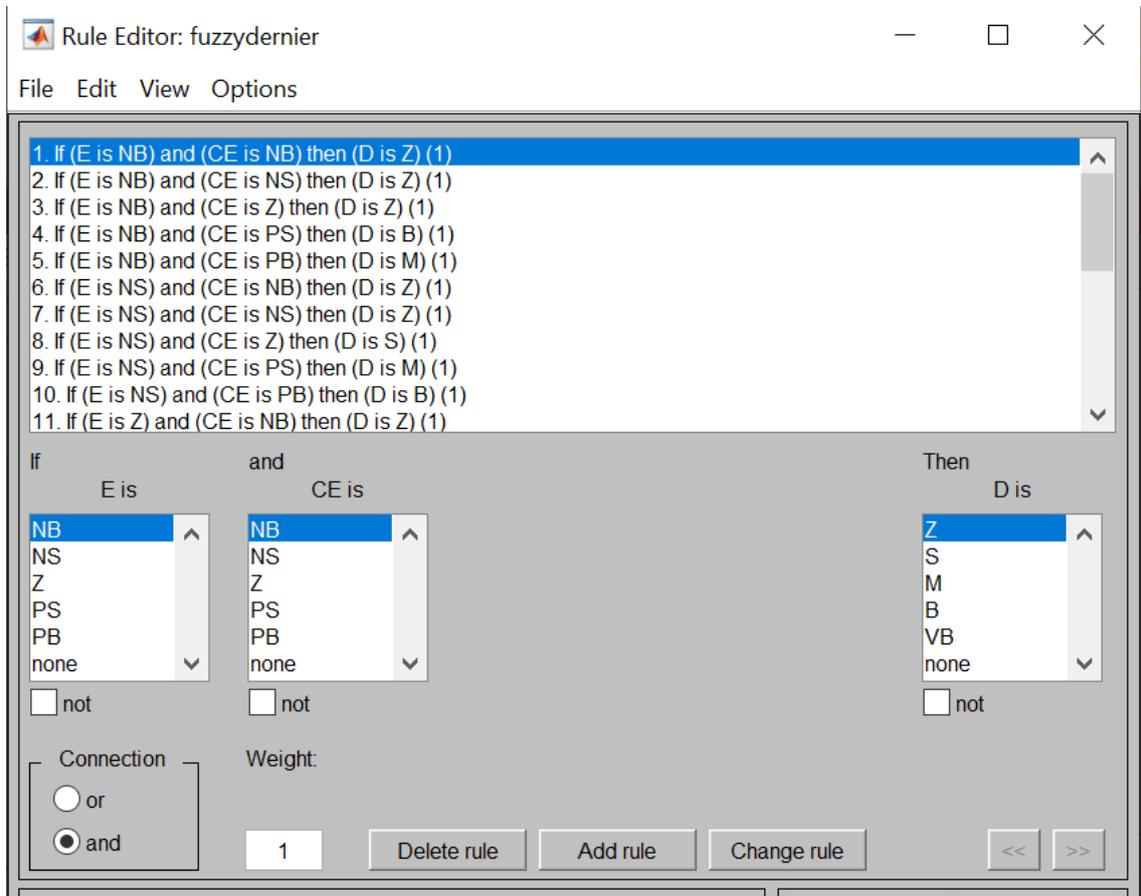


Figure III.10 Introduction des règles sous l'environnement Matlab

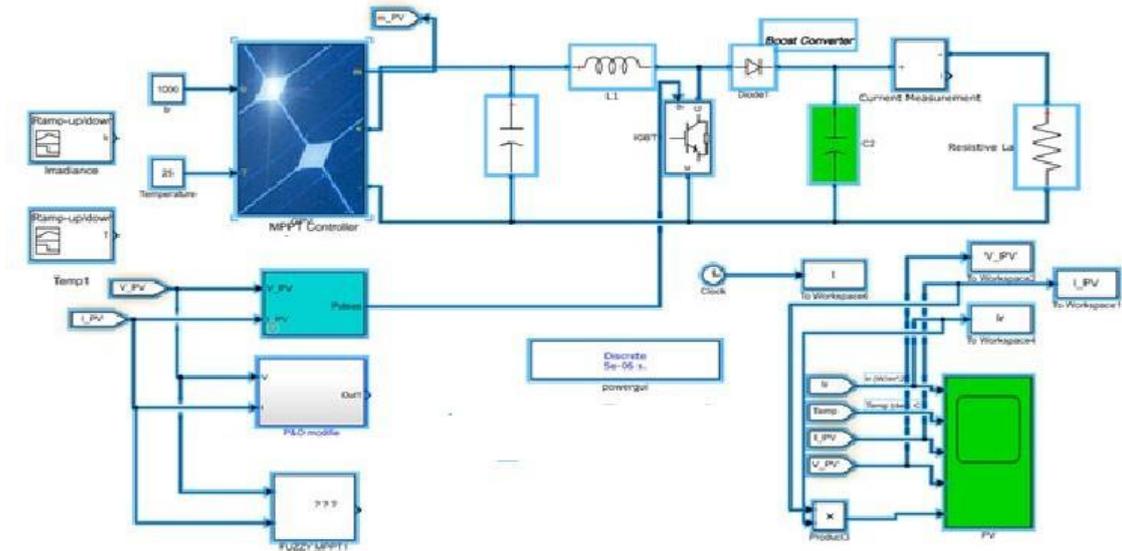
➤ **Défuzzification**

La méthode de défuzzification utilisée dans ce travail est le centre de gravité. Pour calculer la sortie qui est le rapport cyclique ; on utilise l'équation suivante [42] :

$$D = \frac{\sum_{j=1}^n (D_j) \cdot U(D_j)}{\sum_{j=1}^n U(D_j)} \quad (\text{III.12})$$

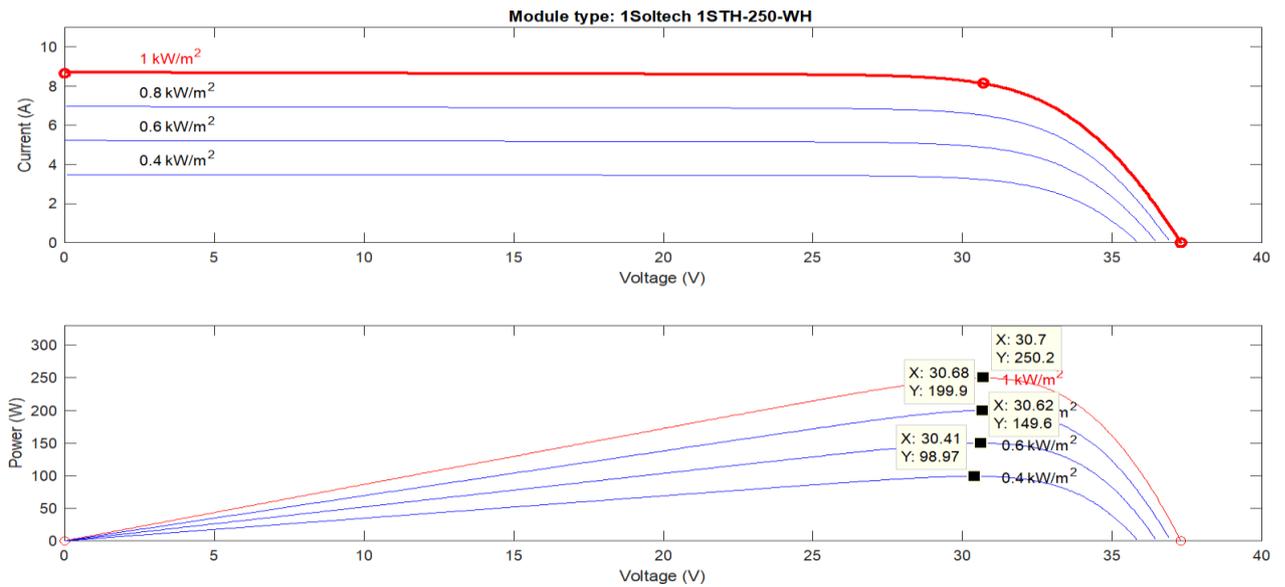
### III.5 RÉSULTATS DE SIMULATION

Afin de valider les stratégies de MPPT et juger l'efficacité de chacune ; les trois techniques MPPT ont été validé par simulation à l'aide de Matlab Simulink, comme le montre la figure III.11.



**Figure III.11** Modèle global du système PV system avec les trois techniques MPPT

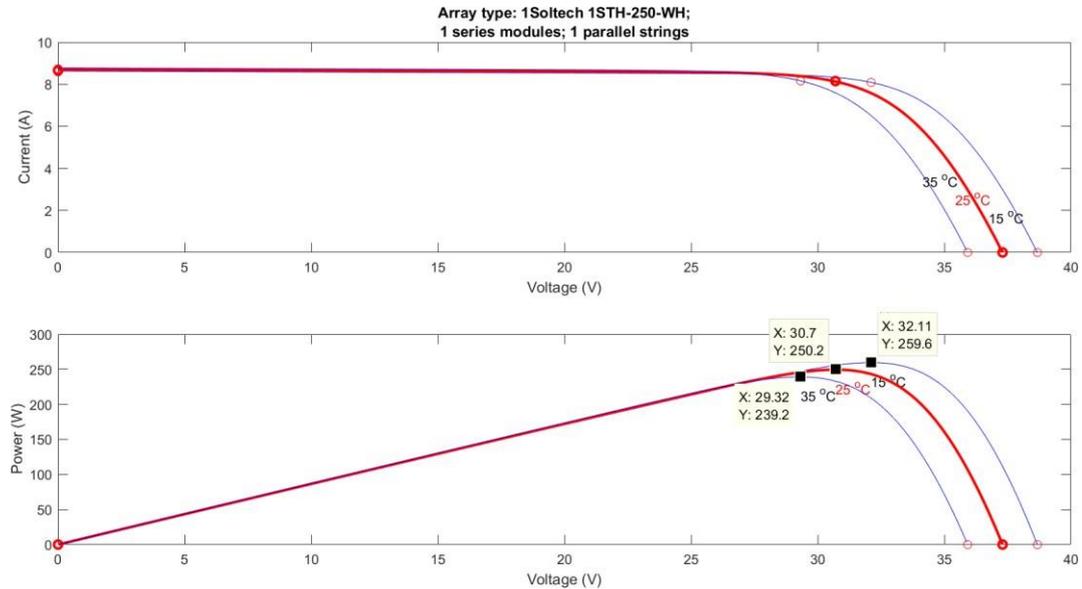
#### A. Influence de la variation d'éclairement sur les caractéristiques du PV



**Figure. III.12** Caractéristiques du PV sous éclairement variable ( $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ )

La figure III.12 montre le comportement du panneau solaire PV lorsque l'irradiation est variable. Lorsque le rayonnement diminue, le MPP diminue considérablement ; ainsi l'introduction d'une MPPT est indispensable.

### B. Influence de la variation de la température sur les caractéristiques du PV



**Figure III.13** Caractéristiques du PV sous température variable ( $G= 1000 \text{ W/m}^2$ )

La figure III.13 montre le comportement des courbes I-V et P-V en cas de variation de température. Les courbes montrent que lorsque la température augmente, le point de MPP diminue. Pour cela, la méthode MPPT doit suivre le nouveau point de MPP correspondant au changement de température et / ou d'ensoleillement.

- **Test des techniques MPPT avec température constante (25°C) et variation de l'éclairement**

Afin de tester les trois techniques on considère un éclairement qui diminue de  $1000\text{W/m}^2$  à  $800\text{W/m}^2$  à 0.4s, de  $800\text{W/m}^2$  à  $600\text{W/m}^2$  à 0.8s et augmente de  $600\text{W/m}^2$  à  $800\text{W/m}^2$  à 1.2s (voir figure III.14) pendant une durée totale de 1.5 seconde.

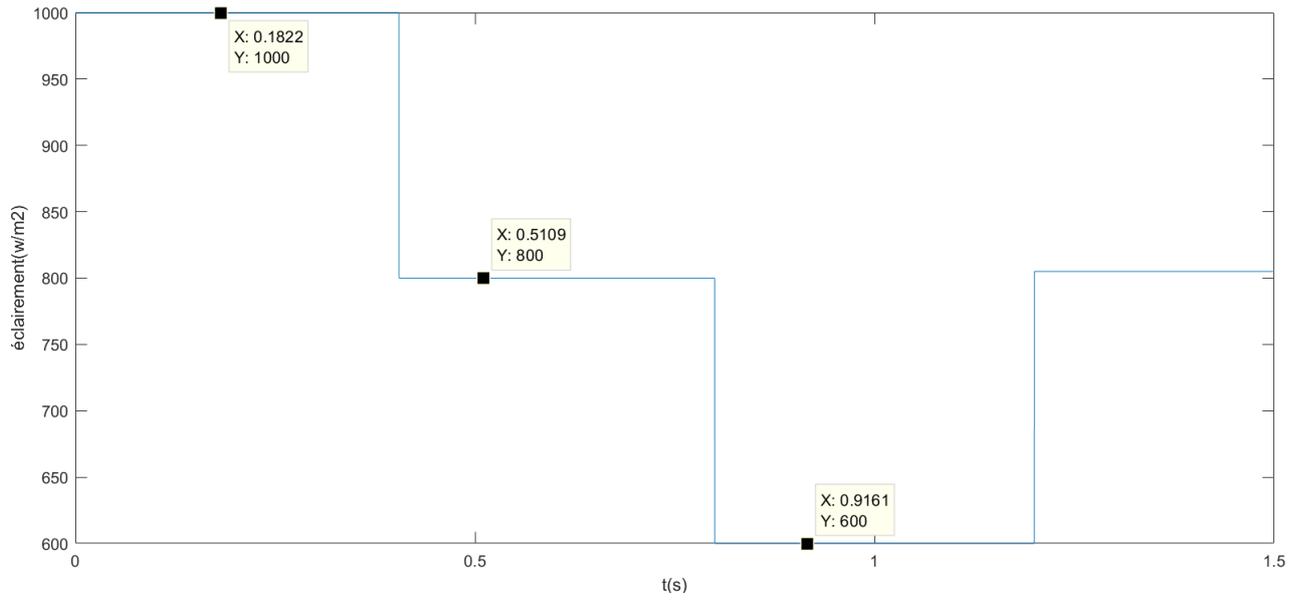


Figure III.14. Variation de l'éclairement

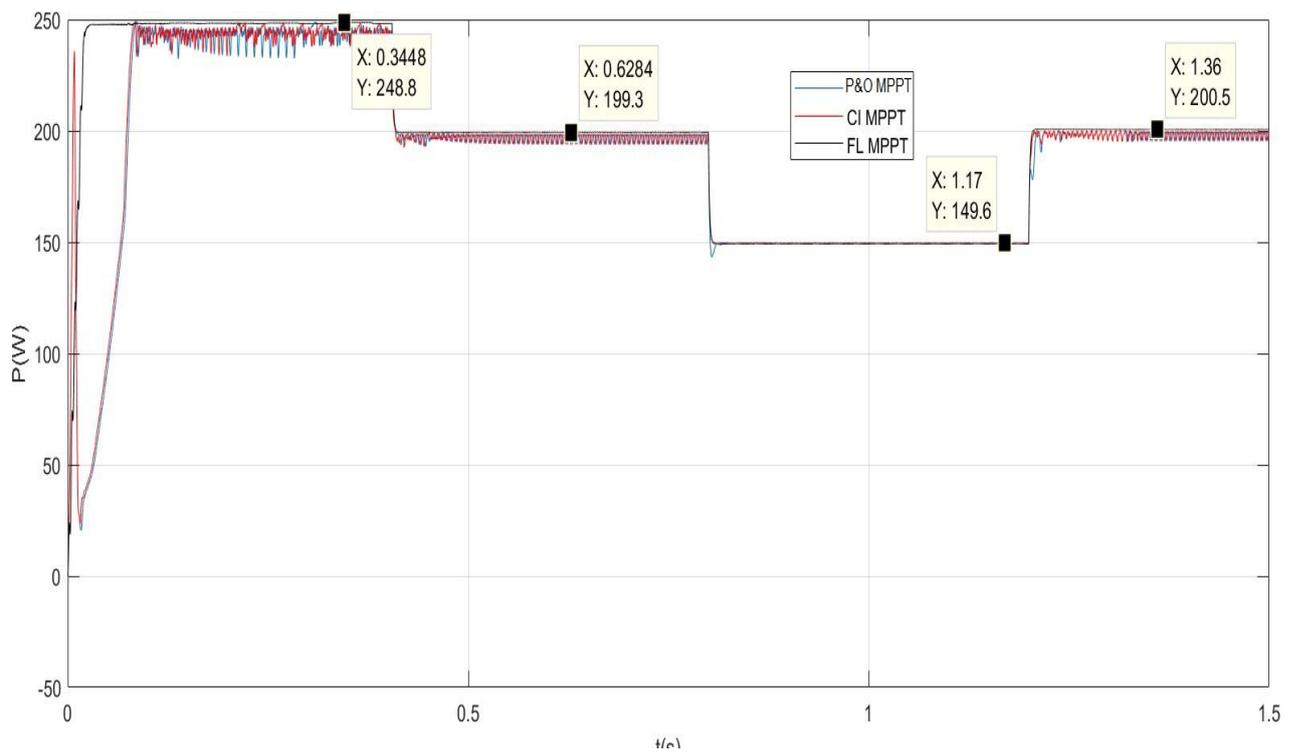


Figure. III.15 Puissance du PV sous éclairement variable ( $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ )

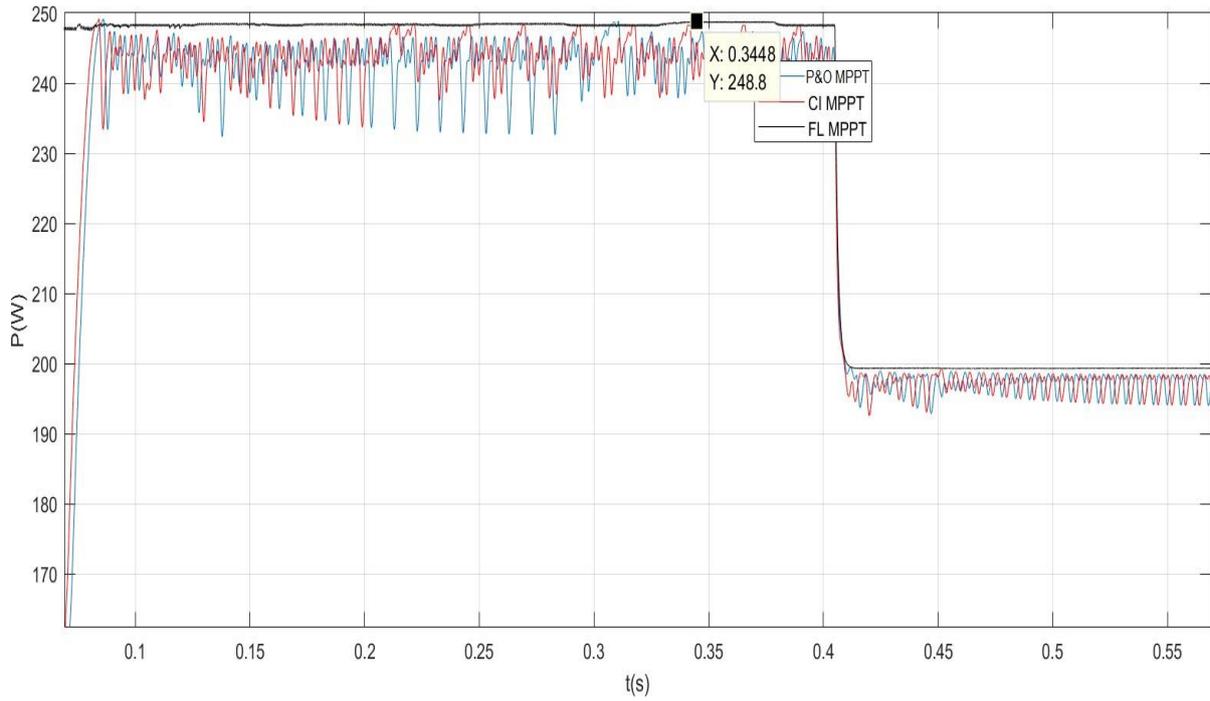


Figure III.16 Zoom de la puissance du PV sous éclairment variable ( $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

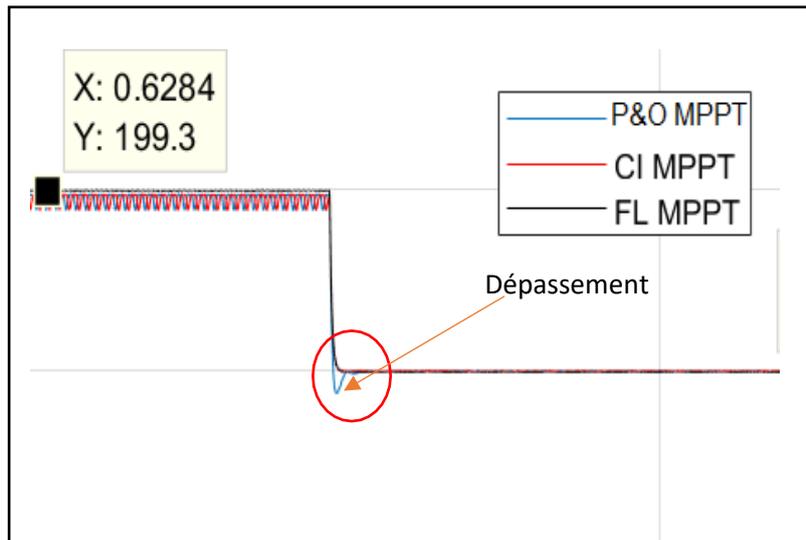
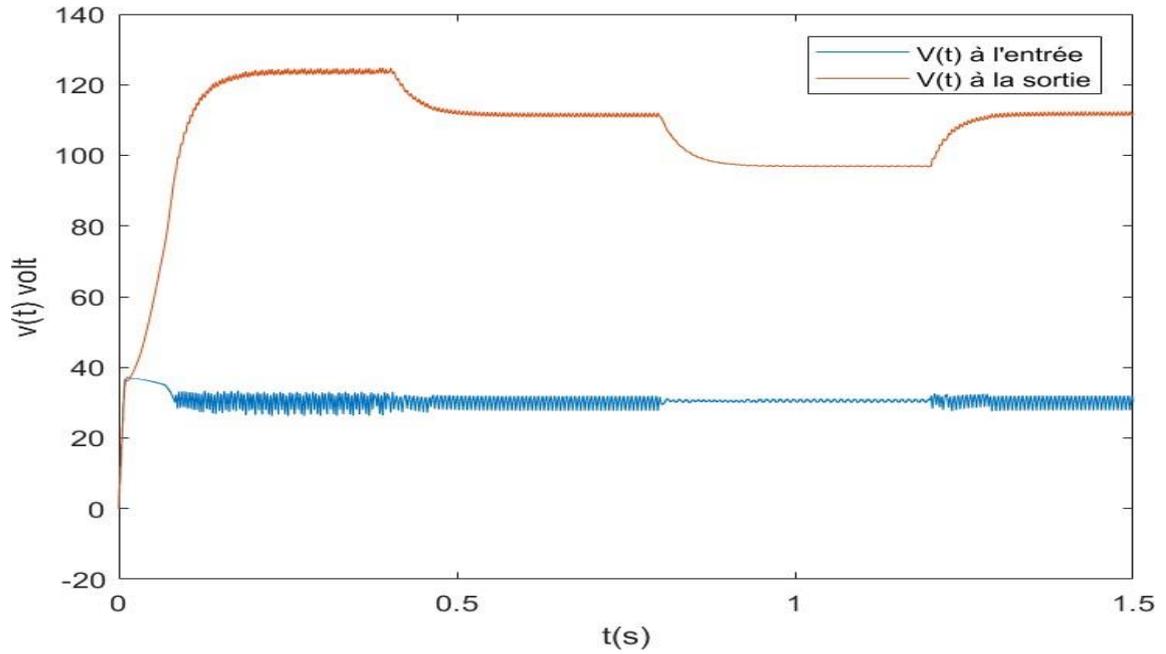
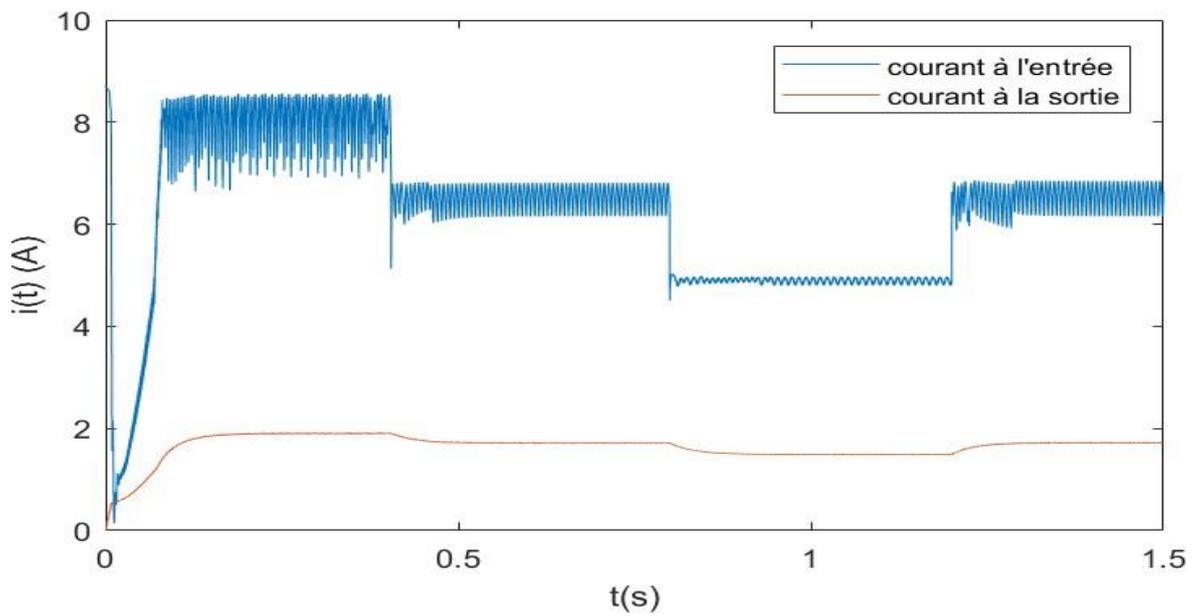


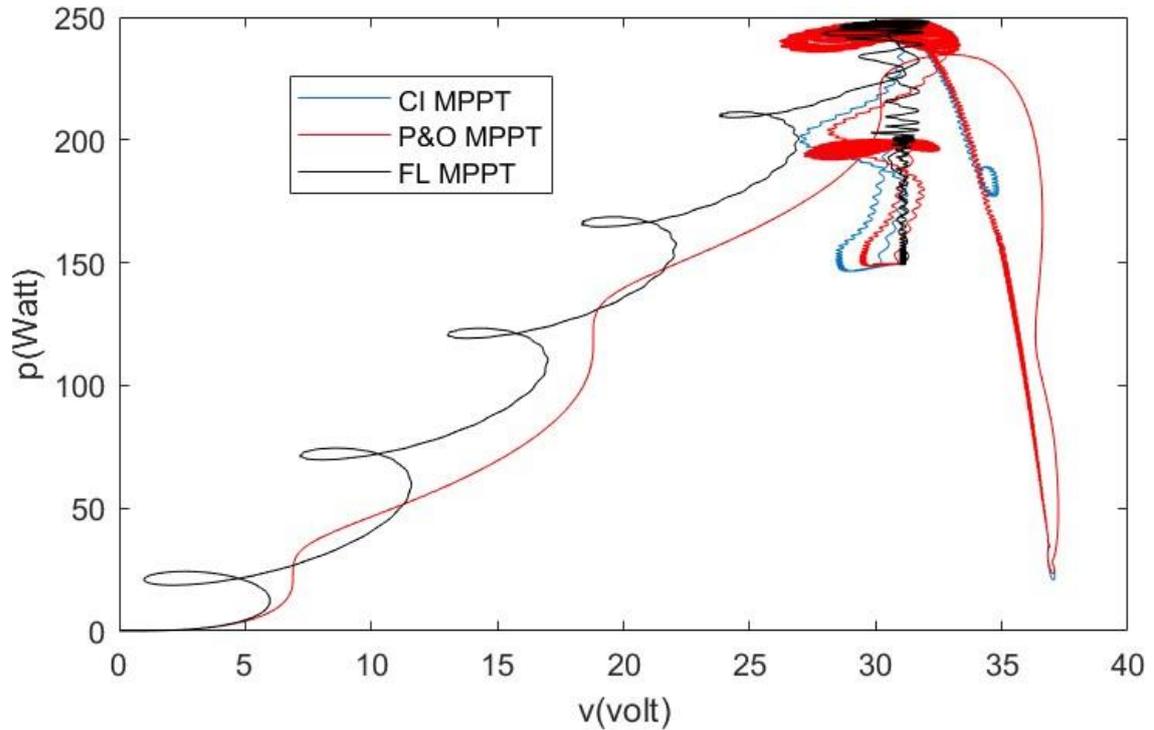
Figure III.17 dépassement lors de variation de l'éclairment



**Figure. III.18** Tensions à l'entrée et à la sortie de l'hacheur sous éclairage variable(P&O MPPT)



**Figure. III.19** Courants à l'entrée et à la sortie de l'hacheur sous éclairage variable(P&O MPPT)



**Figure III. 20 Evolution de la puissance du panneau PV en fonction de la tension**

Le tableau III.4 résume les différences entre le MPP (Maximum Power Point) du panneau PV et le MPP trouvé par les trois techniques MPPT considérées sous changement de l'éclairement solaire. L'efficacité de chaque méthode est jugée par  $\eta$  comme indiqué dans le tableau III.4.

Le tableau III.5 compare la dynamique des trois techniques du point de vue oscillations et rapidité.

**Table III.4** Comparaison de l'efficacité des techniques MPPT

Rayonnement Solaire	MPP donné par le PV	MPP donné par P&O	MPP donné par CI	MPP donné par LF	$\eta$ P&O	$\eta$ CI	$\eta$ LF
<b>1000W/m<sup>2</sup></b>	250.205w	246.2w	246.4	248.8w	0.983	0.984	0.994
<b>800W/m<sup>2</sup></b>	199.9w	196.4w	197.5	199.3w	0.982	0.982	0.996
<b>600 W/m<sup>2</sup></b>	98.6w	95.6w	95.9	98.4w	0.969	0.972	0.997

**Table III.5** Comparaison du comportement dynamique des techniques MPPT

Technique MPPT	P&O	CI	LF
Oscillations	moyenne	moyenne	Très faible
Temps de réponse	moyen	moyen	minimal
Dépassement	moyen	moyen	nul

#### 4.6 Discussion

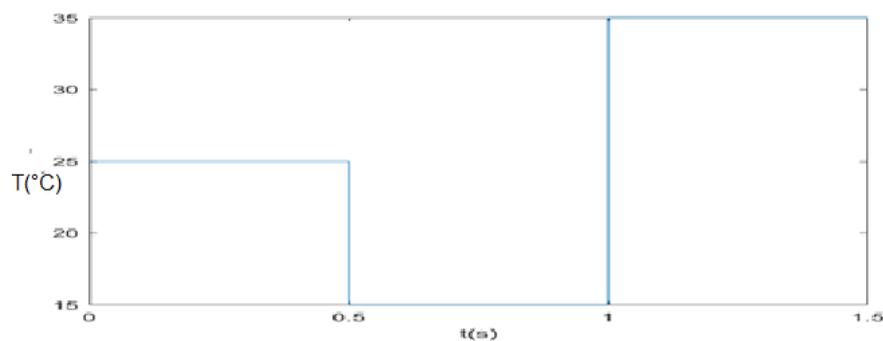
- D'après le tableau III.4 l'efficacité des trois techniques à retrouver le point MPP est meilleur pour la technique à base de logique floue.
- Lorsque l'éclairement diminue de  $1000\text{W/m}^2$  à  $800\text{w/m}^2$  et de  $800\text{w/m}^2$  au  $600\text{w/m}^2$  on remarque que les trois techniques suivent le point MPP donné par le PV.
- L'algorithme conductance incrémentale est un algorithme classique et simple. En général, cet algorithme dépend fortement du rapport cyclique initial et il présente des oscillations autour du point maximal de puissance. L'algorithme P&O donne de même des oscillations au tour du MPP que dans le cas de l'algorithme CI.
- Les résultats de simulation montrent un dépassement supplémentaire lors de l'application de la méthode P&O à l'instant de variation de l'éclairement, figure III.17.
- L'algorithme basé sur la logique floue présente de très faibles oscillations et aucun dépassement (voir figure III.16) et converge rapidement au point MPP avec un temps de réponse meilleur.
- A  $t=1.2\text{s}$  ; lorsque l'éclairement augmente de  $600\text{w/m}^2$  à  $800\text{w/m}^2$  ; on remarque que les trois algorithmes MPPT s'adaptent et reviennent au point MPP retrouvé lors de la diminution due l'éclairement.

- La tension à la sortie du PV est amplifiée par l'effet du boost (figure III.18) ; elle peut atteindre jusqu'à 120 volt si l'éclairement est de  $1000\text{w/m}^2$  ; ainsi il faut bien dimensionner la batterie à la sortie.
- Le courant à la sortie du PV (figure III.19) présente de faible ondulation suite au bon choix de la valeur de l'inductance. On remarque aussi que les rapports  $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ ,  $\frac{I_{in}}{I_{out}}$  sont égaux.

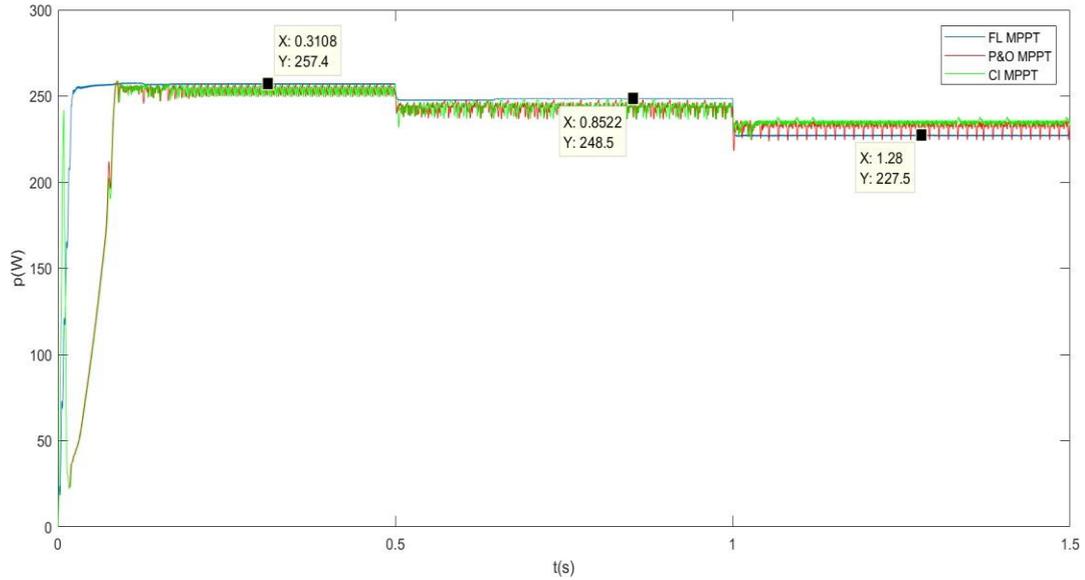
La figure III.20 illustre l'évolution instantanée de la puissance du panneau PV en fonction de la tension délivrée. Les oscillations autour du MPP sont trop grandes lors de l'application des techniques P&O et CI par contre on remarque

- ***Test des techniques MPPT avec température constante (25°C) et variation de la température***

Afin de tester les trois techniques on considère une température qui augmente de 15° à 25° à 0.5s, qui augmente de 25° à 35° à l'instant 1s et maintiens cette valeur jusqu'à 5s toute en maintenant l'éclairement constant à  $1000\text{ W/m}^2$  (voir figure III.21).



**Figure III.21.** Variation de la température



**Figure. III.22** Puissance du PV sous température variable ( $G=1000W/m^2$ )

Le tableau III.6 résume les différences entre le MPP (Maximum Power Point) du panneau PV et le MPP trouvé par les trois techniques MPPT considérées sous changement de température. L'efficacité de chaque méthode est jugée par  $\eta$  comme indiqué dans le tableau III.6.

**Table III.6** Comparaison de l'efficacité des techniques MPPT lors de changement de température

Rayonnement Solaire	MPP donné par le PV	MPP donné par P&O	MPP donné par CI	MPP donné par LF	$\eta$ P&O	$\eta$ CI	$\eta$ LF
15°	259.6w	256.2w	256.3	257.4w	0.986	0.987	0.991
25°	250.2w	247.2w	246.4	248.5w	0.988	0.984	0.993
35°	239.2w	232.4w	232.9	227.5w	0.971	0.973	0.775

**4.6 Discussion**

- D'après le tableau III.6 l'efficacité des trois techniques à retrouver le point MPP est meilleur pour la technique à base de logique floue.
- L'algorithme P&O donne de même des oscillations au tour du MPP que dans le cas de l'algorithme CI.

- L'algorithme basé sur la logique floue présente de très faibles oscillations et converge rapidement au point MPP avec un temps de réponse meilleur.

### III.6 Conclusion

L'algorithme basé sur la logique floue est un algorithme robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. Cependant, l'implémentation de ce type d'algorithme est plus complexe que les algorithmes classiques. De plus, l'efficacité de cet algorithme dépend énormément du choix des intervalles d'inférences, des fonctions d'appartenance et des règles. Cette approche nécessite l'expertise humaine afin de choisir les plages de variations des variables d'entrées et de la commande, le choix des fonctions d'appartenance et des règles.

# Conclusion Générale

Ce travail a été consacré à la modélisation d'une chaîne photovoltaïque qui se compose d'un générateur photovoltaïque, un étage d'adaptation (convertisseur DC /DC Boost), une charge DC et un étage de commande MPPT pour piloter le hacheur Boost (une première fois la commande MPPT classique en l'occurrence P&O, Inc Cond et puis la commande MPPT Floue).

Les résultats de simulation montrent que les performances d'un PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température. Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croît, ce qui permet au module de produire une puissance électrique plus importante. Par contre, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension et une légère augmentation du courant par suite une baisse du rendement maximal.

La validation des techniques MPPT la commande basée sur la logique floue donne de meilleures performances par rapport aux autres méthodes en régime dynamique et permanent. Le temps de réponse, les oscillations au tour du PPM et le dépassement sont meilleurs par rapport aux techniques classiques inspectées dans ce travail. Néanmoins cette approche nécessite l'expertise humaine afin de choisir les plages de variations des variables d'entrées et de la commande et le choix des fonctions d'appartenance, ainsi que les règles qui relient les entrées aux sorties.

Comme perspective de ce travail, il serait intéressant de procéder à l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées, sur des systèmes à temps réel Dspace, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues. Des techniques à base de réseaux de neurones

artificielles, hybrides (neuro floue) ou même à base d'algorithmes génétiques sont aussi prometteuses et peuvent apporter de plus à ce travail.

# *Bibliographies*

[01] Ch. Perrin, Ch. Vauge, **Le gisement solaire, évaluation de la ressource énergétique**, Lavoisier TEC et DOC, 11, rue Lavoisier 75008, Paris.

[2] : **PROGRAMME DES ENERGIES RENOUVELABLES ET DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE**. Mars 2011 Ce document a été élaboré par le ministère de l'énergie et des mines Conception et réalisation SATINFO Société du Groupe Sonelgaz.

[3] : <https://www.algerie-eco.com>

[4] : Lyes berrached, « **ETUDE PROSPECTIVE DE LA DEMANDE énergétique finale pour l'Algérie à l'horizon 2030** » bouguara boumerdes, année universitaire 2010 -2011 p17.

[5] : <https://www.energy.gov.dz/>

[6] : S. Jendouba, A. Slimani et M.S. Boucherit, &quot ; **Le pompage photovoltaïque : un outil de développement des régions du sud d'Algérie**”, Revue des énergies renouvelables CER'07, Oujda, pp.109-112, 2007.

[7] : B. Chikh-Bled, I. Sari-Ali, B. Benyoucef, &quot ; **Méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïque**”, Revue internationale d'héliotechnique, N° 41, pp. 24-30, 2010.

[8] : B. Flèche, D. Delagnes, « **énergie solaire photovoltaïque** », STI ELT, juin 2007, énergies solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv.2014.

[9] : [www.sktm.dz](http://www.sktm.dz)

[10] : <https://www.era.dz/>

[11] : [www.cder.dz](http://www.cder.dz)

[12] : [www.udes.dz](http://www.udes.dz)

[13] : [www.neal-dz.net](http://www.neal-dz.net)

[14] [www.univ-chlef.dz/](http://www.univ-chlef.dz/)

[15] : **Éric Schiller** « le pompage photovoltaïque ». Manuel de cours, Université d'Ottawa, Canada.

[16] : **K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié**, « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique » Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Département de physique, LEPAS, Oujda, Maroc. Revue des énergies renouvelables, 451-462, 2007

[17.18]: **H.J. Möller**. Semi conductors for Solar Cells. Artech House, Inc, Norwood, MA, 1993

[19] : **S. NAOUAL**, "Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur," Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique 2010.

[20] : **S. M. Ait-Cheikh**, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[21] : **M.N. Mechalikh et CH.E. Hamada**. Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. Mémoire de Master Académique, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2013.

[22] : **M. Belhadj**, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008

[23] : **F. SALAMA** « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ». Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.

[24] : **M.S. Fateh**. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011.

[25] : **B. Chikh-Bled, I. Sari-Ali, B. Benyoucef**, « Méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïque », Revue internationale d'héliotechnique, N°41 ? PP. 24 -30 ,2010.

[26]: **M. SLAMA Fateh**"Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique." Mémoire de Magister, département d'Électrotechnique. UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF.

[27]: M. PETIBON Stéphane "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thesedoctorat . Universitetoulouse 2009.

[28]: N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie Buck-Boost appliquée à un MPPT ». Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[29] : R. Andoulssi : "étude d'une classe de système photovoltaïques par une approche bond graph : modélisation, analyse et commande". Thèse de doctorat université de Lille 2001

[30] : B. Flèche, D. Delagnes, « énergie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergies solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv.2014

[31] : S.Ait-Cheikh, "Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques," mémoire de Magister, Ecole nationale polytechnique 2007.

[32] : F.Slama, "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", mémoire Magister, département d'Electrotechnique, Université de Sétif 2012.

[33] : S. Kumari, "Comparison of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system," International journal of advances in engineering & technology (©IJAET) 2011.

[34] : A. Dolara, R. Faranda, and S. Leva, "Energy comparison of seven MPPT techniques for PV systems," Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, vol. 1, no. 3, pp. 152–162, 2009.

[35] : Naffouti, S. E. (2012). Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source Photovoltaïque. M.S. thesis, University of Burgundy, France.

[36] : A. Reza Reisi, M. Hassan Moradi, and S. Jamasb, "Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system : à review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 19, pp. 433–443, 2013.

**[37] : H. Malek and Y. Chen, “BICO MPPT : à faster maximum power point tracker and its application for photovoltaic panels,” International Journal of Photo energy, vol. 2014, Article ID 586503, 9 pages, 2014.**

**[38] : R. G. Tapre and R. G. Deshbhratar, “Comparative study and simulation of different maximum power point tracking (MPPT) techniques in a Solar power generation,” International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, vol. 3, pp. 143–148, 2015.**

**[39] : MERABET. L, OURICI. A & TOURAB. W, EFFICIENCY OF PERTURB AND OBSERVE MPPT FOR PV SYSTEM WITH BOOST CONVERTER BEST : International Journal of Management Information Technology and Engineering (P) : 2348–0513, ISSN (E) : 2454–471X Vol. 8, Issue 2, Feb 2020, 9-22**

**[40] : T. Eswam and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.**

**[41] : M.A. Husain et al, ‘ Comparative assessment of maximum power point tracking procedures for photovoltaic systems’ science direct. / Green Energy & Environment 2 (2017) pp.5-17. 2017.**

**[42] : Ressa. N, Omeiri. A, Merabet. L, Optimization Of The Energy Efficiency Of A Photovoltaic System By A Fuzzy MPPT Algorithm, The 3rd International Conference on Electromechanical Engineering ICEE’2018, Novembre 21-22, 2018, Skikda**