

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département Génie Electrique



## Projet de fin d'étude

*Pour l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique*

*Option : Electrotechnique Industriel*

## *Thème*

**Application des techniques MPPT  
intelligentes aux systèmes photovoltaïques**

**Réalisé par :**

**BENMAMAR Tinhinane**

**YAHIA CHERIF Achour**

**Devant le jury compose de:**

**Mr DJERMOUNI Kamel**

**Mr AMROUCHE Bessam**

**Encadré par :**

**Mr. TAMALOUZT Salah**

**Année universitaire : 2022/2023**

## Remerciements

Avant tout, nous remercierons le bon Dieu qui a illuminé notre chemin et qui nous a armés de force, de sagesse, et de bonne volonté pour achever ce modeste travail et ce cursus universitaire.

Ces quelques lignes ne vont jamais exprimer à la juste valeur notre reconnaissance à l'égard de notre promoteur **Mr. TAMALOUZT Salah** pour l'aide qu'il nous a offert durant la période de réalisation de ce travail et encore plus sa confiance et ses encouragements. Merci monsieur pour le temps que vous nous avez consacré, les conseils que vous nous avez prodigués, les vertus que vous nous avez inculqués.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre Co-promoteur **Mr ABAD Lahlou** pour son soutien. Nous sommes très sensibles au service que vous nous avez rendu. A tous les professeurs qui ont déployé leurs efforts pour nous assurer une formation complète et à toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé notre réflexion et ont accepté de nous rencontrer et répondre à nos questions. Nous tenons à remercier le président et les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner et juger notre travail.

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous, vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous nous avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Nous sommes redevables d'une éducation dont nous sommes fiers. Un grand merci à nos frères et sœurs qui étaient toujours à nos côtés. À vous qui nous avez soutenu et avez su être notre inspiration quand on avait des baisses de régime.

Enfin, nous remercions nos amis qui ont toujours été là pour nous, également nous adressons nos vives reconnaissances à tous les membres de Université A. MIRA – BEJAIA.

# Sommaire

Liste des figures .....	I
Listes des tableaux .....	IV
Abréviations .....	V
Introduction générale.....	6
Chapitre I. Généralités sur l'énergie photovoltaïque.....	3
Introduction .....	4
I.1 Energie solaire .....	4
I.1.1 Historiques des cellules photovoltaïques .....	4
I.2 Principe de de la conversion PV .....	5
I.2.1 Cellule photovoltaïque .....	5
I.3 Type des cellules photovoltaïques .....	5
I.3.1 Cellules monocristallines .....	5
I.3.2 Cellules poly- cristallines.....	6
I.3.3 Cellules Amorphe .....	7
I.3.4 Autres types de cellules : .....	8
I.4 Transfert d'énergie des photons aux charges électriques .....	8
I.5 Module photovoltaïque .....	8
I.5.1 Constitution d'un générateur photovoltaïque .....	9
I.6 Choix de panneau photovoltaïque : .....	9
I.6.1 Caractéristiques électriques de panneau PV .....	10
I.7 Influence de la température et l'éclairement sur le comportement du module PV.....	11
I.7.1 Influence de l'éclairement .....	11
I.7.2 Influence de la température : .....	12
I.8 Différents types de système photovoltaïque .....	13
I.8.1 Systèmes autonomes .....	13
I.8.2 Systèmes hybrides.....	14

I.8.3	Systèmes connectés au réseau.....	15
I.9	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	16
I.9.1	Avantages.....	16
I.9.2	Inconvénients .....	16
	Conclusion.....	17
	Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT.....	18
	Introduction .....	19
II.1	Modélisation d'un système photovoltaïque .....	19
II.1.1	Modélisation de générateur photovoltaïque.....	19
II.1.1.1	Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode.....	19
II.1.2	Etude du fonctionnement du convertisseur statique .....	23
II.1.2.1	Analyse de circuit .....	24
II.3	Poursuit de Point de Puissance Maximale .....	27
II.3.1	Méthode de perturbation et observation (P&O) .....	27
II.3.2	Méthode par incrémentation de conductance .....	28
II.3.3	Technique de la logique floue.....	30
II.3.3.1	Fuzzification .....	31
II.3.3.2	Inférence .....	33
II.3.3.3	Déffuzzification .....	34
II.2.1.2.4	Avantages et inconvénients de la logique floue.....	35
II.3.4	Optimisation par Essaim de Particules(PSO) .....	35
II.3.4.1	Principe de la technique PSO .....	355
	Conclusion.....	37
	Chapitre III. Résultats de simulation et Discussions.....	38
	Introduction .....	39
III.1	Simulation des parties de système photovoltaïque .....	39
III.1.1	Simulation de la technique P&O .....	39

III.1.2Simulation avec la technique INC.....	40
III.1.3Simulation avec la technique FLC .....	42
III.1.4Simulation avec la technique PSO .....	44
III.1.5Comparaison entre les différentes technique P&O, INC, FLC et PSO .....	45
III.2 Simulation du système PV sous ombrage partiel.....	47
III.2.1Simulation et comparaison des différentes techniques sous l'ombrage partiel.....	50
Conclusion.....	52
Conclusion générale .....	54
Références bibliographique.....	57

## Liste des figures

<b>Figure I. 1:</b> Cellules monocristallines. ....	6
<b>Figure I. 2:</b> Cellules poly- cristallines. ....	7
<b>Figure I. 3:</b> Cellules Couche mince (Amorphe). ....	7
<b>Figure I. 4:</b> Le module photovoltaïque. ....	8
<b>Figure I. 5:</b> Caractéristique courant – tension. ....	10
<b>Figure I. 6:</b> Caractéristique puissance – tension. ....	11
<b>Figure I. 7:</b> Influence d'éclairement sur la caractéristique puissance-tension d'un module PV. ....	11
<b>Figure I. 8 :</b> Influence d'éclairement sur la caractéristique courant-tension d'un module PV. ....	12
<b>Figure I. 9 :</b> Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension d'un module PV. ....	12
<b>Figure I. 10:</b> Influence de la température sur la caractéristique courant tension d'un module PV. ....	13
<b>Figure I. 11:</b> Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes. ....	14
<b>Figure I. 12 :</b> Configuration du système hybride à bus continu. ....	15
<b>Figure I. 13:</b> Systèmes photovoltaïque connectés au réseau. ....	16
<b>Figure II. 1 :</b> Eléments d'un système photovoltaïque. ....	19
<b>Figure II. 2:</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. ....	19
<b>Figure II. 3 :</b> Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque. ....	20
<b>Figure II. 4 :</b> Schéma bloc de génération du courant $I_{ph}$ . ....	21
<b>Figure II. 5 :</b> Schéma bloc de génération du courant $ID$ . ....	22
<b>Figure II. 6:</b> Schéma bloc de génération du courant $IRsh$ . ....	22
<b>Figure II. 7:</b> Schéma bloc de génération du courant $I$ . ....	23
<b>Figure II. 8:</b> Convertisseur DC/DC (Abaisseur de tension). ....	23
<b>Figure II. 9 :</b> Convertisseur DC/DC (Elévateur de tension). ....	24
<b>Figure II. 10 :</b> Schéma équivalent pour K fermé. ....	25
<b>Figure II. 11 :</b> Schema équivalent pour K ouvert. ....	26
<b>Figure II. 12 :</b> Schéma bloc d'un convertisseur Boost. ....	27
<b>Figure II. 14 :</b> Organigramme de l'algorithme de P&O. ....	28

<b>Figure II. 14 :</b> Algorithme d'une commande MPPT basé sur la méthode incrément de conductance.....	30
<b>Figure II. 15 :</b> Structure générale d'un contrôleur flou.....	31
<b>Figure II. 16:</b> Fonctions d'appartenances de la de la variable d'entrée CE.....	33
<b>Figure II. 17 :</b> Fonctions d'appartenances .....	33
<b>Figure II. 18 :</b> fonctions d'appartenances de la variable de sortie $\Delta D$ .....	33
<b>Figure III. 1:</b> Technique P&O sous Matlab/Simulink. ....	39
<b>Figure III. 2:</b> La puissance du panneau avec la méthode P&O. ....	40
<b>Figure III. 3 :</b> La Tension de panneau avec la méthode P&O. ....	40
<b>Figure III. 4:</b> Technique INC sous Matlab/Simulink.....	41
<b>Figure III. 5 :</b> Puissance de panneau avec la méthode INC.....	41
<b>Figure III. 6:</b> Tension du panneau avec la méthode INC. ....	42
<b>Figure III. 7:</b> Schéma bloc du controleur flou sous Matlab/Simulink. ....	42
<b>Figure III. 8 :</b> Puissance du panneau PV avec la méthode FLC. ....	43
<b>Figure III. 9 :</b> Tension du panneau avec la méthode FLC. ....	43
<b>Figure III. 10:</b> Schéma bloc de système PV avec la technique PSO. ....	44
<b>Figure III. 11:</b> Puissance du panneau PV avec la méthode PSO sous STC.....	44
<b>Figure III. 12 :</b> Tension du panneau PV avec la méthode PSO sous STC. ....	45
<b>Figure III. 13:</b> Profile d'ensoleillement utilisé pour la simulation des trois techniques P&O, INC, et FLC.....	45
<b>Figure III. 14 :</b> Comparaison des puissances obtenues avec P&O, IC et FLC (ensoleillement variable).....	46
<b>Figure III. 15 :</b> Zoom de la figure III.14 de $t=0.08$ à $t=0.11$ .....	46
<b>Figure III. 16:</b> Zoom de la figure III.14 de $t=1.6$ à $t=1.645$ .....	46
<b>Figure III. 17 :</b> Schéma montre la connexion des diodes by-pass sur les cellules PV. ....	48
<b>Figure III. 18 :</b> Caractéristique I-V du panneau en présence de l'ombrage partiel (1er profil). .....	49
<b>Figure III. 19 :</b> Caractéristique P_V du panneau en présence de l'ombrage partiel (1er profile). .....	49
<b>Figure III. 20 :</b> Caractéristique I-V du panneau en présence de l'ombrage partiel (2ème profil). .....	50
<b>Figure III. 21 :</b> Caractéristique P-V du panneau en présence de l'ombrage partiel (2ème profil). .....	50

<b>Figure III. 22</b> : Caractéristique P_V du panneau en présence de l'ombrage partiel (1er profile) pour les différentes techniques.....	51
<b>Figure III. 23</b> : Caractéristique P_V du panneau en présence de l'ombrage partiel (2ème profile) pour les différentes techniques.....	51



## Liste des tableaux

<b>Tableau I. 1:</b> Caractéristiques techniques du panneau solaire dans les conditions standard. .	10
<b>Tableau II. 1:</b> Table d'inférence. ....	34
<b>Tableau III. 1 :</b> Tableau comparatif des techniques MPPT d'un système PV en cas de changement d'ensoleillement. ....	47
<b>Tableau III. 2:</b> Comparaisons des différentes techniques sous ombrage partiel. ....	52

## **Abréviations**

<b>DC-DC</b>	: Courant Continue/Courant Continue
<b>FLC</b>	: Logique Floue
<b>GPV</b>	: Générateur Photovoltaïque
<b>INC</b>	: Conductance Incrémentale
<b>I-V</b>	: Courant-Tension
<b>MPPT</b>	: Maximum Power Point Tracking
<b>P&amp;O</b>	: Perturb and Observe
<b>PPM</b>	: Point de Puissance Maximal
<b>PSO</b>	: ParticleSwarmOptimization
<b>PV</b>	: Photovoltaïque
<b>P-V</b>	: Puissance-Tension
<b>STC</b>	: Standard Test Conditions

# **Introduction Générale**

## **Introduction générale**

---

### **Introduction générale**

De nos jours, l'utilisation de l'énergie est essentielle dans la vie quotidienne de tout le monde, ces dernières années sa demande ne cesse d'augmenter, actuellement l'énergie consommée est générée à partir de combustibles fossiles, ce qui a des conséquences négatives sur l'environnement, notamment en termes de pollution et de réchauffement climatique. Face à ce problème, le développement des énergies non polluantes et renouvelables est devenu la solution ultime [1].

Dans ce contexte, l'énergie photovoltaïque se distingue comme une source d'énergie renouvelable offrant une solution aux problèmes de production d'énergie, elle présente l'avantage d'être à la fois non polluante et inépuisable. Ainsi que son rendement dépend de l'intensité lumineuse et de la température [2].

Notre étude se focalise sur l'énergie photovoltaïque qui est produite directement à partir du rayonnement solaire grâce à l'effet photovoltaïque. Cet effet permet de convertir les photons en électrons à l'aide de panneaux photovoltaïques qui sont constitués de cellules photovoltaïques [3].

Notre intérêt principal réside dans la procédure d'optimisation qui permet de suivre le point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking) d'un générateur photovoltaïque (GPV). Cette approche vise à exploiter de manière optimale le générateur photovoltaïque, quelles que soient les conditions météorologiques. Notre travail sera divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons d'une manière globale des généralités sur l'énergie photovoltaïque. Nous examinerons également la structure du générateur photovoltaïque (GPV), y compris les différents types de cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques électriques, tout en prenant en compte l'impact de l'ensoleillement et de la température sur leur performance. De plus, nous présenterons les différents types de systèmes photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous allons modéliser et rechercher le modèle mathématique des différents composants d'un système photovoltaïque. Par la suite, nous aborderons les différentes techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans le cas standard et dans le cas d'ombrage partiel.

Dans le dernier chapitre, nous nous intéresserons à la simulation de système photovoltaïque et les différentes techniques MPPT avec Matlab/Simulink sous les conditions

## **Introduction générale**

---

standards et en cas d'ombrage partiel, afin d'effectuer une comparaison de leurs performances et évaluer les résultats.

Enfin nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale, dont nous rappelons quelques commentaires et que les perspectives qui pourront faire suite à notre travail.

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

### Introduction

Les considérations environnementales jouent un rôle de plus en plus important dans les discussions sur l'avenir énergétique de notre planète. Bien que les sources d'énergie fossiles continuent de dominer le marché énergétique, l'augmentation du prix du pétrole et les préoccupations liées au réchauffement climatique ont ravivé l'intérêt pour les sources alternatives.

Depuis longtemps, le stockage et l'utilisation de l'énergie solaire font l'objet de nombreuses recherches, et différents dispositifs commerciaux ont été développés. Les systèmes photovoltaïques permettent de capter l'énergie du soleil pour diverses applications. Ils sont très fiables et représentent une source d'électricité non polluante qui convient à un large éventail d'utilisations [1].

### I.1 Energie solaire

L'énergie solaire offre une alternative aux énergies fossiles traditionnelles. Elle est abondante à notre échelle et présente sur toute la surface de la Terre, ce qui permet de capter jusqu'à  $1000\text{W/m}^2$  dans les zones tempérées. Que l'on se trouve en milieu urbain ou isolé, cette énergie peut être collectée et utilisée pour produire de la chaleur ou de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque [1].

Le terme "photovoltaïque" fait référence au processus de conversion de la lumière solaire en électricité sans l'utilisation de pièces mobiles, sans bruit, sans pollution ni combustible. Il s'agit d'une forme d'énergie électrique générée à partir du rayonnement solaire en utilisant des panneaux solaires ou des centrales photovoltaïques.

#### I.1.1 Historiques des cellules photovoltaïques

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque [2] :

➤ **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de

L'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet

Photovoltaïque.

➤ **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

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

---

➤ **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

➤ **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

➤ **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

➤ **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

### **I.2 Principe de la conversion PV**

#### **I.2.1 Cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui comprend un matériau semi-conducteur capable d'absorber l'énergie lumineuse et de la convertir directement en courant électrique. Le fonctionnement de cette cellule repose sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par les semi-conducteurs. Parmi ceux-ci, le silicium est le matériau le plus largement utilisé en raison de sa disponibilité et de la connaissance approfondie de son comportement électrique. Le silicium se trouve abondamment dans la nature et est utilisé sous différentes formes en fonction des performances souhaitées.

La cellule solaire agit comme un convertisseur, transformant l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est réalisée en utilisant un matériau semi-conducteur appelé jonction P-N [3].

### **I.3 Type de cellules photovoltaïques**

#### **I.3.1 Cellules monocristallines**

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal, (Figure I.1).

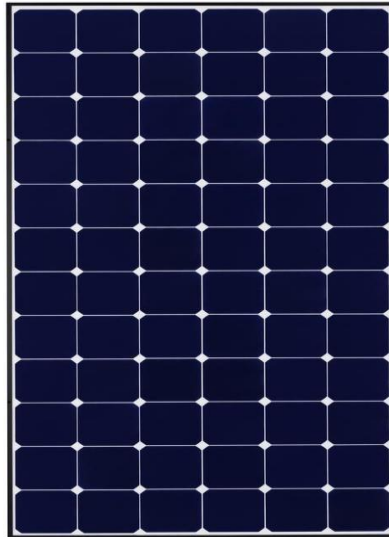
Le processus de fabrication des cellules photovoltaïques est long et énergivore. Bien que plus coûteux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin. Dans ce procédé, le silicium brut est fondu pour former un barreau, et lorsqu'il refroidit lentement et de manière contrôlée, on obtient un monocristal. Ensuite, une tranche de silicium appelée "wafer" est découpée à partir de ce barreau de silicium.



## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

---

Après plusieurs étapes de traitement (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt d'une couche antireflet, installation des collecteurs), le wafer se transforme en cellule photovoltaïque. Les cellules peuvent être rondes ou carrées et, lorsqu'on les observe de près, elles ont une couleur uniforme. Leur rendement se situe généralement entre 12 et 18%. La méthode de production des cellules est laborieuse et nécessite une attention minutieuse à chaque étape [2].



**Figure I. 1** Cellules monocristallines.

### I.3.2 Cellules poly- cristallines

Les panneaux PV avec des cellules poly cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes) (figure I.2).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui largement imposées.

L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication [2].

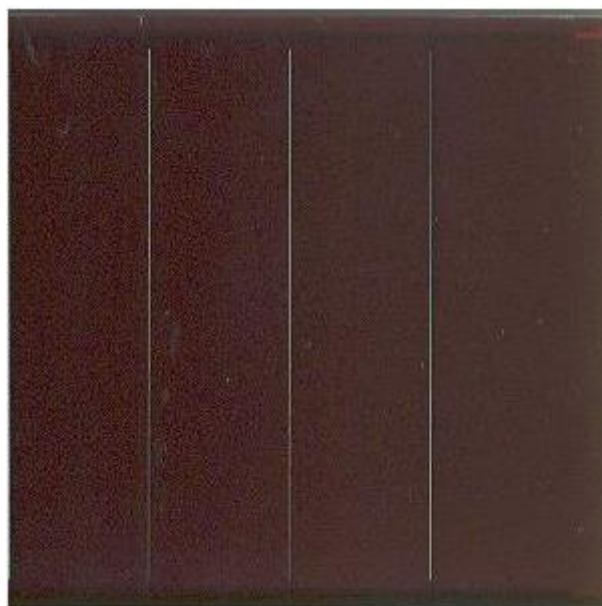


**Figure I. 2** Cellules poly- cristallines.

### **I.3.3 Cellules Amorphe**

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Bien que le rendement de ces panneaux soit moins bon que celui des technologies polycristallines ou monocristallines, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première [2].



**Figure I. 3** Cellules Couche mince (Amorphe).

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

### I.3.4 Autres types de cellules :

Faibles coûts de fabrication. Si ce type d'énergie doit être développé à très grande échelle comme «Générateur électrique», il faut résoudre le problème du prix des capteurs. Aussi, depuis plusieurs années, on parle de matériaux organiques et de polymères qui présentent, sous certaines conditions, des propriétés photovoltaïques. Ceci suscite actuellement un regain de recherches dans divers laboratoires dans le monde, renouvelant d'autant les efforts portés sur la synthèse des matériaux. Ces cellules, dites de troisième génération, bien qu'actuellement présentent de faibles rendements par rapport aux capteurs inorganiques [record mondial de 3,5% établi en 2001], sont intéressantes par leur très faible coût et sont donc prometteuses pour l'avenir [2].

### I.4 Transfert d'énergie des photons aux charges électriques

On va s'intéresser maintenant à la lumière absorbée par le matériau photovoltaïque et expliquer comment son énergie est convertie en électricité pour bien comprendre le rôle de la cellule PV. Pour cela, on étudiera l'élément de base qui constitue celle-ci appelé jonction P-N.

### I.5 Module photovoltaïque

Le panneau solaire photovoltaïque étant une association de cellules solaires individuelles

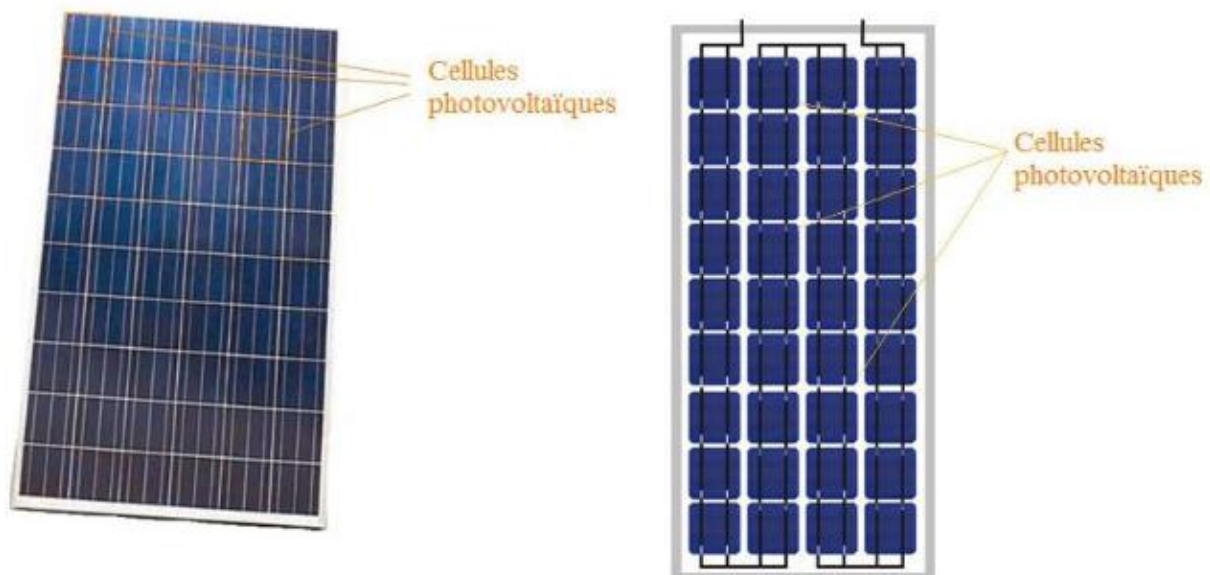


Figure I. 4 Module photovoltaïque.

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

---

### I.5.1 Constitution d'un générateur 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 carrées délivres, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de la jonction P-N. Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant .Le câblage série / parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées.

Afin d'obtenir en sortie du générateur PV des valeurs d'intensité et de tensions désirées on fait appel aux deux types d'assemblages série / parallèle, et la puissance disponible à la sortie du générateur en fonction de  $n_s$  cellules en série et  $n_p$  en parallèle est donnée par :

$$P_{pv} = n_s V_{pv} n_p I_{pv} \quad (I.1)$$

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus grand, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les cellules ( $n_s$ .  $n_p$ ) se comportent toutes de façon identique, elles doivent pour cela être issues de la même technologie du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (radiation, température, vieillissement et inclinaison) [4]

### I.6 Choix de panneau photovoltaïque :

Le tableau II.1 montre les paramètres techniques d'un panneau solaire composé de 72 cellules, ayant une puissance maximale de 190.89W considérée dans les conditions standards ( $G=1000w/m^2$ ,  $T=25^\circ C$ ).

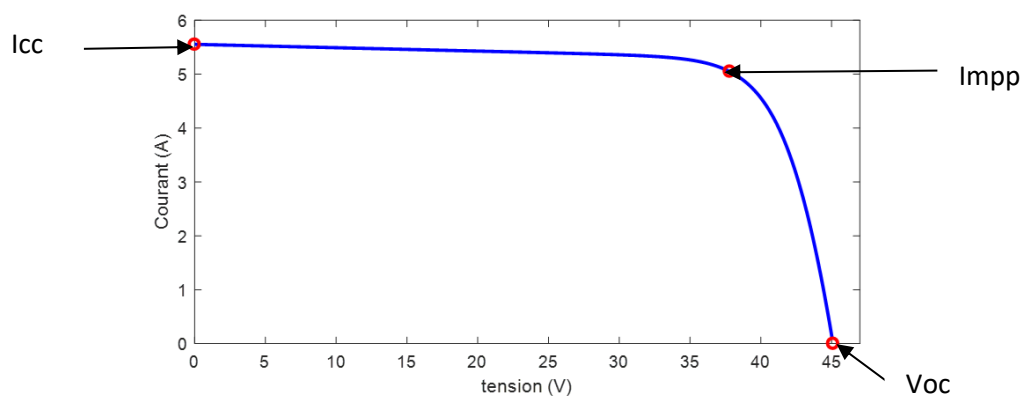
**Tableau I. 1** Caractéristiques techniques du panneau solaire dans les conditions standard.

caractéristiques	valeurs
Puissance maximal MPP(W)	190.89
Tension au point maximal $V_{mpp}$ (V)	37.8
Courant au point maximal $I_{mpp}$ (A)	5.05
Tension circuit ouvert $V_{oc}$ (V)	45.1
Courant circuit ouvert $I_{cc}$ (A)	5.55
Nombre de cellules en série	72

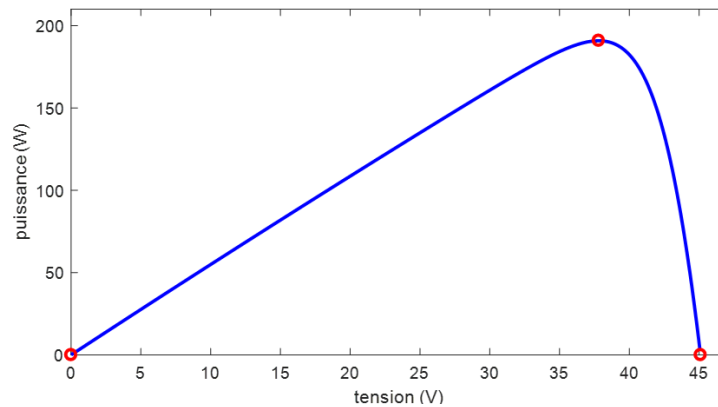
### I.6.1 Caractéristiques électriques de panneau PV

La caractéristique V.I est une courbe non linéaire qui présente un unique point optimal, où la puissance atteint son maximum (MPP). Les valeurs optimales correspondantes de tension et du courant sont  $I_{mpp}$  et  $V_{mpp}$  [5].

Le courant du panneau diminue à partir d'une valeur initiale  $I_{cc}$ , tandis que la tension augmente jusqu'à une valeur  $V_{oc}$ . (Référez-vous à la Figure I.5 et à la Figure I.6). Les différentes caractéristiques sont obtenues dans des conditions standard ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 25 \text{ °C}$ ). Les valeurs des points spécifiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$  et MPP) des courbes suivantes sont définies précédemment dans le Tableau I.1.



**Figure I. 5:** Caractéristique tension – courant



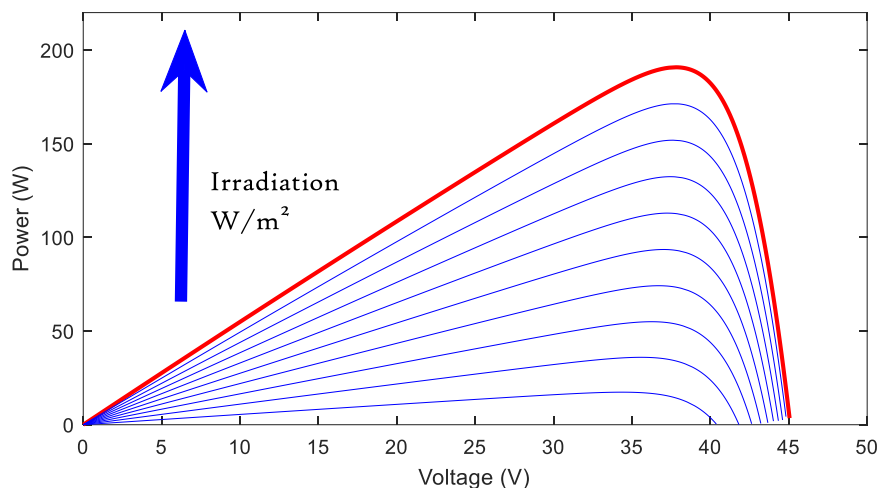
**Figure I. 6:** Caractéristique tension – puissance

### I.7 Influence de la température et l'éclairement sur le comportement du module PV

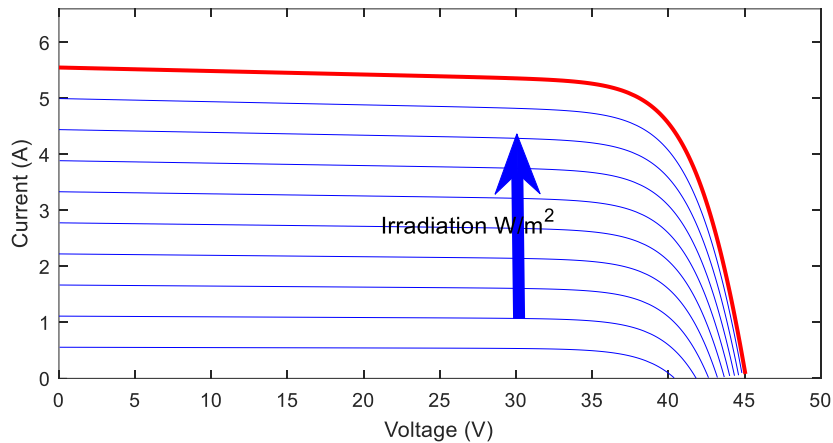
#### I.7.1 Influence de l'éclairement

Les figures I.7 et I.8 illustrent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs d'éclairement, à une température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ).

On observe que de fortes variations de l'éclairement entraînent des variations relativement importantes du courant de court-circuit. En revanche, la tension de circuit ouvert varie très peu en fonction de l'éclairement (voir Figure I.8). Par conséquent, la variation du point de puissance maximale (PPM) est proportionnelle à l'éclairement (voir Figure I.7).



**Figure I. 7:** Influence d'éclairement sur la caractéristique tension-puissance d'un module PV.

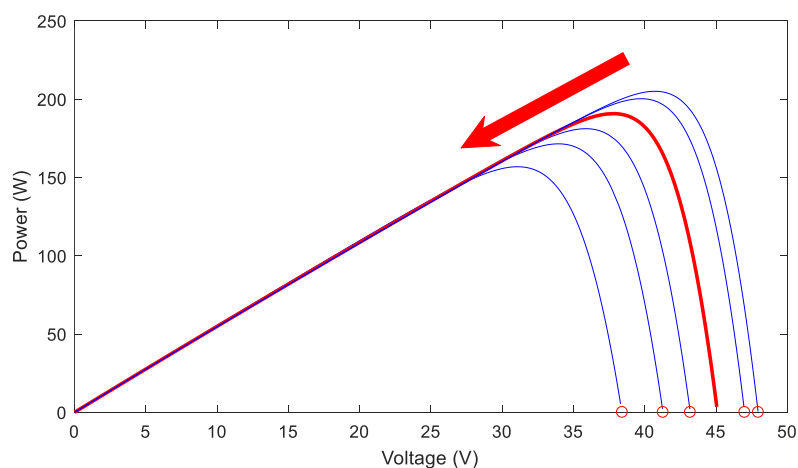


**Figure I. 8:** Influence d'éclairement sur la caractéristique tension-courant d'un module PV.

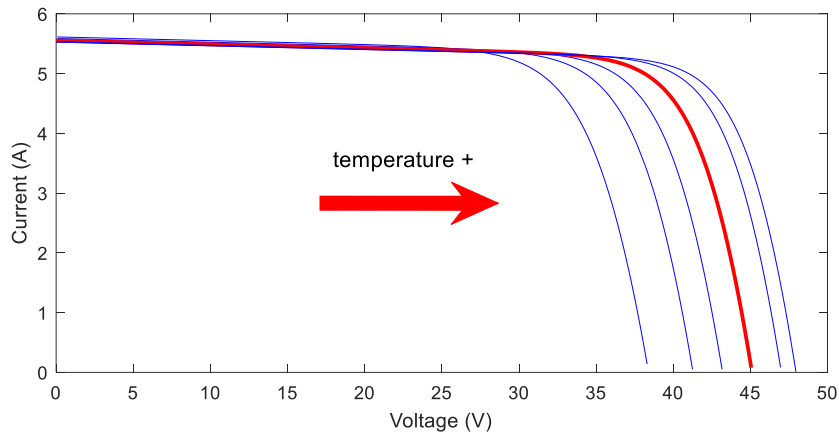
### I.7.2 Influence de la température :

La température  $T$  a un effet direct sur les performances d'un module PV, comme le montrent les figures I.9 et I.10.

Lorsque la température du module PV augmente pour un éclairement constant ( $1000 \text{ W/m}^2$ ), la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  diminue considérablement, tandis que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  (qui représente essentiellement le photo courant généré dans le module PV) augmente légèrement. Cela entraîne une réduction de la puissance maximale du générateur. Ainsi, on peut constater que les panneaux PV ont de meilleures performances dans un environnement froid et ensoleillé que dans un environnement chaud.



**Figure I. 9:** Influence de la température sur la caractéristique tension-puissance d'un module PV.



**Figure I. 10:** Influence de la température sur la caractéristique tension-courant d'un module PV.

### I.8 Différents types de système photovoltaïque

Trois types de systèmes photovoltaïques sont couramment rencontrés : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau électrique. Les deux premiers fonctionnent de manière indépendante du réseau de distribution d'électricité et sont souvent utilisés dans des régions éloignées [6].

#### I.8.1 Systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour fonctionner de manière autonome, sans dépendre d'autres sources d'énergie. Ils sont généralement utilisés dans des régions éloignées et isolées du réseau électrique. La figure (I.11) décrit les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes, qui offrent diverses possibilités telles que le couplage direct à une charge appropriée, le couplage avec un adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), le fonctionnement en suivant le soleil ou avec un stockage d'énergie électrique [6].



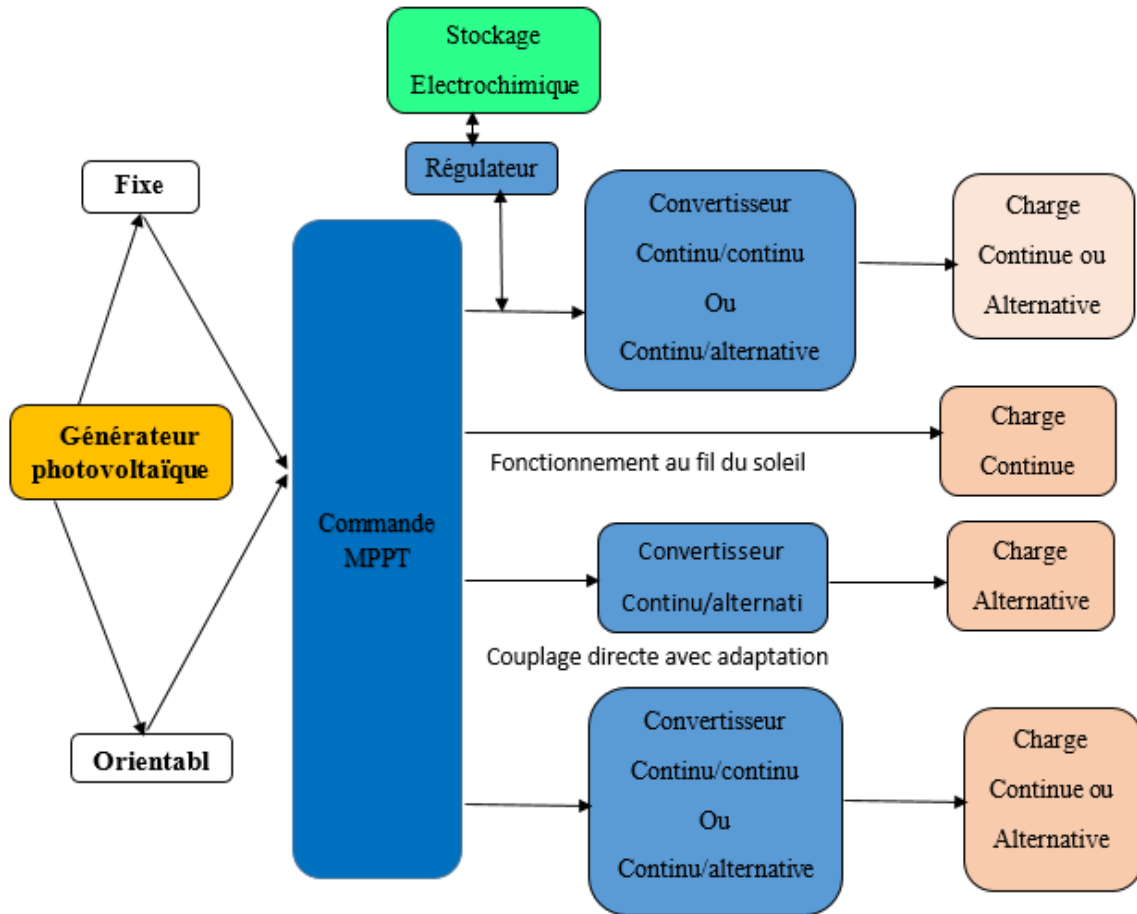


Figure I. 11 Différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.

### I.8.2 Systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride combinent au moins deux sources d'énergie renouvelable ainsi qu'une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelle. Les sources d'énergie renouvelable, telles que le photovoltaïque et l'éolien, ne fournissent pas une puissance constante, mais en les associant, on peut obtenir une production électrique continue grâce à leur complémentarité. Les systèmes d'énergie hybride sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans des régions isolées.

Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées selon deux configurations : l'architecture à bus continu et l'architecture à bus alternatif [6].

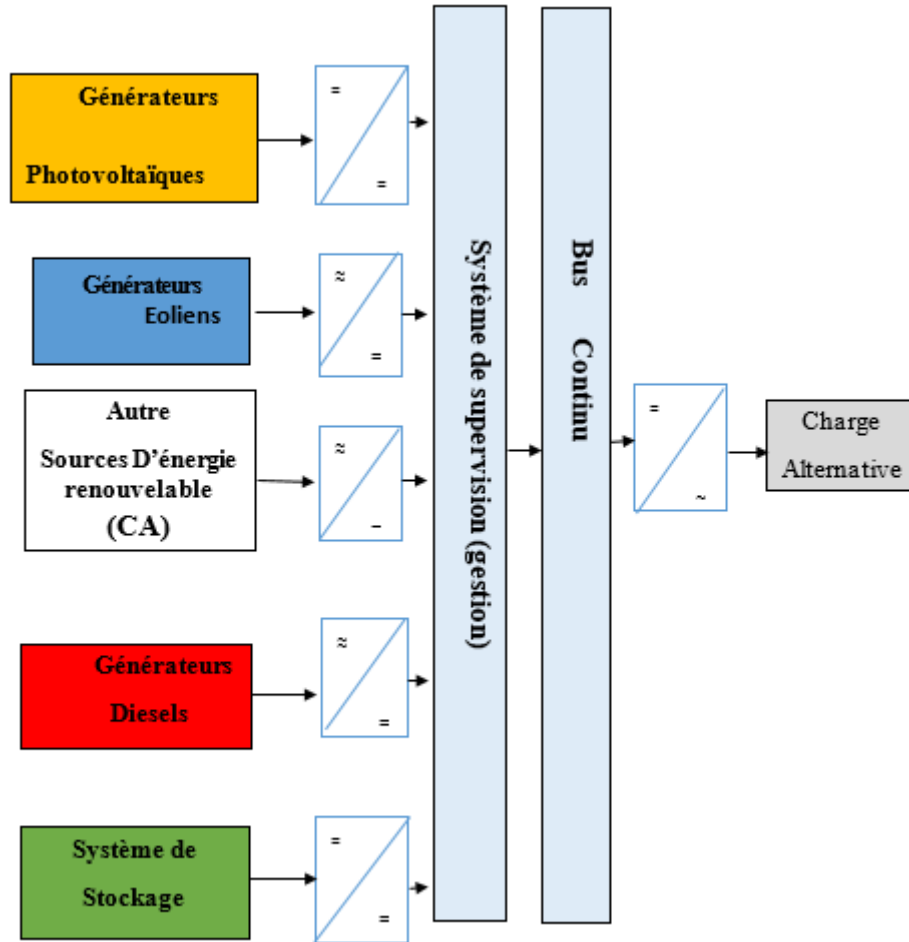


Figure I. 12: Configuration du système hybride à bus continu.

### I.8.3 Systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés au réseau électrique (voir Figure I.13) sont une conséquence de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. Ces systèmes permettent de produire de l'énergie plus près des lieux de consommation. En étant connectés au réseau, ils réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Ces systèmes produisent leur propre électricité et envoient l'excédent d'énergie vers le réseau, tout en se fournissant en électricité du réseau lorsque nécessaire. Ces échanges éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. De plus, ces systèmes peuvent également servir d'alimentation d'appoint en cas de panne du réseau [6].

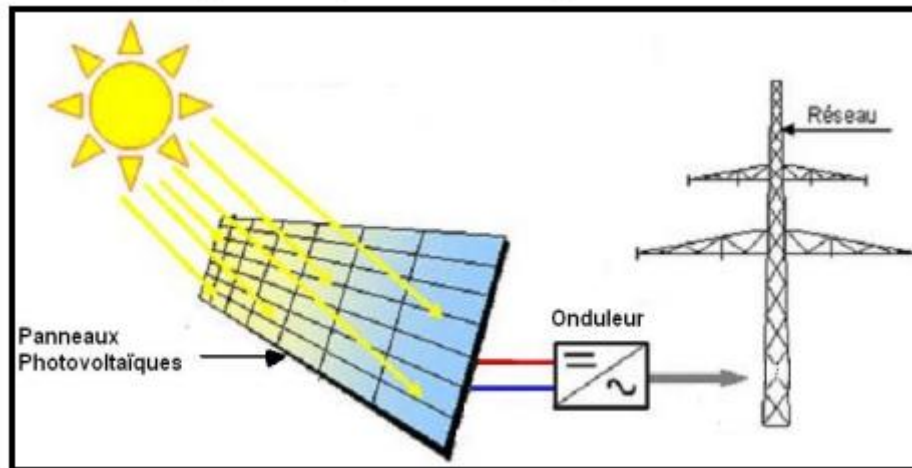


Figure I. 13: Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.

### I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

#### I.9.1 Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- La technologie photovoltaïque ne comporte aucune pièce mobile c'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux ;

- Les panneaux photovoltaïques sont faits sous forme de modules, ce caractère permet un montage simple qui s'adapte à tous les besoins énergétiques pour les réalisations de puissances.

Le dimensionnement des systèmes PV peut atteindre le Mégawatt ;

- Vu les entretiens réduits le coût de fonctionnement des systèmes PV sont très faibles, ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personne hautement spécialisé ;

- Cette technologie présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [2].

#### I.9.2 Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallisé est 28%) ;

- Les générateurs ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée ;

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

---

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (Batterie) est nécessaire ; le coût du générateur photovoltaïque est accru .La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que pour les batteries et les composants de régularisation associés soient judicieusement choisis [2].

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur le système photovoltaïque et exploré le principe de la conversion photovoltaïque et leurs différentes technologies les plus utilisées ainsi leurs caractéristiques avec l'influence des différents paramètres climatiques sur le module photovoltaïque. En fin on a cité les différents systèmes PV utilisée avec leurs avantages et inconvénients.

**Chapitre I. Modélisation du système  
photovoltaïque et méthodes MPPT**

### Introduction

Dans le but de la modélisation et de la simulation d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT, en première étape on passera par la modélisation et simulation des principaux composants du système photovoltaïque avec leurs modèles mathématiques. Ensuite, nous aborderons les diverses techniques couramment utilisées pour la poursuite du point de puissance maximale (PPM) dans les conditions standard.

### II.1 Modélisation d'un système photovoltaïque

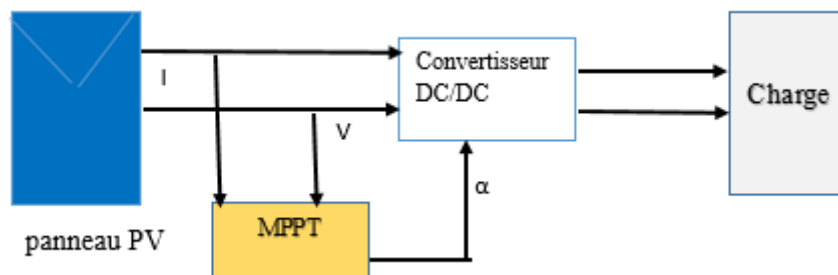


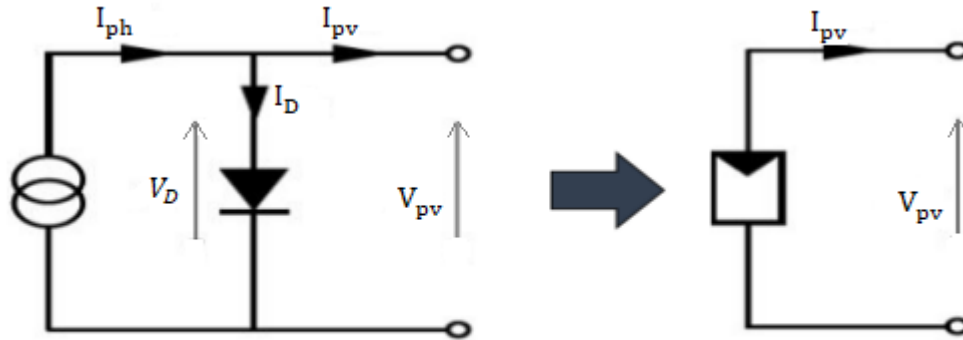
Figure II. 1 Eléments d'un système photovoltaïque.

#### II.1.1 Modélisation de générateur photovoltaïque

Dans le système photovoltaïque l'élément fondamental est la cellule, pour cela il faut d'abord commencer par la modélisation de la cellule photovoltaïque [3].

##### II.1.1.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode

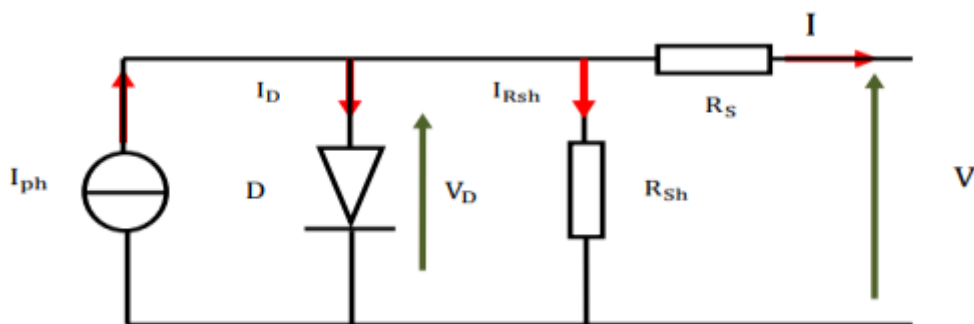
Le schéma du circuit équivalent idéal simplifié d'une cellule photovoltaïque est dérivé des caractéristiques de la jonction PN et de la réponse du semi-conducteur au rayonnement.



**Figure II. 2** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Le modèle le plus couramment utilisé et classique pour une cellule photovoltaïque est le modèle à une diode. Ce modèle intègre un générateur de courant  $I_{ph}$  pour représenter le flux lumineux incident, ainsi qu'une diode  $D$  pour prendre en compte les phénomènes de polarisation de la cellule. Pour prendre en compte les caractéristiques physiques de la cellule, le modèle est complété par deux résistances en série et en dérivation, respectivement  $R_s$  et  $R_{sh}$

La résistance série  $R_s$  représente la résistance interne de la cellule et dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. La résistance shunt  $R_{sh}$  est due à un courant de fuite au niveau de la jonction et dépend de la manière dont cette jonction a été réalisée. [5]



**Figure II. 3** Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Lorsque les côtés du circuit sont connectés à une charge  $R$ , un courant  $I$  circule à travers le circuit, ce qui entraîne l'apparition d'une différence de potentiel. La loi de Kirchhoff nous permet d'exprimer cette relation de la manière suivante :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \dots \text{(II.1)}$$

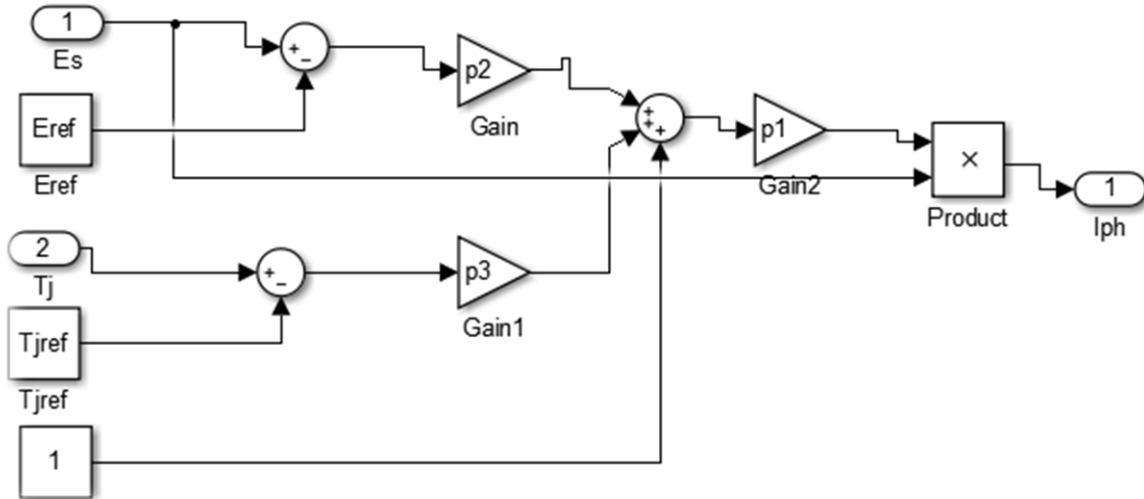
## Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT

Où :

I: Courant délivré par la cellule solaire

$I_{ph}$ : Le photo-courant, peut être exprimé en fonction de l'insolation comme suit :

$$I_{ph} = \left[ \left[ (E_s - E_{ref}) P_2 \right] + \left[ (T_j - T_{jref}) P_3 \right] + 1 \right] P_1 E_s \dots (II.2)$$



**Figure II. 4** Schéma bloc de génération du courant  $I_{ph}$

Avec :

$E_{ref}$  : Ensoleillement dans les conditions standard tel que :  $E_{ref}=1000 \text{ w/m}^2$

$E_s$  : Ensoleillement instantané mesuré pendant la journée [ $\text{w/m}^2$ ]

$T_{jref}$  : Température dans les conditions standard tel que :  $T_{jref}=25\text{C}^\circ=298\text{K}$

$T_j$  : Température instantanée pendant la journée (K).

$P_1, P_2, P_3$  : Paramètres constantes

$I_D$ : Le courant de polarisation d'une diode, il est donné par :

$$I_D = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{A * n_s * K * T_j} \right) - 1 \right] \dots (II.3)$$

$$I_0 = P_4 T_j^3 \exp \left( \frac{-E_g}{K * T_j} \right) \dots (II.4)$$



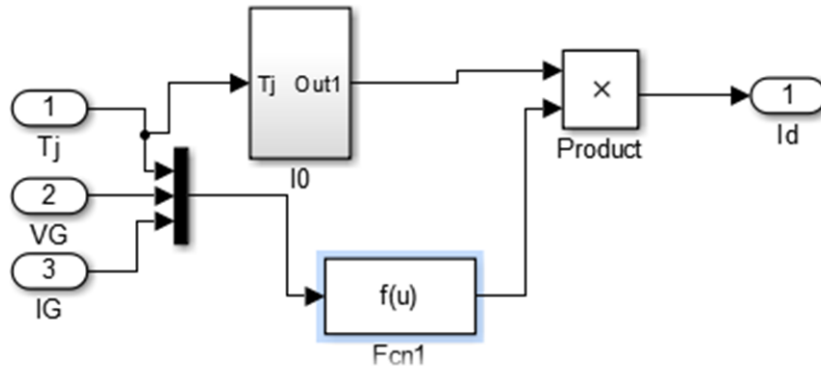


Figure II. 5 Schéma bloc de génération du courant  $I_D$

Avec :

$I_0$  : Courant de saturation de la diode [A].

$V_{pv}$  : Tension aux bornes de la diode [V].

$R_s$  : La résistance séries[ $\Omega$ ].

$q$  : Charge d'électron tel que  $q=1.062.10^{-19}$  [C].

$A$ : Facteur d'idéalité de la diode.

$K$  : Constante de Boltzmann tel que :  $K=1.38. 10^{-23}$  [J/K].

$n_s$  : Nombre de cellule en série dans un module.

$I_0$ : Le courant de saturation il est fortement dépendant de la température.

$E_g$ : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 ev.

$I_{Rsh}$ : Le courant parcourue la résistance  $R_{sh}$ , il est donné par :

$$I_{Rsh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} * R_s}{R_{sh}} \dots (II.5)$$

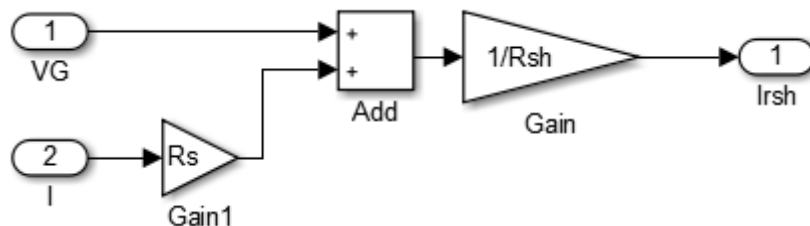


Figure II. 6 Schéma bloc de génération du courant  $I_{Rsh}$

Avec :

$R_{sh}$ : Résistance shunt [ $\Omega$ ].

Ce qui donne :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{A \cdot n_s \cdot K \cdot T_j} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \dots \quad (II.6)$$

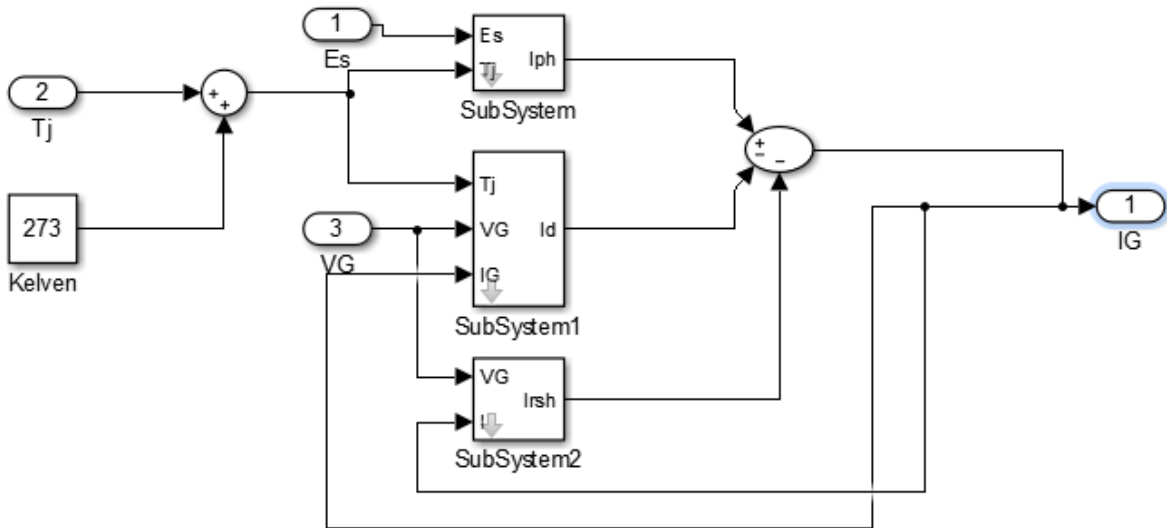


Figure II. 7 Schéma bloc de génération du courant I.

### II.1.2 Etude de fonctionnement du convertisseur statique

Les convertisseurs de courant continu à courant continu ont pour rôle de transformer une tension continue fixe en une tension continue variable pour alimenter des appareils spéciaux, il existe deux types [8] :

A- Le convertisseur série : est utilisé pour générer une tension inférieure à celle de l'entrée, il est représenté sur la figure ci-dessous :

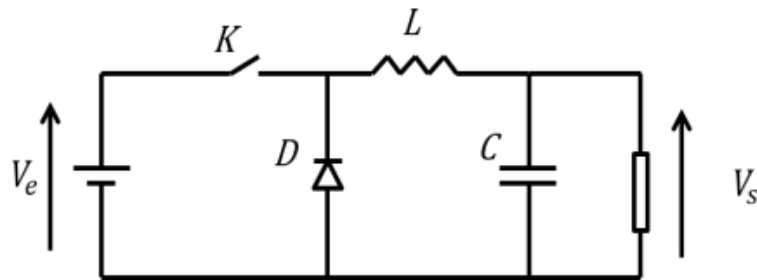
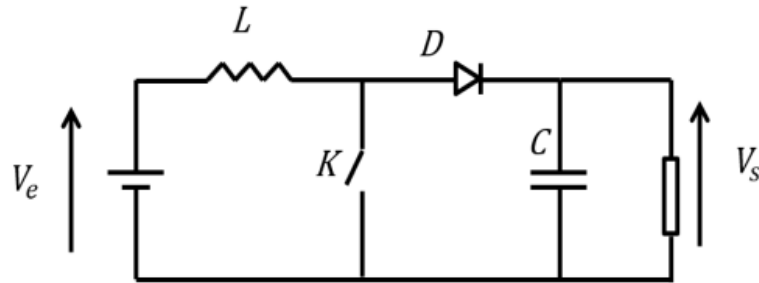


Figure II. 8 Convertisseur DC/DC (Abaisseur de tension).

## Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT

b- Le convertisseur parallèle est utilisé pour générer une tension supérieure à celle fournie par les panneaux solaires ou des batteries de stockage, il est représenté sur la figure ci-dessous :



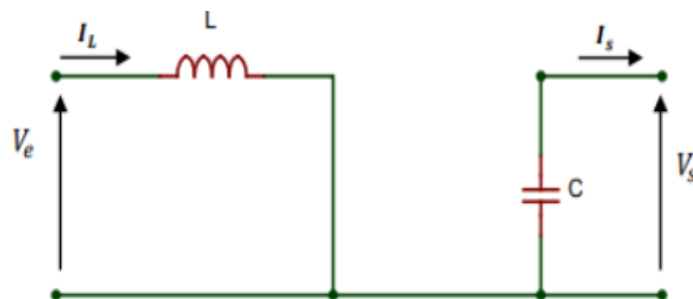
**Figure II. 9** Convertisseur DC/DC (Elévateur de tension).

Un convertisseur Boost (hacheur parallèle) est un dispositif conçu pour convertir une tension d'entrée en courant continu (DC) en une tension de sortie (DC) d'un niveau beaucoup plus élevé. Ce type de convertisseur est également connu sous le nom de hacheur survolteur.

### II.1.2.1 Analyse de circuit

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes en fonction de l'état de l'interrupteur  $K$ .

Lorsque l'interrupteur  $K$  est fermé ( $t_{on}$ ) et que la diode  $D$  est bloquée, le courant en provenance du module solaire traverse la bobine et augmente, ce qui permet à l'énergie d'être stockée dans la bobine  $L$ . Pendant cette période, le condensateur  $C$  assure le courant de sortie, et cela se produit pendant un laps de temps allant de  $[0 \text{ à } \alpha T]$ .



**Figure II. 10** Schéma équivalent pour  $K$  fermé.

Les équations qui définissent le fonctionnement du convertisseur pendant cet intervalle de temps sont les suivantes [5] :

## Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT

$$V_e = L \frac{dI_L}{dt} \dots \text{(II.7)}$$

$$I_{L\_on} = I_{L\_min} + \frac{V_e}{L} t \dots \text{(II.8)}$$

A la fin du cycle le courant de la bobine atteint la valeur maximale donnée par :

$$I_{L\_max} = I_{L\_min} + \frac{V_e}{L} t_{on} \dots \text{(II.9)}$$

$$A_{vect_{on}} = \alpha T$$

Où

$\alpha$ : Le rapport cyclique

$t_{on}$  : Le temps de la phase de fermeture [s]

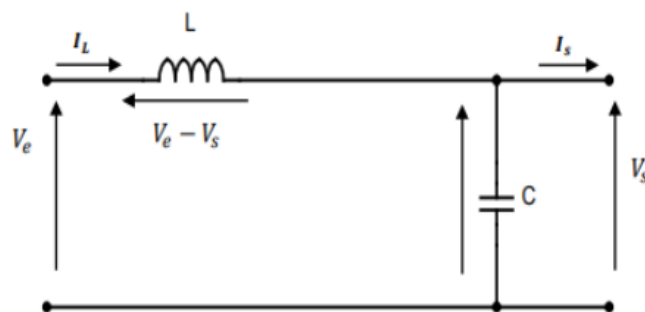
$L$  : l'inductance de la bobine [H]

$V_e$ : La tension d'entrée [V]

$I_{L\_on}$ : Le courant de la bobine pendant la phase de fermeture [A]

$I_{L\_min}$ : Le courant de la bobine au début de la phase de fermeture [A]

Lorsque l'interrupteur K est ouvert et que la diode D est conductrice pendant la durée  $T_{off}$ , l'énergie stockée dans la bobine est transférée vers le condensateur, qui se charge en conséquence.



**Figure II. 10** : Schema équivalent pour K ouvert.

La tension au bornes de la bobine est alors :

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_e - V_s \dots \text{(II.10)}$$

## Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT

---

En résolvant cette équation différentielle, on obtient la formule suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$I_{L\_off} = I_{L\_max} + \frac{V_e - V_s}{L} t \dots (II.11)$$

À la fin de cette période le courant de la bobine reprend sa valeur minimale donnée par :

$$I_{L\_min} = I_{L\_max} + \frac{V_e - V_s}{L} t_{off} \dots (II.12)$$

**Où :**

$I_{L\_off}$ : Le courant de la bobine pendant la phase d'ouverture [A]

$t_{off}$  : Le temps de la phase d'ouverture [S]

La période du signal de commande est donnée par :

$$T = t_{on} + t_{off} \dots (II.13)$$

Et le rapport cyclique  $\alpha$  est défini par la relation :

$$\alpha = \frac{t_{on}}{T} \dots (II.14)$$

Ce qui donne :

$$t_{off} = (1 - \alpha)T \dots (II.15)$$

Les équations(II.9)et (II.12) deviennent :

$$I_{L\_max} - I_{L\_min} = \frac{V_e}{L} \alpha T \dots (II.16)$$

$$I_{L\_max} - I_{L\_min} = \frac{V_s - V_e}{L} (1 - \alpha)T \dots (II.17)$$

On obtient alors :

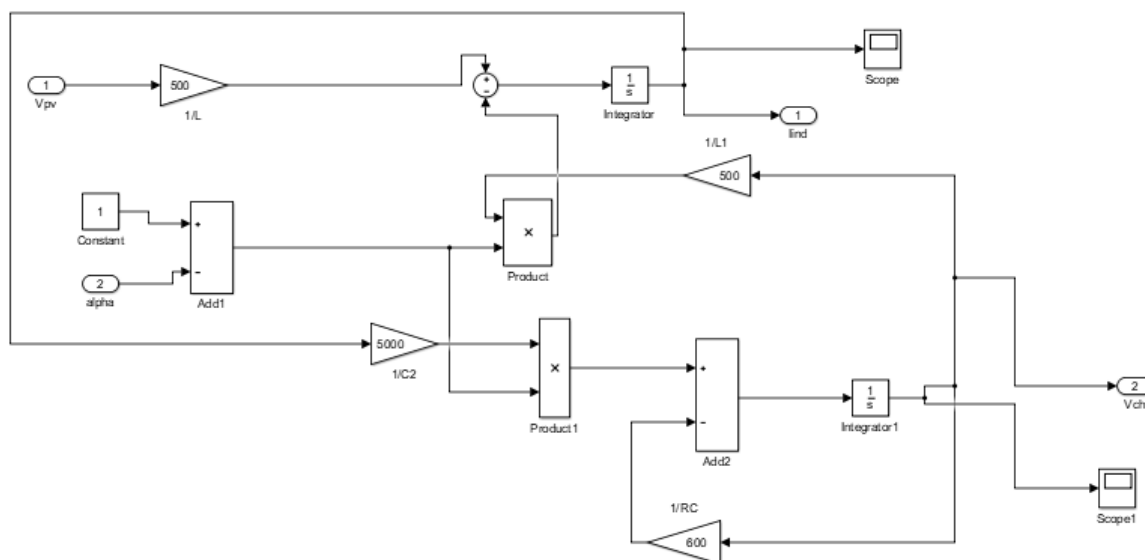
$$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha} \dots (II.18)$$

Si nous supposons que le convertisseur est sans pertes, la puissance moyenne fournie par la source est équivalente à la puissance moyenne disponible en sortie :

$$P_s = V_e I_e = P_{ch} = V_s I_s \dots (II.19)$$

Le courant de sortie  $I_s$  et le courant à l'entrée  $I_e$  sont liés par l'équation :

$$I_s = (1 - \alpha)I_e \dots (II.20)$$



**Figure II. 11** Schéma bloc d'un convertisseur Boost.

### II.3 Poursuit de Point de Puissance Maximale

La commande MPPT a pour objectif de rechercher et d'optimiser le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, afin de produire en continu la capacité maximale. Peu importent les circonstances entourant le générateur, telles que les conditions climatiques (chaleur et rayonnement) ou les capacités de charge résistive, le système maintient sa puissance de fonctionnement maximale. Son principe de régulation repose sur l'ajustement automatique du rapport cyclique  $\alpha$  à une valeur appropriée, permettant d'augmenter en permanence la puissance maximale en sortie du panneau PV.

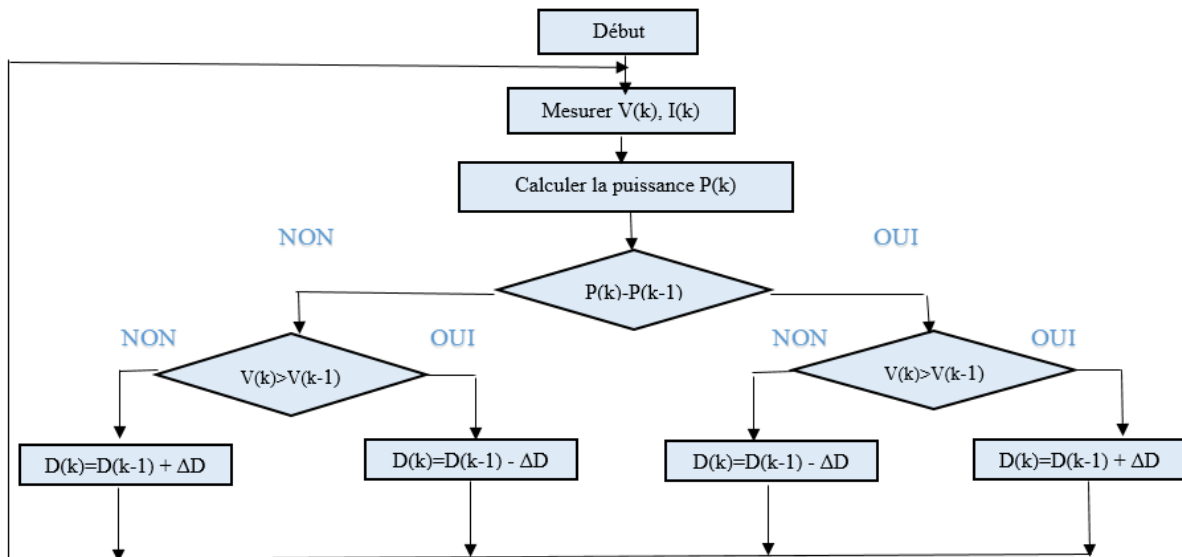
La technologie MPPT permet de suivre le point de capacité maximum, et elle constitue une partie essentielle des systèmes photovoltaïques. Ces technologies se distinguent les unes des autres par leur efficacité, leur domaine d'application et les améliorations qu'elles apportent aux résultats. [7]

#### II.3.1 Méthode de perturbation et observation (P&O)

La méthode de perturbation et d'observation est largement préférée en raison de sa simplicité et de sa facilité d'exécution. Elle implique de perturber la tension des panneaux solaires ( $V_{pv}$ ) en augmentant ou en diminuant celle-ci avec une constante ( $C$ ), puis de comparer la puissance maximale résultante avec celle obtenue avant la perturbation. Plus précisément, si

## Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT

la puissance aux bornes des panneaux augmente suite à la perturbation, la prochaine perturbation est effectuée dans la même direction. En revanche, si la puissance diminue, la prochaine perturbation est réalisée dans le sens opposé [1].



**Figure II. 12** Organigramme de l'algorithme de P&O.

L'inconvénient de cette méthode se manifeste lorsqu'il y a un changement dans les conditions atmosphériques, telles que l'irradiation solaire. Dans tels cas, la puissance mesurée au point de recherche sera perturbée par les variations de l'ensoleillement plutôt que par les perturbations de l'algorithme lui-même. L'algorithme réagit alors en considérant cette augmentation comme étant due à la perturbation précédente, ce qui le pousse à continuer dans la même direction, ce qui est une erreur. Par conséquent, le point de fonctionnement s'éloigne du point de puissance maximale (MPP) et continuera à s'en éloigner si l'éclairement augmente ou diminue progressivement. [3]

### II.3.2 Méthode par incrémentation de conductance

La méthode d'incrément de la conductance a été proposée pour éviter les inconvénients de la méthode P&O de recherche du MPPT.

Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous : [9]

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \dots \text{(II.21)}$$

## Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT

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

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \dots \text{ (II.22)}$$

Si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ , le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

Si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ , le point de fonctionnement est sur le PPM.

Si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ , le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (II.22) et la dérivée de la puissance  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$  peut-être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} * V_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} * \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \cong I_{pv} + V_{pv} \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \dots \text{ (II.23)}$$

D'où on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance comme celles données par (II.22) sur la dérivée de puissance :

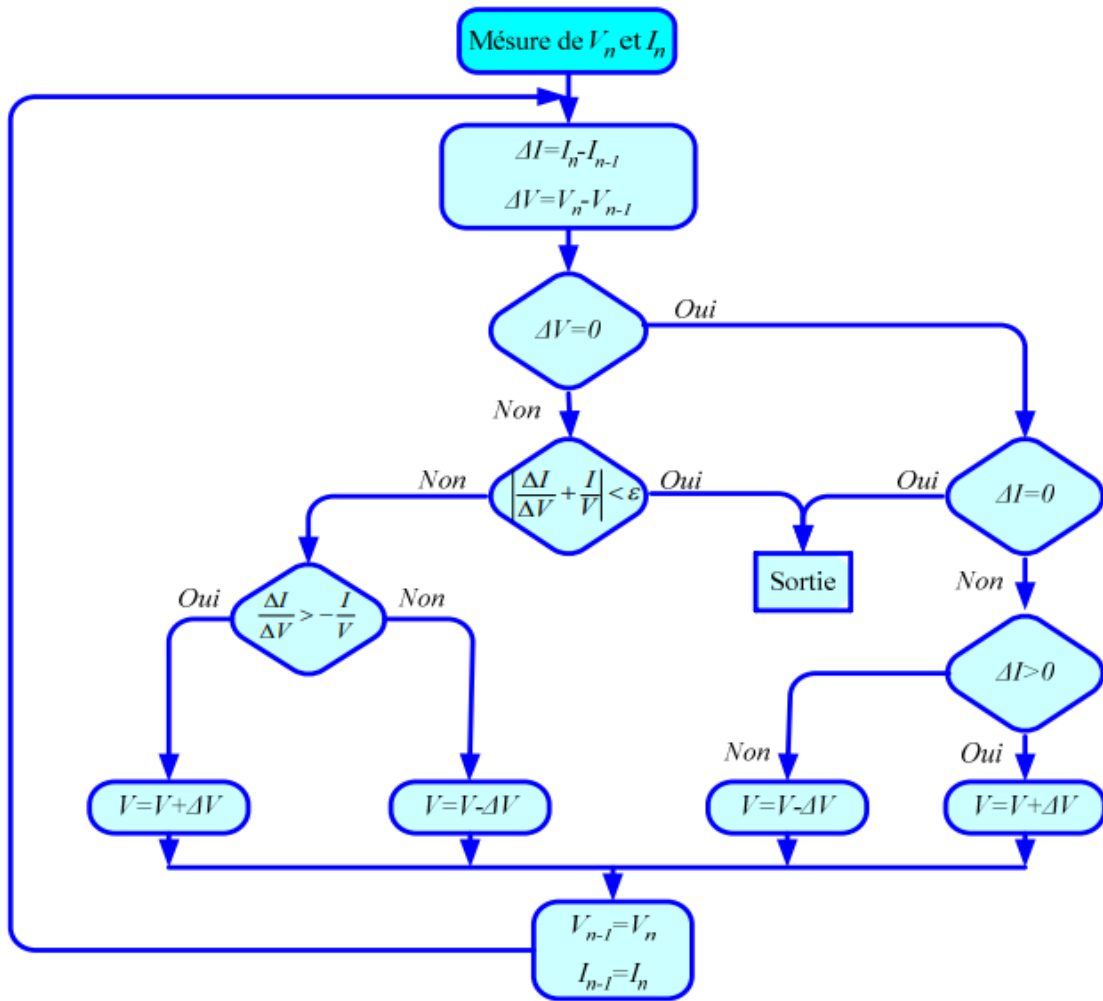
Si  $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}$  le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

Si  $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}$  le point de fonctionnement est sur PPM.

Si  $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}$  le point de fonctionnement est sur PPM.

Le point de puissance maximale peut être déterminé en comparant en permanence la conductance ( $I_{pv} / V_{pv}$ ) avec l'incrément de conductance ( $\Delta I_{PV} / \Delta V_{PV}$ ), comme illustré dans l'algorithme présenté dans la figure II.15. La tension de référence du GPV, notée  $V_r$ , est utilisée. Lorsque nous atteignons le point de puissance maximale, la tension  $V_r$  correspond à la tension optimale  $V_{OPT}$ . Une fois que le point de puissance maximale est atteint, le fonctionnement peut être maintenu à cette position jusqu'à ce qu'une variation de  $\Delta I_{PV}$  soit détectée. Cela indique un changement dans les conditions climatiques, ce qui signifie qu'un nouveau point de puissance maximale doit être recherché. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de  $V_r$  jusqu'à atteindre le point de puissance maximale [2].





**Figure II. 13** Algorithme d’une commande MPPT basé sur la méthode incrément de conductance [12].

### II.3.3 Technique de la logique floue

Depuis l’introduction du concept de sous-ensembles flous par Zadeh en 1965, la logique floue a suscité un grand intérêt. En 1974, Mamdani a introduit la commande floue pour la régulation des processus industriels, ce qui a contribué à son développement. Dans les années 80, la commande floue a connu une expansion majeure au Japon, notamment grâce aux travaux de Sugeno. La logique floue joue un rôle essentiel en établissant un lien entre la modélisation numérique et symbolique, ce qui a permis des avancées industrielles remarquables grâce à des algorithmes simples permettant de traduire les connaissances symboliques en entités numériques et vice versa. L’un des avantages clés de la logique floue est son utilisation de règles linguistiques simples, ce qui facilite la traduction des connaissances expertes pour résoudre des problématiques spécifiques [7].

## Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT

Les méthodes de poursuite du PPM, abordées jusqu'à présent, présentent un inconvénient majeur, la perturbation du rapport cyclique par un petit pas réduira les oscillations, mais augment le temps de réponse du système. L'utilisation de la théorie de la logique floue dispose d'un dispositif de poursuite du PPM rapide et qui réduit ces oscillations, de plus simple à concevoir car elle n'exige pas la connaissance du modèle mathématique du système [5].

Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois blocs : la fuzzification, l'inférence et la Déffuzzification comme le montre sur la figure suivante :

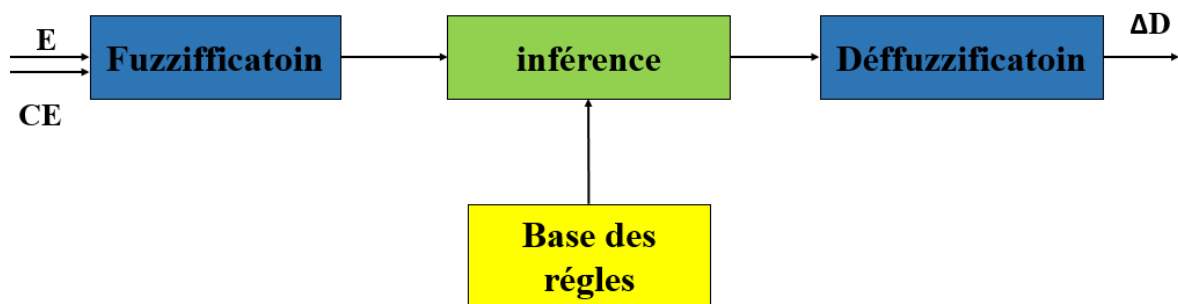


Figure II. 14 Structure générale d'un contrôleur flou.

### II.3.3.1 Fuzzification

Dans l'étape fuzzification le calcul des variables numériques réels à partir de l'entrée est converti en variables de langage floues basées sur un sous-ensemble appelé fonction d'appartenance.

La fuzzification d'une variable numérique se déroule généralement en trois étapes :

- Une étape préliminaire consiste à définir la plage de variations possibles des entrées (univers de discours).
- Partitionner en classes floues l'univers de discours.
- Définir les fonctions d'appartenances des classes floues précédentes.

Dans notre cas, nous disposons de deux entrées. La première est l'erreur E, qui représente la variation de puissance par rapport à la tension (la pente de la caractéristique P-V). La deuxième entrée définit la variation de l'erreur CE, qui fournit une information sur la direction

## Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT

de la pente. La sortie du régulateur flou est la variation du rapport cyclique  $\Delta D$  du convertisseur statique DC/DC.

Les entrées E et CE sont exprimées comme suit :

$$E(t) = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P(t)-P(t-1)}{V(t)-V(t-1)} \dots \text{ (II.24)}$$

$$CE(t) = E(t) - E(t - 1) \dots \text{ (II.25)}$$

**Avec :**

$(t)$ : Puissance actuelle [W] ;

$(t - 1)$  : Puissance précédente [W] ;

$\Delta P$  : Variation de la puissance [W] ;

$V(t)$ : Tension actuelle [V] ;

$V(t - 1)$ : Tension précédente [V] ;

$\Delta V$  : Variation de la tension [V] ;

$(t)$  : L'erreur à l'instant actuel ;

$E(t - 1)$  : L'erreur à l'instant précédent ;

$CE(t)$  : La variation de l'erreur ;

A chaque variable, on associé un univers de discours, entre -8 et 8 pour E, CE est de -1 à 1 pour la variable de sortie D.

En partitionne chaque univers de discours en trois sous-ensembles flous :

La variable d'entrée E : est défini par les termes linguistiques : Négative (N), Zéro (Z) et Positive (P).  $E \in \{N;Z;P\}$

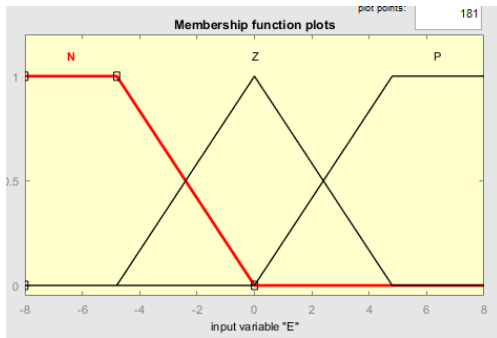
La variable d'entrée CE : est défini par les termes linguistiques : Décroître (D), Stable (S),

Croître (C).  $CE \in \{D;S; C\}$

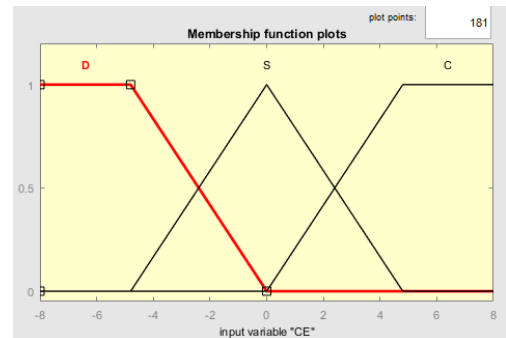
La variable de sortie D : est définie par les termes linguistiques: Diminué (-), Inchangé (0),

Augmenté (+).  $D \in \{-;0; +\}$

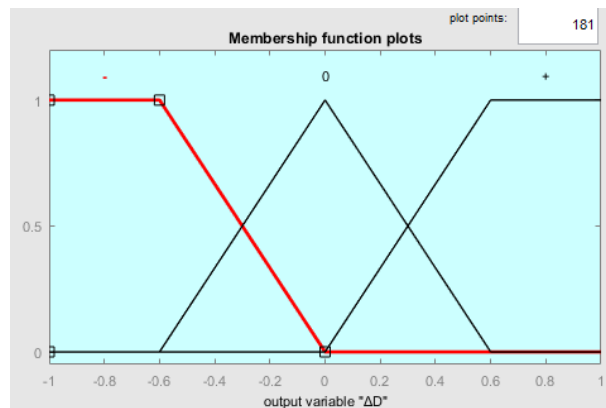
Pour définir les fonctions d'appartenances afin de simplifier notre exemple nous avons pris des fonctions d'appartenances triangulaires et trapézoïdales qui sont schématisé sur les figures II.16, II.17 et II.18 :



**Figure II. 16** Fonctions d'appartenances de la variable d'entrée E.



**Figure II. 15** Fonctions d'appartenances de la de la variable d'entrée CE.



**Figure II. 18** Fonctions d'appartenances de la variable de sortie  $\Delta D$ .

### II.3.3.2 Inférence

L'inférence est une étape où l'on établit une relation logique entre les entrées et la sortie. Des règles d'appartenance sont définies pour la sortie, de la même manière que pour les entrées. Dans ce cas, l'inférence floue est réalisée en utilisant la méthode de Mamdani, qui repose sur des règles de type IF... AND... THEN. On a défini 9 règles linguistiques comme suit :

1. Si (E est N) et (CE est D) donc ( $\Delta D$  est '+')

## Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT

2. Si (E est N) et (CE est S) donc ( $\Delta D$  est '+')
3. Si (E est N) et (CE est C) donc ( $\Delta D$  est '0')
4. Si (E est Z) et (CE est D) donc ( $\Delta D$  est '+')
5. Si (E est Z) et (CE est S) donc ( $\Delta D$  est '0')
6. Si (E est Z) et (CE est C) donc ( $\Delta D$  est '-')
7. Si (E est P) et (CE est D) donc ( $\Delta D$  est '0')
8. Si (E est P) et (CE est S) donc ( $\Delta D$  est '-')
9. Si (E est P) et (CE est C) donc ( $\Delta D$  est '-')

Ces dernières peuvent s'écrire sous forme d'une matrice appelée "table d'inférence"

**Tableau II. 1** Table d'inférence.

$\Delta D$		CE		
		D	S	C
E	N	+	+	0
	Z	+	0	-
	P	0	-	-

### II.3.3.3 Déffuzzification

Cette étape est l'opération inverse de la fuzzification. Cette étape vise à convertir les résultats flous obtenus lors de l'étape précédente (inférence) en une valeur numérique précise. Cette valeur sera interprétable par l'utilisateur, et dans notre cas, elle sera représentée par  $\Delta D$ .

Il existe trois méthodes :

- Moyenne des maximums.
- Méthode de centre de gravité.
- La méthode des hauteurs pondérée.

La méthode que nous avons utilisée est l'opérateur « de centre de gravité » il est donné par l'équation suivante :

$$\Delta D = \frac{\int \mu(D_i) D_i}{\int \mu(D_i)} = \frac{\sum_i \mu(D_i) \cdot D_i}{\sum_i \mu(D_i)} \dots (\text{II.26})$$

### II.3.3.4 Avantages et inconvénients de la logique floue

#### a) **Avantage de la logique floue**

- L'absence de nécessité de modéliser le système à régler.
- La possibilité et la facilité d'incorporer les connaissances de l'opérateur de processus (en intégrant l'expertise humaine sous forme de règles simples).
- Une solution efficace pour résoudre des problèmes complexes (fortement non linéaires et difficiles à modéliser).
- Une robustesse face aux incertitudes de modélisation [7].

#### b) **Inconvénients de la logique floue**

Bien que cette technique présente de nombreux avantages, il convient de noter qu'elle nécessite une conception spéciale qui exige une plateforme d'exécution performante, coûteuse et non familière avec tous les sujets spécifiques, tels que la recherche du PPM (Point de Puissance Maximale) dans le cas d'un ombrage partiel (où le point de fonctionnement converge vers un optimum local). De plus, plusieurs études ont démontré que la combinaison d'autres techniques avec FLC peut permettre de suivre le PPM globale [5].

### II.3.4 Optimisation par Essaim de Particules (PSO)

L'optimisation par essaim de particules est une méthode qui a été développée aux États-Unis en 1995 sous le nom de ParticleSwarmOptimization (PSO). À l'origine, ses inventeurs, Russel Eberhart et James Kennedy, cherchaient à modéliser les interactions sociales entre des "agents" qui devaient atteindre un objectif commun dans un espace de recherche. Chaque agent possédait une capacité limitée de mémorisation et de traitement de l'information. La règle fondamentale était qu'il n'y avait pas de chef d'orchestre, ni de connaissance globale parmi les agents, seulement des connaissances locales. Ainsi, un modèle simple a été développé pour répondre à ces principes [10].

#### II.3.4.1 Principe de la technique PSO

Chaque agent ou particule est caractérisée par :

- Une position et une vitesse.

## Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT

---

- Le coût de la fonction objective pour sa position acquise en cours ou précédemment (pbest).

- La connaissance de ses voisins dont elle fait partie.

- La meilleure position précédemment du groupe jusqu'à lors (gbest).

Dans l'algorithme, la population est initialisée aléatoirement. A chaque itération la particule fait un compromis entre trois choix possibles:

- Suivre sa propre voie.

- Retourner vers sa meilleure position obtenue.

- Se diriger vers la meilleure position obtenue dans son voisinage.

Lorsque l'algorithme démarre, un essaim de particules est réparti de manière aléatoire dans l'espace de recherche, chaque particule ayant une vitesse également aléatoire. À chaque étape de l'algorithme, les actions suivantes sont effectuées :

Chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position actuelle et de conserver en mémoire sa meilleure performance jusqu'à présent, c'est-à-dire la meilleure position qu'elle a atteinte (qui peut parfois correspondre à sa position actuelle), ainsi que la qualité associée à cette position (la valeur de la fonction à optimiser à cet endroit).

- Chaque particule est capable d'interroger un certain nombre de ses congénères de son voisinage et d'obtenir de chacune entre elles sa propre meilleure performance.

- A chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance, modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

A partir des quelques informations dont elle dispose, une particule doit décider de son prochain mouvement, c'est-à-dire décider de sa nouvelle vitesse. Pour ce faire, elle combine trois informations:

- Sa vitesse actuelle. (Dans le cas de MPPT la vitesse est le delta D (v))

- Sa meilleure position actuelle. (Le meilleur rapport cyclique personnel de chaque particule  $P_{best}$ )

## Chapitre II. Modélisation du système photovoltaïque et méthodes MPPT

---

- La meilleure performance (vitesse et position) de ses voisines. (le meilleur rapport cyclique de l'ensemble de particule le Gbest)

Le hasard joue un rôle important grâce à des modifications aléatoires limitées des coefficients de confiance, ce qui favorise l'exploration de l'espace de recherche. Ces concepts sont formalisés dans des équations de mouvement pour permettre leur programmation. Une particularité intéressante est que, contrairement à de nombreuses autres heuristiques qui restent principalement basées sur des expérimentations, l'algorithme de la PSO bénéficie d'une analyse mathématique précise qui définit les conditions de convergence et le choix des paramètres [11]

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu la modélisation d'un système photovoltaïque avec convertisseur statique DC/DC. Ensuite nous avons présenté les techniques qu'on a utilisées pour la poursuite de point de puissance maximale, nous avons commencé par les méthodes les plus classique et simples P&O et INC. Après on a étudié la méthode qui est basé sur l'intelligence artificielle (logique floue) FLC. Par la suite on a passé à la technique PSO utilisée en cas d'ombrage partiel. Pour l'interprétation des résultats on les a faites dans le prochain chapitre.



**Chapitre II. Résultats de simulation et  
Discussions**

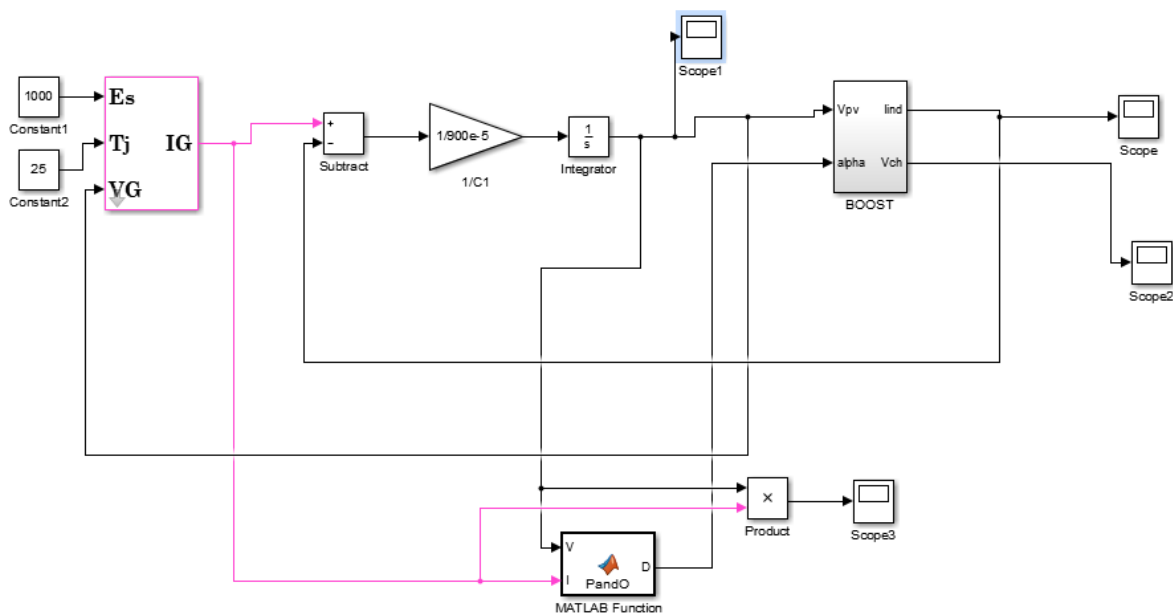
### Introduction

La simulation est très utile dans notre étude pour l'évolution des performances théoriques de notre système. En effet, cette étape nous permet de réaliser des simulations d'un panneau photovoltaïque suivi d'un convertisseur DC/DC (Boost), ainsi que de tester les commandes de différentes techniques MPPT que l'on a étudiées dans le cas uniforme et sous ombrage partiel. De plus, cela nous permet de modifier facilement les paramètres du système tels que les conditions météorologiques, et d'observer l'impact de la commande sur le panneau photovoltaïque.

### 3.1 Simulation des parties de système photovoltaïque

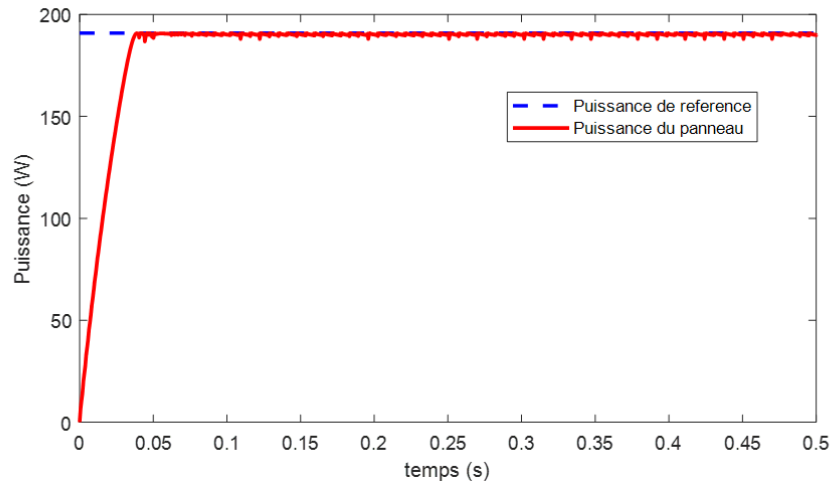
#### 3.1.1 Simulation de la technique P&O

L'objectif de cette simulation consiste à évaluer les performances du système de conversion d'énergie solaire photovoltaïque qui est contrôlé à l'aide de la méthode de poursuite de puissance maximale appelée Perturb and Observe (P&O).

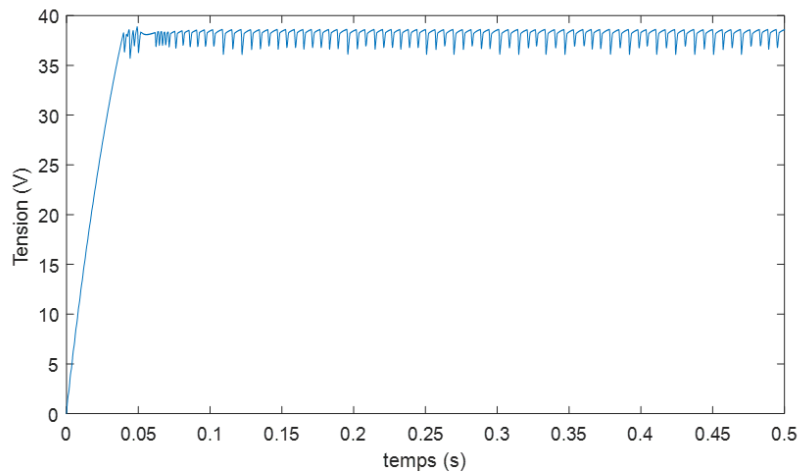


**Figure III. 1** Technique P&O sous Matlab/Simulink.

Les simulations ont été faites sous les conditions standard (STC) ( $G=1000\text{w/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ), avec un pas de 0.01 les figures suivantes représentent les résultats de simulation (la puissance désirée du panneau sous les STC est de 190.89W).



**Figure III. 2** Puissance du panneau avec la méthode P&O.

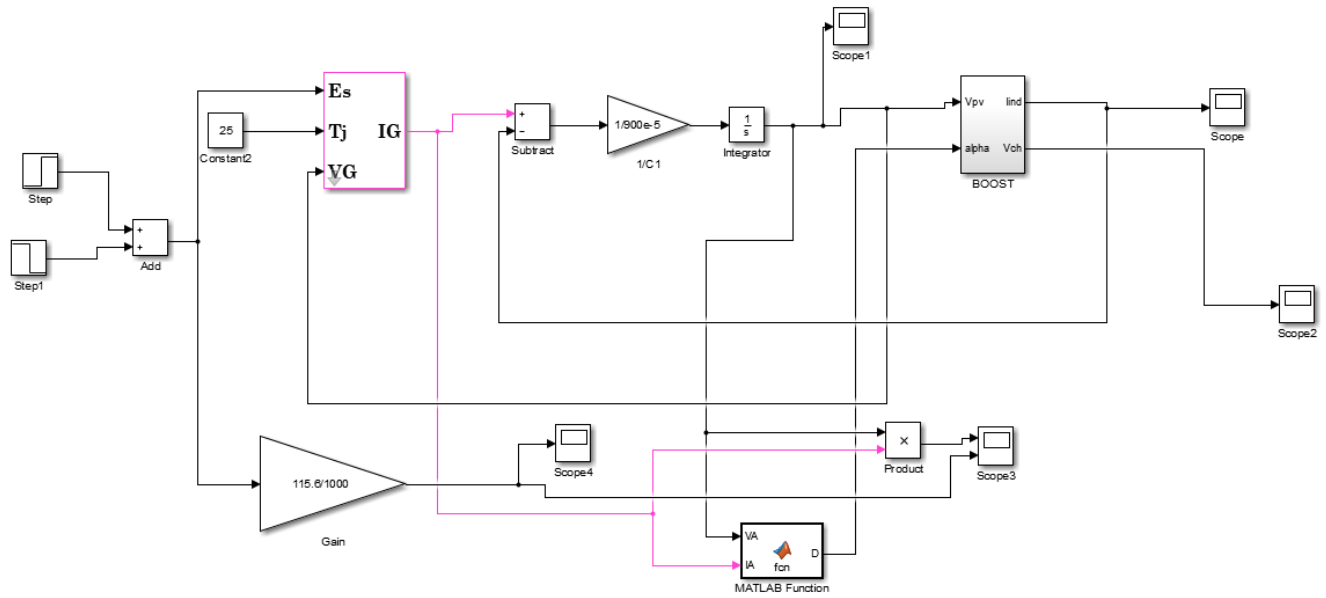


**Figure III. 3** Tension de panneau avec la méthode P&O.

D'après l'observation des Figures (III.2 et III.3), on peut constater que la technique de commande P&O présente des oscillations autour du point de puissance maximale (PPM).

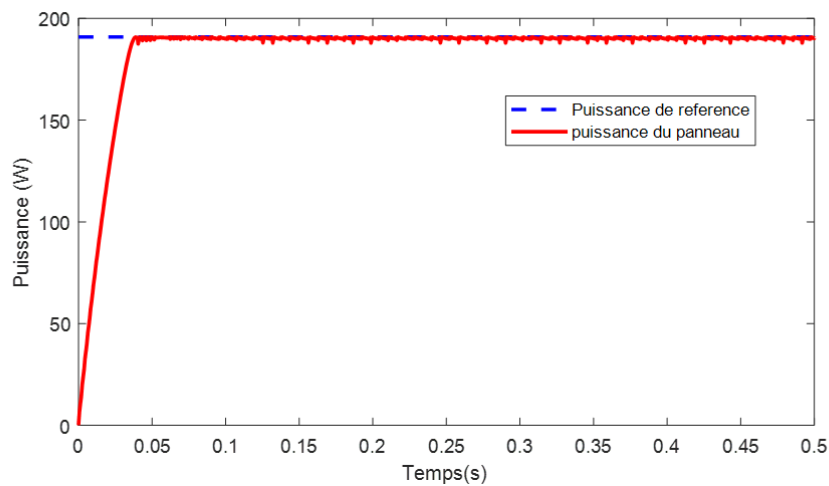
### 3.1.2 Simulation avec la technique INC

L'objectif de cette simulation est d'évaluer les performances du système photovoltaïque contrôlé par la technique de conversion d'intensité constante (INC).



**Figure III. 4** Technique INC sous Matlab/Simulink.

La figure ci-dessous représente les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté avec une commande MPPT de type "Incrémentation de conductance" avec un pas de 0.01, dans des conditions atmosphériques standards (éclairage de 1000 W/m<sup>2</sup> et température de 25°C).



**Figure III. 5** Puissance de panneau avec la méthode INC.

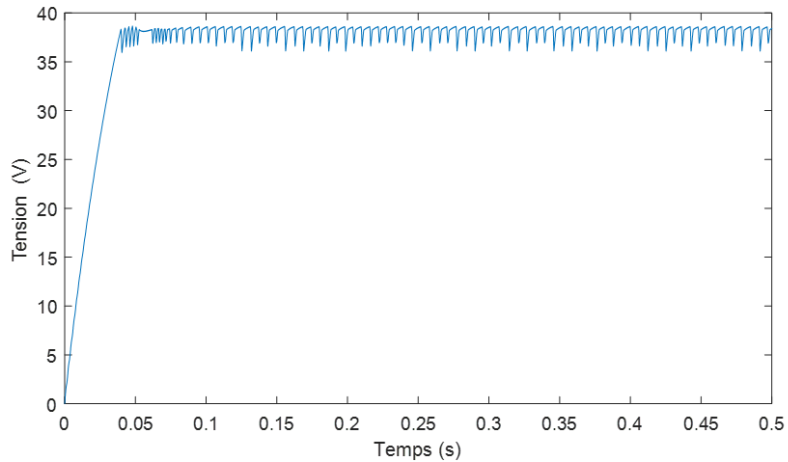


Figure III. 6 Tension du panneau avec la méthode INC.

Les résultats obtenus lors de cette simulation avec la méthode P&O sont très similaires à ceux obtenus précédemment, mais la commande de la méthode INC comportent mieux. Ces résultats démontrent l'efficacité de la commande en termes de suivi du point de puissance maximale.

Cette technique permet de résoudre l'inconvénient lié aux changements soudains d'ensoleillement observé dans la méthode PO, mais elle présente des oscillations autour de la valeur optimale(PPM).

### 3.1.3 Simulation avec la technique FLC

L'objectif de cette simulation consiste à évaluer les performances du système photovoltaïque contrôlé par la technique de commande FLC (FuzzyLogic Control) afin d'en extraire ses caractéristiques et ses résultats.

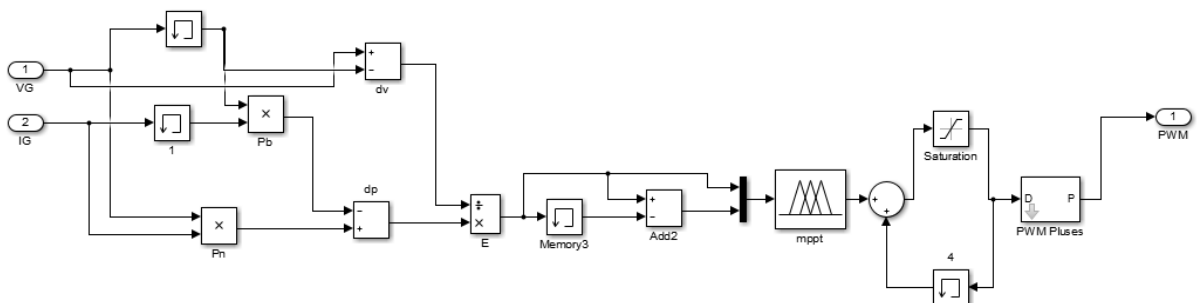
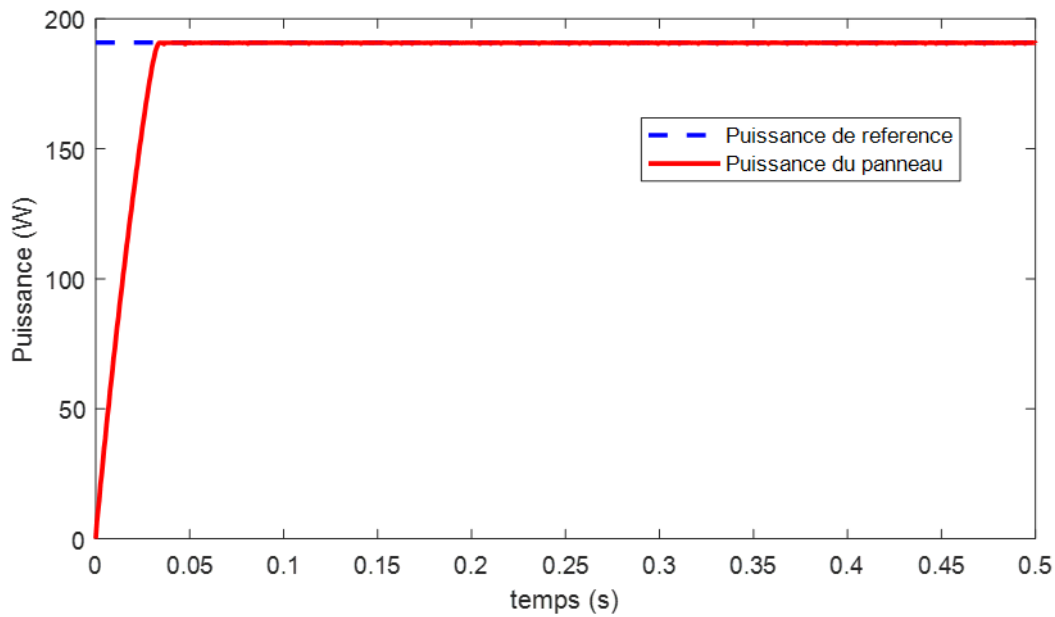


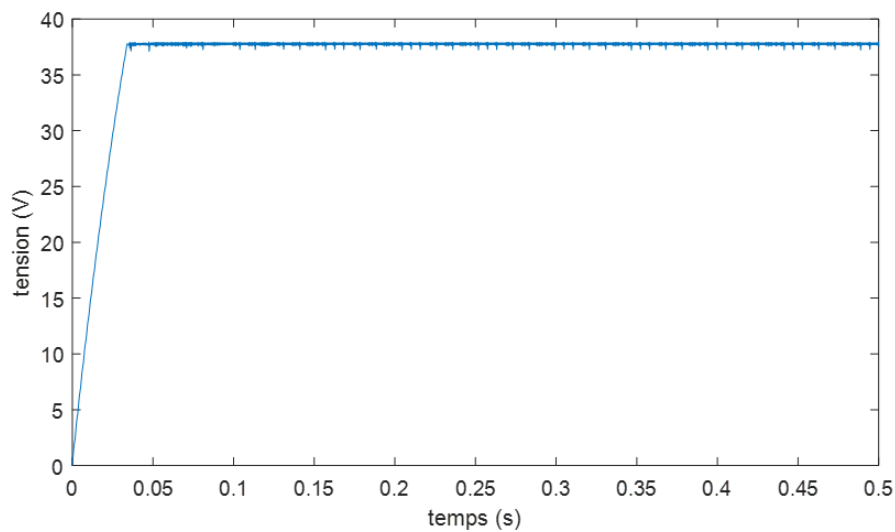
Figure III. 7 Schéma bloc du contrôleur flou sous Matlab/Simulink.

### Chapitre III. Résultats de simulation et Discussions

Les figures suivantes (III.8, III.9)représente la puissance et la tension délivrée du panneau sous STC obtenus pas la l'utilisation de la technique FLC.



**Figure III. 8** Puissance du panneau PV avec la méthode FLC.



**Figure III. 9** Tension du panneau avec la méthode FLC.

Par rapport aux techniques de simulation précédentes (P&O, IC), celle-ci ne dépend pas du choix d'un pas de perturbation initial, mais repose sur un principe complexe qui permet de réduire le temps de réponse et de minimiser les oscillations autour du point de puissance maximale (PPM).

3.1.4 Simulation avec la technique PSO

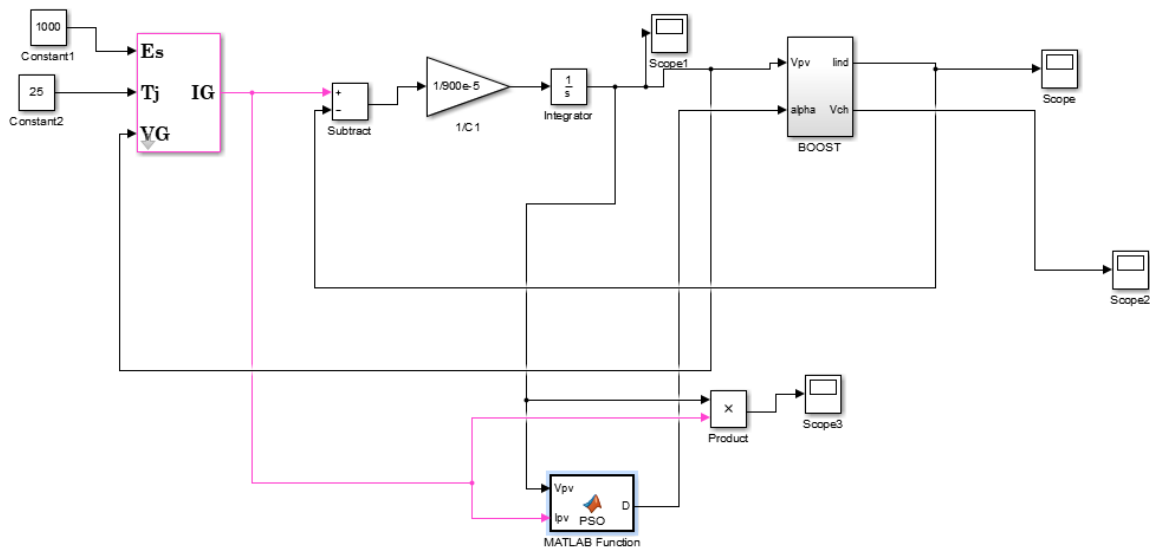


Figure III. 10 Schéma bloc de système PV avec la technique PSO.

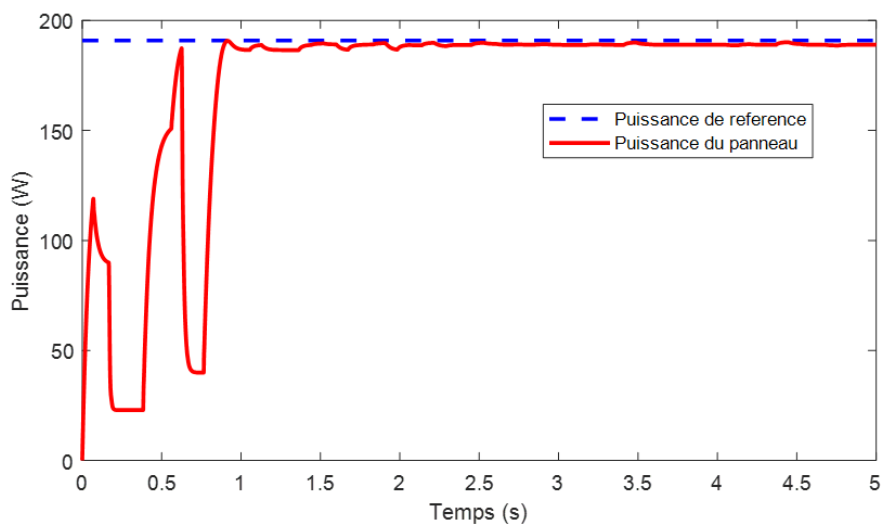
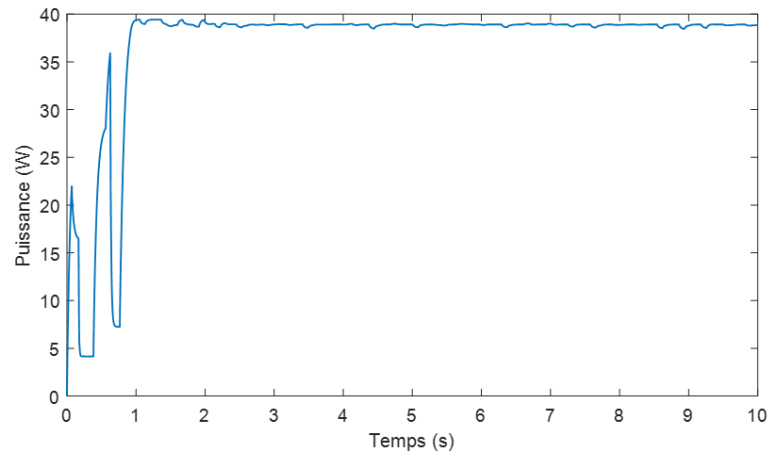


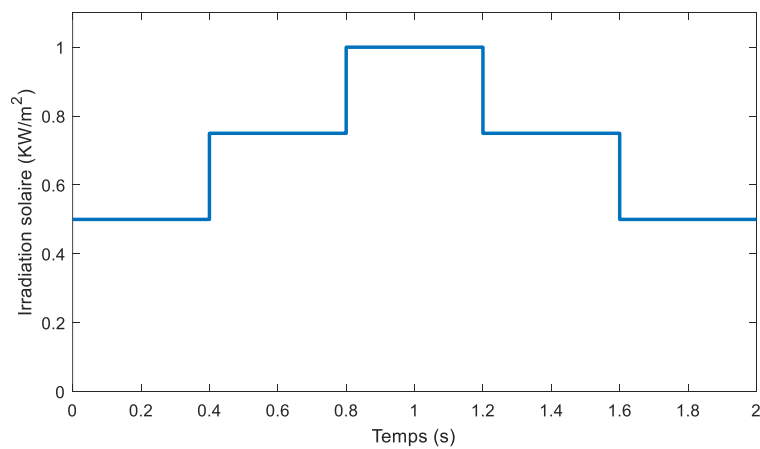
Figure III. 11 Puissance du panneau PV avec la méthode PSO sous STC.



**Figure III. 12** Tension du panneau PV avec la méthode PSO sous STC.

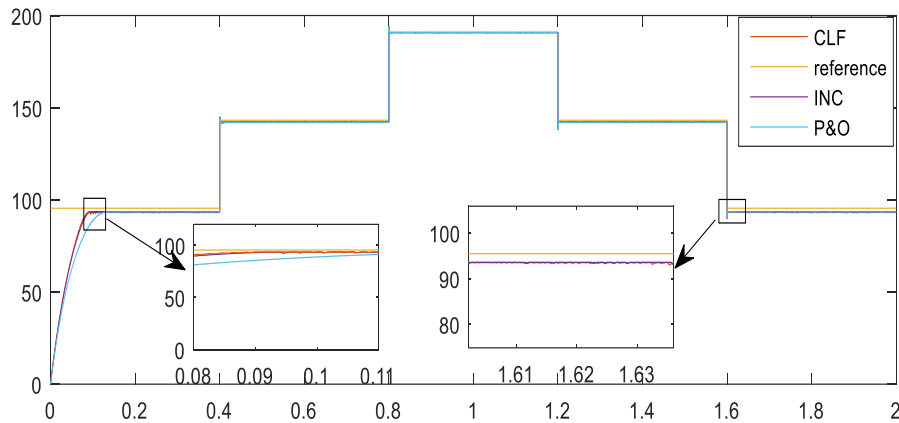
### 3.1.5 Comparaison entre les différentes techniques P&O, INC, FLC et PSO

Afin de voir la robustesse des techniques appliquées on procèdera à soumettre le panneau aux contraintes climatiques en introduisant un profil d'ensoleillement variable puis un cas de l'ombrage partiel.

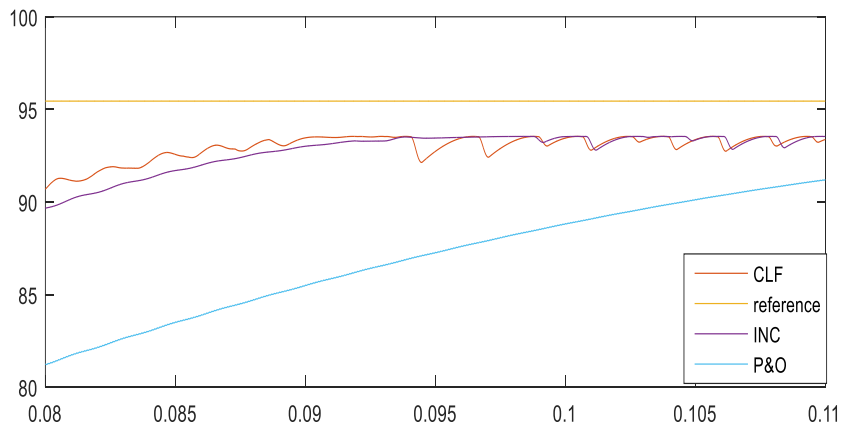


**Figure III. 13** Profil d'ensoleillement utilisé pour la simulation des trois techniques P&O, INC, et FLC.

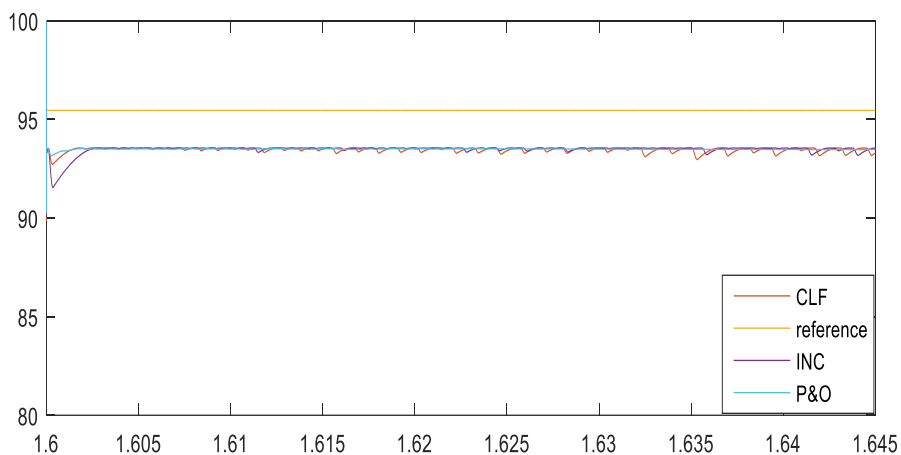




**Figure III. 14** Comparaison des puissances obtenues avec P&O, IC et FLC (ensoleillement variable).



**Figure III. 15** Zoom de la figure III.14 de  $t=0.08$  à  $t=0.11$ .



**Figure III. 16** Zoom de la figure III.14 de  $t=1.6$  à  $t=1.645$ .

Les résultats obtenus en utilisant la technique de contrôleur flou (technique FLC) sont les meilleurs à ceux obtenus avec des algorithmes conventionnels tels que P&O et IC.

### Chapitre III. Résultats de simulation et Discussions

L'algorithme INC offre une amélioration de l'algorithme P&O. L'algorithme basé sur la logique floue se distingue par son efficacité. Il parvient à fonctionner au point optimal avec moins d'oscillations et avec vitesse de convergence plus rapide. De plus, il présente un bon comportement en termes de transitions d'état. Cependant, l'implémentation de ce type d'algorithme est plus complexe que celle des algorithmes classiques.

Par contre la technique PSO son temps de réponse est très long dans ce cas par rapport aux autres techniques, elle n'est pas efficace dans ce cas

**Tableau III. 1** tableau comparatif des techniques MPPT d'un système PV en cas de changement d'ensoleillement.

Niveau d'ensoleillement	Techniques MPPT	Max de puissance atteint	Temps de réponse	complexité
1 <sup>er</sup> niveau G=500W/m <sup>2</sup>	P&O	93.425W	0.13s	Faible
	INC	93.53W	0.094s	Faible
	FLC	93.54W	0.091s	Elevé
2 <sup>ème</sup> niveau G=750W/m <sup>2</sup>	P&O	142.08W	0.403s	Faible
	INC	142.141W	0.4012s	Faible
	FLC	142.142W	0.4007s	Elevé
3 <sup>ème</sup> niveau G=1000W/m <sup>2</sup>	P&O	190.76W	0.12s	Faible
	INC	190.8055W	0.09s	Faible
	FLC	190.8054W	0.08s	Elevé

### 3.2 Simulation du système PV sous ombrage partiel

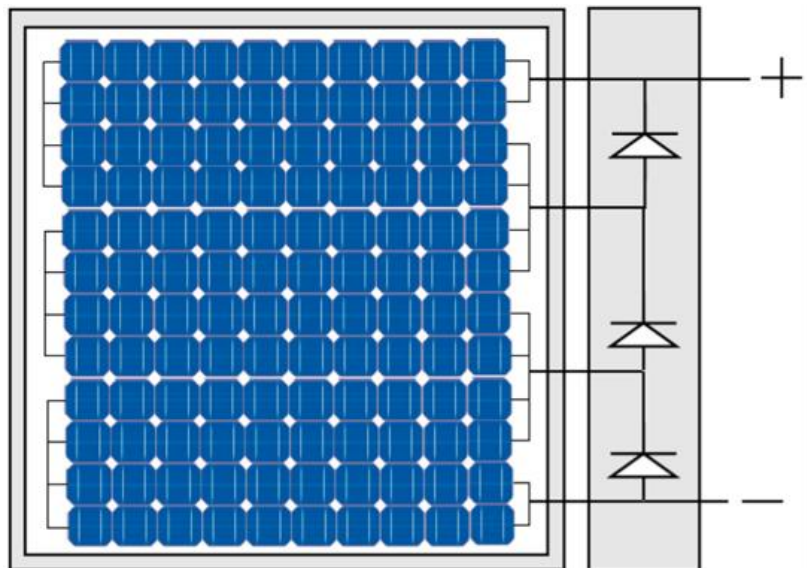
Sous les conditions d'ensoleillement sous ombrage partiel, il est connu que les techniques de poursuite de point de puissance maximal utilisé dans les systèmes photovoltaïque ne parviennent pas à différencier le point de puissance global parmi plusieurs maximums. Les méthodes couramment utilisés tels que "perturbe and observe" et "incrémental conductance" se révèlent inefficaces pour trouver le maximum global dans les conditions non uniforme. Pour

### Chapitre III. Résultats de simulation et Discussions

résoudre ce problème, nous envisageons dans cette section à utiliser la technique d'optimisation qui est la technique PSO (ParticleSwarmOptimization) et FLC [3].

Sous des conditions standards, nous avons utilisé un panneau de 72 cellules qui délivre une puissance de 190.89 (W) ayant les caractéristiques citées dans le tableau(I.1).

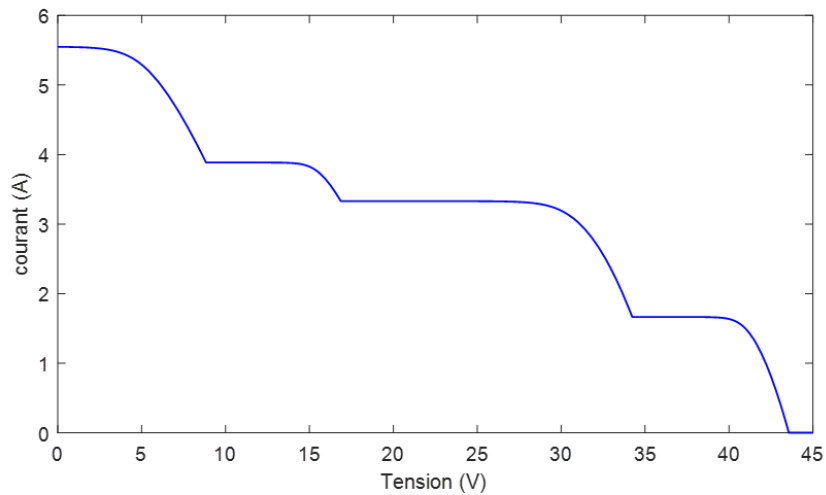
Pour assurer le fonctionnement de ce panneau sous un ombrage partiel, nous avons soumis chaque quart (1/4) de panneau à des ensoleillements différents. On a aussi utilisé des diodes by-pass connecté en parallèle sur chaque connexion séries des cellules PV, qui permet de résoudre le problème d'ombrage partiel.



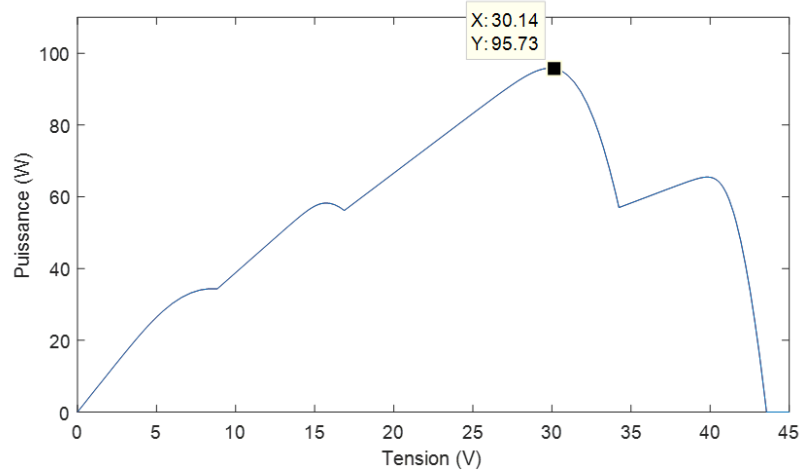
**Figure III. 17** Connexion des diodes by-pass sur les cellules PV.

Pour le premier profile nous avons effectué une simulation pour les quatre sous panneau de différents nombre de cellules séries (24, 12, 24, 12) soumis à différents ensoleillement ( $1000\text{w/m}^2$ ,  $700\text{w/m}^2$ ,  $600\text{w/m}^2$  et  $300\text{w/m}^2$  respectivement) pour une température fixe  $T=25^\circ\text{C}$ .

Nous avons pu observer les diverses caractéristiques des sous-panneaux utilisés en visualisant les courbes de  $P(V)$  et  $I(V)$ .



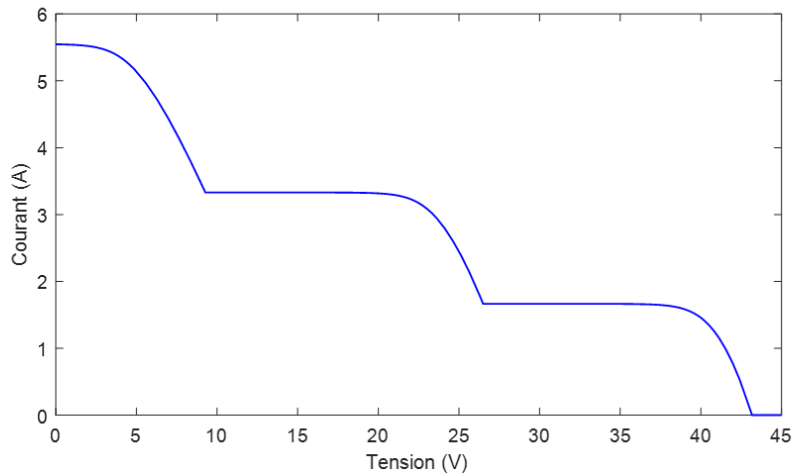
**Figure III. 18** Caractéristique I-V du panneau en présence de l'ombrage partiel (1<sup>er</sup> profil).



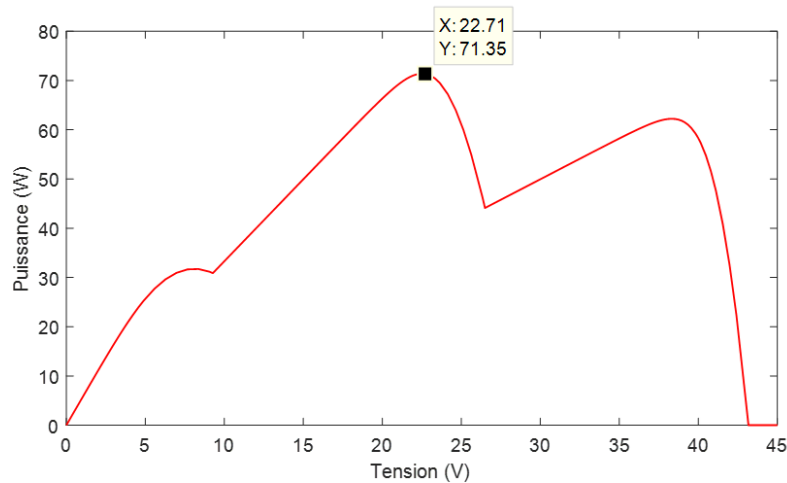
**Figure III. 19** Caractéristique V\_P du panneau en présence de l'ombrage partiel (1<sup>er</sup> profile).

D'après la **figure III.19**, on remarque qu'il existe trois optimums locaux et un maximum global.

Pour le deuxième profil nous avons soumis chaque tiers (1/3) de panneau à des ensoleillements différents ( $1000\text{w/m}^2$ ,  $600\text{w/m}^2$ ,  $300\text{w/m}^2$  respectivement) pour une température fixe  $T=25^\circ\text{C}$ . Les résultats obtenus lors de la simulation sur les figures (III.20 et III.21) :



**Figure III. 20** Caractéristique V-I du panneau en présence de l'ombrage partiel (2<sup>ème</sup> profil).

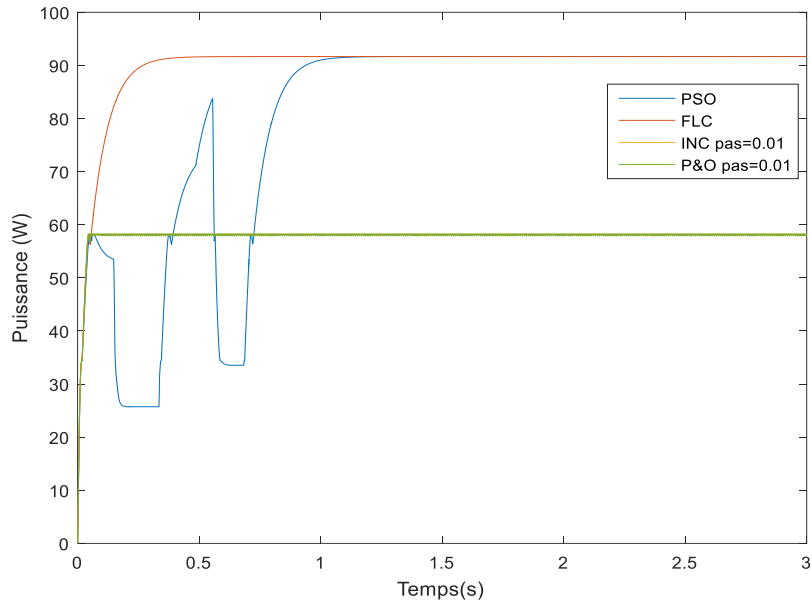


**Figure III. 21** Caractéristique V-P du panneau en présence de l'ombrage partiel (2<sup>ème</sup> profil).

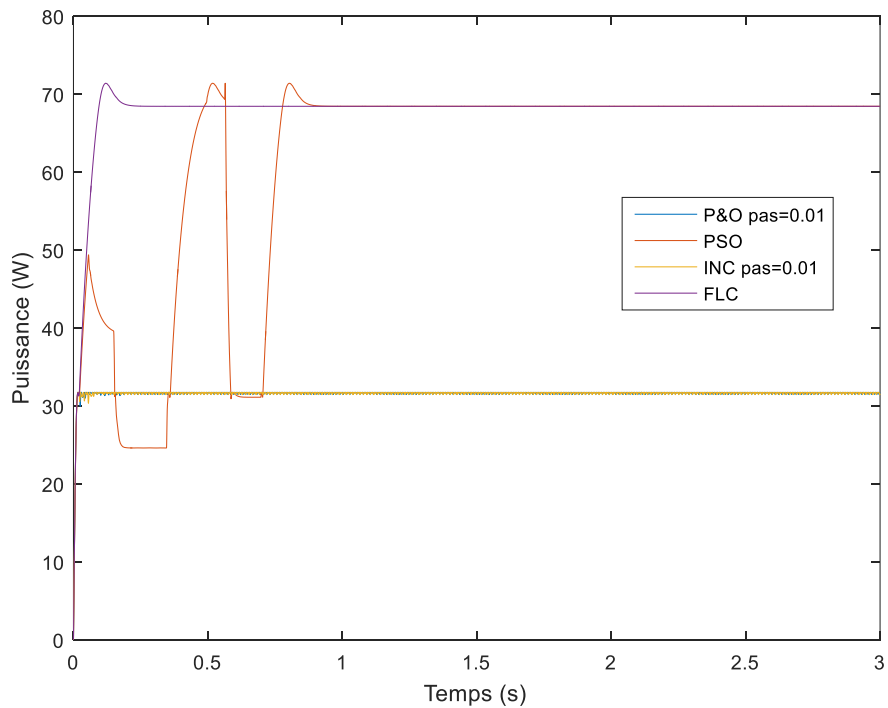
D'après les résultats obtenus on remarque que le meilleur point optimum obtenu est au premier profil, on peut dire que le nombre des sous panneau influence sur le point optimum, de plus le nombre augmente on aura le meilleurs PPM.

### 3.2.1 Simulation et comparaison des différentes techniques sous l'ombrage partiel

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation de la caractéristique P-V de différentes techniques P&O, INC, FLC et PSO au 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> profil sous ombrage partiel:



**Figure III. 22** Caractéristique V\_P du panneau en présence de l'ombrage partiel (1<sup>er</sup> profile) pour les différentes techniques.



**Figure III. 23** Caractéristique V\_P du panneau en présence de l'ombrage partiel (2<sup>ème</sup> profile) pour les différentes techniques.

### Chapitre III. Résultats de simulation et Discussions

**Tableau III. 2** Comparaisons des différentes techniques sous ombrage partiel.

Techniques	Max de Puissance atteint		Temps de réponse	
	1 <sup>er</sup> profil	2 <sup>ème</sup> profil	1 <sup>er</sup> profil	2 <sup>ème</sup> profil
P&O pas=0.01	58.25W	31.75W	0.017s	0.0455s
INC pas=0.01	58.24W	31.74W	0.0165s	0.045s
PSO	91.6W	71.38W	1.1s	0.51s
FLC	91.66W	71.39W	0.3s	0.12s

Selon les résultats obtenus sur les figures III.22, III.23 et le tableau III.2, on remarque que les techniques P&O et INC ne sont pas adéquats en cas d'ombrage partiel, car ils ne convergent pas vers la puissance maximale, par contre les autres technique PSO et FLC convergent vers la puissance maximale.

À partir de cette observation, nous concluons que les techniques P&O et INC n'ont pas été capables de maintenir la poursuite du maximum global dans des conditions d'ombrage partiel. D'autre part, plusieurs études ont démontré que l'utilisation de techniques combinées avec FLC permet de suivre le PPMG (point de puissance maximale global) [5].

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons extrait les résultats de simulation pour les différentes techniques MPPT appliquées sur un panneau PV à l'aide de logiciel Matlab/Simulink. Les tests sont réalisés sous les conditions standards STC.

### **Chapitre III. Résultats de simulation et Discussions**

---

Notre étude comparative a été réalisée entre différentes méthodes MPPT, à savoir P&O, INC et FLC, les résultats obtenus lors de cette simulation montrent que la méthode FLC présente les meilleurs résultats et performances par rapport aux autres méthodes.

En cas d'ombrage partiel, les résultats obtenus montrent que les deux techniques P&O et INC ne peuvent pas suivre le point de puissance globale. Pour cela, nous avons proposé la méthode de PSO avec la méthode FLC, ces deux techniques convergentes vers le point de puissance global PPMG, la méthode FLC présente une meilleure convergence avec un meilleur temps de réponse.



## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire porte sur l'étude et l'application des techniques MPPT intelligentes aux systèmes photovoltaïques, dans le but d'atteindre et de maintenir le point de puissance maximale d'un panneau solaire.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons commencé par la modélisation mathématique des différents composants de système photovoltaïque, telles que le panneau solaire, les cellules et le convertisseur DC/DC Boost. Ensuite on a utilisé ces modèles pour créer un schéma de simulation sous Matlab/Simulink du système globale, ce qui nous a permis aussi de tester les performances du système sous les conditions atmosphériques standard ainsi que dans le cas d'ombrage partiel.

Par la suite, nous nous sommes intéressés à la maximisation de la puissance générée par le panneau photovoltaïque. Afin de réaliser cet objectif nous avons testé et comparé trois méthodes telles que P&O, INC et FLC. Les résultats obtenus démontrent que toutes les méthodes testées, dans des conditions atmosphériques standard, parviennent avec succès à atteindre le point de puissance maximale (MPP). Cependant, nous avons observé que les méthodes P&O et INC présentent des oscillations autour du MPP, tandis que la méthode avec la logique floue offre de meilleures performances en termes de temps de réponse et de stabilité en régime permanent.

Par contre, sous des conditions d'ombrage partiel les méthodes connues (P&O et INC) se révèlent inefficace à différencier le point de puissance maximale, pour cela, nous avons présenté une autre technique d'optimisation appelée Particle Swarm Optimization (PSO) et la technique par la logique flou. Les résultats de simulation démontrent que ces deux techniques convergent vers le point de puissance maximale, dont on a pu constater que la méthode FLC a présenté de meilleures performances.

Comme perspectives, nous envisageons :

- Etudes d'autres algorithmes MPPT en plus des algorithmes étudiés dans cette étude.
- Application et développement d'autres techniques MPPT pour améliorer l'efficacité et la performance des systèmes photovoltaïques.

En résumé, les perspectives pour l'application des techniques MPPT dans les systèmes photovoltaïques sont très prometteuses. Elles permettent d'optimiser la production d'énergie solaire, de s'adapter aux conditions changeantes, de faciliter l'intégration avec le stockage

d'énergie et de réduire les coûts. La recherche continue et les avancées technologiques contribueront à améliorer encore davantage les performances des systèmes photovoltaïques.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

[1] : DJNNADI, R., et BOUKHENTACHE, N. «Modélisation et simulation d'une commande MPPT d'un système photovoltaïque». Mémoire master de l'Université de BEJAIA, 2021.

[2] : MANSOUR, K., et MAGMOUN, L. «Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome». Mémoire master de l'Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU, 2011.

[3] : NASRI, M., et HAMMOUDI, K. «Techniques MPPT pour système photovoltaïque sous des conditions», Mémoire master de l'Université ABD RAHMANE MIRA BEJAIA, 2022.

[4] : ADOUANE, M. « Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique », Mémoire de magister de l'Ecole Nationale Polytechnique, 2008.

[5] : KADI, F., et MOUACI, N. « Etude, Implémentation et Comparaison des techniques MPPT sous ensoleillement uniforme et en cas d'ombrage partiel», Mémoire master de l'Université DE BEJAIA, 2021.

[6] : Dr. BELAID LALOUNI S. Maître de Conférences Classe B. «Cours Energie Solaire Photovoltaïque», UNIVERSITE DE BEJAIA, 2014/2015.

[7] : ZAOUI, A., et LAHBIB, A. «Contrôle MPPT dans les systèmes photovoltaïques pour des techniques intelligent Logique Floue », Mémoire master de l'Université AHMED DRAIA-ADRAR, 2021.

[8] : AYOUDJ, A. «Etudes des différentes commandes MPPT pour générateur photovoltaïque», Mémoire master de l'Université ABDRAHMANE MIRA BEJAIA, 2013.

[9] : CEDRIC CABAL, thèse préparée au laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes CNRS en vue de l'obtention de doctorat «optimisation énergétique d'analyse de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque», université de Toulouse, Décembre 2008.

[10] : BEKAKRA, Y. «Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation», Thèse de Doctorat en sciences de l'Université Mohamed Khider – iskra, 2014.

[11] : TEBBAKH, B. «Etude et Simulation des Algorithmes de Commande MPPT d'un Système Photovoltaïque». Mémoire master de l'Université de LARBI BEN M'HIDI D'OUM EL BOUAGHI, 2016.

[12] : DJERMOUNI, K. « Application des techniques d'intelligence artificielle pour la gestion optimale de l'énergie des sources photovoltaïques ».Thèse doctorat de l'Université ABDRAHMANE MIRA BEJAIA, 2015.

## **Résumé**

Dans ce travail nous avons fait une étude sur le système photovoltaïque et l'application des techniques MPPT intelligentes sur ce système. Le système comprend un générateur photovoltaïque, un étage d'adaptation, une charge résistive et un étage de commande intégré dans la chaîne pour réguler la tension du générateur photovoltaïque et le maintenir autour de son point de puissance maximale (PPM), les méthodes sont « perturbation et observation », « incrémentation de conductance », « contrôleur de logique flou » et « optimisation de swarm particule ».

En cas d'ombrage partiel la poursuite du point de puissance maximale du panneau PV, les méthodes conventionnelles se révèlent inefficace. Afin de résoudre ce type de problème, nous avons utilisé la technique PSO avec FLC qui nous a permis d'extraire la valeur maximale de puissance.

**Mots clé :** PV, MPPT, PPM, PSO, FLC.

## **Abstract:**

In this work, we conducted a study on the photovoltaic system and the application of intelligent MPPT (Maximum Power Point Tracking) techniques on this system. The system includes a photovoltaic generator, an adaptation stage, a resistive load, and a control stage integrated into the chain to regulate the voltage of the photovoltaic generator and keep it around its maximum power point (MPP). The methods used are "perturbation and observation", "incremental conductance", "fuzzy logic controller" and "particle swarm optimization".

In the case of partial shading and the pursuit of the maximum power point of the PV panel, conventional methods prove to be ineffective. To solve this type of problem, we used the Particle Swarm Optimization (PSO) technique with FLC (Fuzzy Logic Controller), which allowed us to extract the maximum power value.

**Keywords:** PV, MPPT, PPM, PSO, FLC

## المخلص

في هذا البحث تم دراسة النظام الكهروضوئي واستخدامات تقنيات تتبع نقطة الطاقة القصوى MPPT هذا النظام يتكون من مولد كهربائي ضوئي ومرحلة تكيف وحمولة مقاومة ومرحلة تحكم مدمجة في السلسلة لتنظيم جهد المولد الكهروضوئي ابقاءه في مستوى نقطة الطاقة القصوى الطرائق المستعملة هي: تقنية الاضطراب والملاحظة (P&O)، وتقنية الناقل المتزايدة (IC)، تقنية المنطق الضبابي (FLC) وأخيرا تقنية تحسين سرب الجسميات (PSO).

في حالة التظليل الجزئي، الطرق التقليدية ثبتت عدم فعاليتها في السعي وراء أقصى نقطة لطاقة اللوحة الكهروضوئية. من أجل حل هذا النوع من المشاكل، استخدمنا تقنية PSO وFLC مما سمح لنا باستخراج أقصى قيمة للطاقة.

**الكلمات المفتاحية:** PV، MPPT، P&O، INC، PSO، FLC النظام الكهروضوئي.



