

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique

جامعة كاسدي مرباح ورقلة

Université Kasdi Merbah Ouargla



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : **Electrotechnique Industrielle**

Présenté par : **Maziz Khatir**

Thème:

**Commande MPPT d'un système  
photovoltaïque par les méthodes P&O et  
PSO**

Devant le jury :11/06/2024

<b>M<sup>r</sup> Khalifa Moussa</b>	<b>MCA</b>	<b>Président</b>	<b>UKM Ouargla</b>
<b>M<sup>d</sup> Naceur Sonia</b>	<b>MCA</b>	<b>Encadreur</b>	<b>UKM Ouargla</b>
<b>M<sup>r</sup> Taibi Djamel</b>	<b>MAA</b>	<b>Co- Encadreur</b>	<b>UKM Ouargla</b>
<b>M<sup>r</sup> Bourek Yassine</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>	<b>UKM Ouargla</b>

Année universitaire 2023/2024

## **REMERCIEMENTS**

Avant tout, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné courage, patience et force durant ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à exprimer notre remerciement et notre gratitude à notre encadreurs : Mr Taibi Djamel et Madame: Naceur Sonia pour la confiance qu'il nous a prodigué pour la direction de ce travail, sans cesser de nous encourager et de nous pousser vers les horizons de recherche scientifique

Nous remerciement sont également adressés aux membres de Jury qui ont accepté de juger ce travail

Nous remercions tous les enseignants département de Génie Electrique de l'université de Ouargla qui nous enseignés durant les années du cursus

En fin nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont aidés de Près ou de loin à la rédaction de ce travail.

## Dédicace

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mes

Chers parents, ma tendre épouse, à ma fille Marawa, ainsi qu'à toute ma

Famille et mes amis proches. Les mots ne suffisent pas pour exprimer toute

Ma reconnaissance pour votre soutien constant et votre amour inconditionnel.

Je voudrais également adresser mes remerciements spéciaux mon cher ami

Imad Talhi ainsi qu'à tous mes amis à l'université Ouargla pour leur soutien

Continu et leur présence précieuse.

## Liste des Acronymes et symboles

### Acronymes

**PV** : Panneau Photovoltaïque

**GP** : Générateur Photovoltaïque

**MPP** : Maximum Power Point

**PPM** : Point de Puissance Maximal

**MPPT** : Puriste du Point de Puissance Maximal (Maximum Power Tracking)

**DC-DC** : Continu \_Continu

**P&O** : Perturber et Observer (Perturbe and Observe)

**PSO** : L'optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization)

**LMPP** : Point de puissance Maximale Locale

**GMPP** : Point de Puissance Maximale Globale

### Symboles

**$I_{sc}$** : Le courant de court-circuit(A)

**$V_{oc}$**  : La tension de Circuit Ouvert(V)

**$I_{mpp}$**  : Courant d'un module Pv au point de puissance maximale(A)

**$V_{mpp}$**  : Tension d'un module Pv au point puissance(V)

**$P_{max}$**  : La puissance maximale Produite Pv (W)

**$G$**  : Eclairement (w/m<sup>2</sup>)

**$G_{ref}$**  : Eclairement de référence (w/m<sup>2</sup>)

**$T_{ref}$**  : Température de référence (°K)

**$T$**  : Température de fonctionnement de la cellule (°K)

**$V_{pv}$**  : Tension de sortie de la cellule photovoltaïque en volt (v)

**$P_{best}$**  : Est la meilleure position individuelle de la particule  $i$  ou  $i= 1, 2,.. .n$

**$G_{best}$**  : La meilleure position de toutes les particules.

**$X_i$**  : La position de la particule.

**$V_i$**  : La vitesse de la particule.

**$K$  et  $i$**  : Représentent le numéro d'itération et le nombre des particules.

**$W$**  : Constante, appelée coefficient d'inertie.

**$r_1, r_2$**  : Sont des valeurs aléatoires réparties dans [0,1].

**$C_1, C_2$**  : Constantes appelées coefficients d'accélération.

**$D_i(k+1)$** : Le rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $(k+1)$ .

**$D_i(k)$**  : Le rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $(k)$ .

**$\Delta D_i(k+1)$** : La variation du rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $(k+1)$ .

**$\Delta D_i(k)$**  : La variation du rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $(k)$ .

**$D_{besti}$** : Le meilleur rapport cyclique de la particule  $i$ .

**$D_{bestG}$**  : le meilleur rapport cyclique global (de toute les particules de l'essaim

# Sommaire

## Chapitre I : Modélisation et simulation des systèmes photovoltaïques

<b>I.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>04</b>
<b>I.2</b>	<b>Technologie des cellules solaires</b>	<b>04</b>
<b>I.2.1</b>	<b>Fabrication des cellules photovoltaïques</b>	<b>05</b>
<b>I.3</b>	<b>Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque</b>	<b>06</b>
<b>I.3.1</b>	<b>Avantages</b>	<b>06</b>
<b>I.3.2</b>	<b>Inconvénients</b>	<b>07</b>
<b>I.4</b>	<b>L'effet photovoltaïque</b>	<b>07</b>
<b>I.4.1</b>	<b>Cellule photovoltaïque</b>	<b>07</b>
<b>I.4.2</b>	<b>Générateur photovoltaïque (GPV)</b>	<b>08</b>
<b>I.4.2.1</b>	<b>Paramètres caractérisant le GPV</b>	<b>08</b>
<b>I.4.2.2</b>	<b>Le courant de court-circuit <math>I_{sc}</math></b>	<b>09</b>
<b>I.4.2.3</b>	<b>La tension à circuit ouvert <math>V_o</math></b>	<b>09</b>
<b>I.4.2.3</b>	<b>Le point de puissance maximale (MPP)</b>	<b>09</b>
<b>I.4.2.5</b>	<b>Rendement maximale de la conversion</b>	<b>09</b>
<b>I.4.2.6</b>	<b>Facteur de forme FF</b>	<b>10</b>
<b>I.5</b>	<b>Modèle mathématique d'une cellule PV</b>	<b>10</b>
<b>I.6</b>	<b>Schéma simulation d'un Panneau PV</b>	<b>12</b>
<b>I.6.1</b>	<b>Résultats de simulation d'un PV</b>	<b>12</b>
<b>I.6.2</b>	<b>Phénomène de l'ombrage</b>	<b>15</b>
<b>I.6.2.1</b>	<b>Simulation d'un module PV partiellement ombré</b>	<b>16</b>
<b>I.6.2.2</b>	<b>Résultats de simulation d'un PV avec un ombrage partiel</b>	<b>17</b>
<b>I.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>17</b>
	<b>Chapitre II : convertisseur DC-DC et Technique MPPT P&amp;O</b>	<b>16</b>
<b>II.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>17</b>
<b>II.2</b>	<b>Couplage directe d'un GPV à une charge résistive</b>	<b>17</b>
<b>II.3</b>	<b>Paramètres du système (GPV, étage d'adaptation et charge)</b>	<b>19</b>
<b>II.4</b>	<b>Convertisseur DC-DC</b>	<b>19</b>
<b>II.5</b>	<b>Convertisseur BOOST</b>	<b>20</b>
<b>II.5.1</b>	<b>Principe de fonctionnement</b>	<b>21</b>
<b>II.5.2</b>	<b>Régimes de conduction</b>	<b>21</b>
<b>II.5.3</b>	<b>Modèle mathématique équivalent</b>	<b>22</b>
<b>II.5.4</b>	<b>Rapport de conversion</b>	<b>23</b>
<b>II.6</b>	<b>Recherche du point de puissance maximal</b>	<b>24</b>
<b>II.6.1</b>	<b>Méthode de perturbation et observation P&amp;O</b>	<b>25</b>
<b>II.6.2</b>	<b>L'algorithme P&amp;O</b>	<b>27</b>
<b>II.7</b>	<b>Schéma de simulation de la méthode P&amp;O</b>	<b>28</b>
<b>II.8</b>	<b>Resultats de simulation</b>	<b>28</b>

<b>II.9</b>	<b>Résultats de la méthode P&amp;O</b>	<b>29</b>
<b>II.10</b>	<b>Conclusion</b>	<b>31</b>
	<b>Chapitre III : Simulation d'un système photovoltaïque dans les conditions D'ombrage les méthode P&amp;O et P S O</b>	<b>30</b>
<b>III.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>31</b>
<b>III.2</b>	<b>Méthode d'optimisations par essaim de particules (P S O)</b>	<b>31</b>
<b>III.2.1</b>	<b>L'algorithme P S O</b>	<b>33</b>
<b>III.3</b>	<b>Description de la chaine photovoltaïque</b>	<b>35</b>
<b>III.3.1</b>	<b>Simulation de la méthode P S O</b>	<b>35</b>
<b>III.3.2</b>	<b>Résultats de simulation de la méthode P S O</b>	<b>37</b>
<b>III.3.3</b>	<b>Interprétation des résultats</b>	<b>37</b>
<b>III.4</b>	<b>simulation de la méthode P S O d' ombrage partiel</b>	<b>37</b>
<b>III.4.1</b>	<b>Interprétation des résultats</b>	<b>38</b>
<b>III.5</b>	<b>Comparaisons les deux méthode (P&amp;O et P S O)</b>	<b>38</b>
<b>III.5.1</b>	<b>Méthode P&amp;O</b>	<b>38</b>
<b>III.5.2</b>	<b>Méthode P S O</b>	<b>39</b>
<b>III.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>40</b>

### **Liste des Figures**

	<b>Chapitre I : Modélisation et simulation des systèmes photovoltaïques</b>	
<b>Figure I.1</b>	<b>Nouvelle technologie des cellules solaire</b>	<b>05</b>
<b>Figure I. 2</b>	<b>Cellule photovoltaïque</b>	<b>06</b>
<b>Figure I. 3</b>	<b>Caractéristique de cellule PV</b>	<b>09</b>
<b>Figure I. 4</b>	<b>Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque</b>	<b>11</b>
<b>Figure I. 5</b>	<b>Module de simulation d'un panneau PV</b>	<b>12</b>
<b>Figure I .6</b>	<b>Caractéristique I-v et P-v d'un modèle photovoltaïque</b>	<b>13</b>
<b>Figure I .7</b>	<b>Caractéristiques I-V et P-V d'un champ photovoltaïque de trois panneaux</b>	<b>14</b>
<b>Figure I .8</b>	<b>Caractéristiques I – V et P-V d'un champ photovoltaïque trois panneaux en série à 1000w/m<sup>2</sup> et des températures variables</b>	<b>14</b>
<b>Figure I. 9</b>	<b>Modèle de simulation d'un module P V avec 3 diode de by passe</b>	<b>16</b>
<b>Figure I.10</b>	<b>Caractéristiques I-V d'un module PV partiellement ombre</b>	<b>17</b>
<b>Figure I.11</b>	<b>Caractéristiques V d'un module PV partiellement ombre</b>	
	<b>Chapitre II : Convertisseur DC-DC et Technique MPPT (P&amp;O et P S O)</b>	
<b>Figure II.1</b>	<b>Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de charge directe</b>	<b>17</b>
<b>Figure II. 2</b>	<b>Etage d'adaptation entre GPV et une charge Résistive</b>	<b>18</b>
<b>Figure II.3</b>	<b>schéma électrique d'un convertisseur DC-DC de type BOOST</b>	<b>21</b>
<b>Figure II. 4</b>	<b>a) Schéma équivalent d'un convertisseur BOOST avec interrupteur fermé</b>	<b>22</b>
<b>Figure II.4</b>	<b>b) Schéma équivalent d'un convertisseur BOOST avec interrupteur ouvert</b>	<b>22 23</b>
<b>Figure II. 5</b>	<b>Recherche du PPM par la méthode P&amp;O</b>	<b>27</b>
<b>Figure II.6</b>	<b>Organigramme de la méthode P&amp;O</b>	<b>28</b>
<b>Figure II.7</b>	<b>Simulation de module P&amp;O</b>	<b>29</b>
<b>Figure II.8</b>	<b>Variation de la puissance du panneau PV en utilisant P&amp;O</b>	<b>29</b>
<b>Figure II.9</b>	<b>L'évolution de la puissance Ppv sous l'effet de l'ombrage partiel</b>	<b>31</b>

	<b>Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque dans les conditions d'ombrages</b>	<b>30</b>
<b>Figure III.1</b>	<b>Organigramme de l'algorithme P S O</b>	<b>33</b>
<b>Figure III.2</b>	<b>Schéma bloc de simulation de système PV avec la P S O avec technique P S O</b>	<b>36</b>
<b>Figure III.3</b>	<b>Variation de la puissance du panneau PV de commande P S O d'un</b>	<b>36</b>
<b>Figure III .4</b>	<b>Variation de la puissance V de commande P S O d'un ombrage des conditions constantes T= 25°C</b>	<b>38</b>

## Introduction générale

L'importance croissante des énergies renouvelables dans la production d'électricité découle des préoccupations environnementales et de la nécessité de réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. Parmi ces sources, l'énergie photovoltaïque (PV) joue un rôle crucial en transformant la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Cependant, pour maximiser l'efficacité de conversion et optimiser la production énergétique des systèmes PV, il est essentiel de mettre en œuvre des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT - Maximum Power Point Tracking) [1].

Le suivi MPPT est une technique utilisée pour assurer que les panneaux solaires fonctionnent toujours au point de puissance maximale, indépendamment des variations des conditions d'ensoleillement et de température. Parmi les nombreuses méthodes développées pour le MPPT, les méthodes Perturb and Observe (P&O) et Particle Swarm Optimization (PSO) se distinguent par leur efficacité et leur simplicité de mise en œuvre [2], [3].

La méthode P&O, l'une des plus utilisées, fonctionne en perturbant la tension du panneau solaire et en observant le changement de la puissance pour ajuster le point de fonctionnement vers le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit simple et efficace dans des conditions stables, elle peut souffrir de fluctuations autour du point de puissance maximale et être moins performante dans des conditions météorologiques changeantes [4].

En revanche, la méthode PSO, inspirée du comportement des essaims d'oiseaux et des bancs de poissons, utilise une population de solutions candidates qui explorent l'espace de recherche de manière collaborative pour trouver le point de puissance maximale. Cette méthode est particulièrement efficace pour éviter les problèmes de convergence locale et offre une robustesse accrue face aux variations rapides des conditions environnementales.

Dans ce contexte, cette étude se propose d'examiner et de comparer l'efficacité des méthodes P&O et PSO pour la commande MPPT des systèmes photovoltaïques. Nous explorerons les principes de fonctionnement de chaque méthode, et leurs performances respectives à travers des simulations numériques sous MATLAB/SIMULINK. L'objectif ultime est d'identifier la méthode la plus appropriée pour optimiser l'extraction de puissance dans les systèmes photovoltaïques, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace et durable de l'énergie solaire.

Le travail de ce mémoire s'articule autour de trois principaux chapitres 2

➤ Dans le premier chapitre, le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique est énoncé. Il présente une modélisation détaillée du panneau photovoltaïque (PV), incluant ses caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V).

## Introduction générale

➤ Le deuxième chapitre aborde les différentes configurations de connexion entre le panneau PV et la charge, en se focalisant sur les convertisseurs DC-DC de type BOOST. De plus, il explore deux techniques de MPPT largement utilisées : P&O (Perturb and Observe) et PSO (Particle Swarm Optimization).

➤ Le chapitre trois se concentre sur la simulation et l'analyse du système PV complet à l'aide de MATLAB/Simulink. Il inclut l'étude du générateur PV, du convertisseur Boost et des commandes MPPT développées. Une attention particulière est portée à l'analyse des techniques MPPT pour les systèmes PV sous ombrage partiel, en comparant les performances de P&O et PSO.

Le mémoire se conclut par une synthèse des résultats et une discussion des perspectives futures.

# **Chapitre I**

## **Modélisation et simulation des systèmes photovoltaïques**

## **I.1. Introduction**

Aujourd'hui, la technologie photovoltaïque est suffisamment murée et maîtrisée pour prendre un véritable essor dans le domaine des applications de puissance d'énergie, ainsi l'optimisation des système photovoltaïque conduit sûrement a' une meilleure exploitation de l'énergie solaire ; [5].

Habituellement, les cellules solaires convertissent la lumière du soleil en énergie électrique avec une tension basse limitée. Ces cellules sont intégrées et connectées ensemble pour donner les modules solaires disponibles dans le commerce qui sont ensuite connectés pour forme un générateur photovoltaïque basé sur les exigences du système en tension et en courant. Les modules solaires étant couteux il est nécessaire d'étudier leur comportement par simulation avant la mise en œuvre pratique du système solaire. A des fins de simulation le module solaire est décrit par un circuit équivalent ; [6].

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur l'énergie solaire. Nous décrirons ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïque leurs caractéristiques principales et l'influence des différents paramètres, puis nous aborderons l'association des cellules pour constituer un module photovoltaïque et le comportement en présence de l'ombre ; [7].

## **I.2 Technologie des cellules solaires**

Le Silicium est l'un des matériaux le plus courant sur terre, c'est le sable, mais un haut degré de pureté est requis pour en faire une cellule photovoltaïque et le procédé est coûteux. Selon les technologies employées, on retrouve le Silicium monocristallin avec un rendement de 16 à 18%, le Silicium Poly cristallin de rendement de 13 à 15%, le silicium amorphe présente une efficacité entre 5 et 10%. D'autres matériaux tels que l'Arséniure de Galium et le Tellure de Cadmium qui sont en court de test dans les laboratoires est présentent un rendement de (38%).

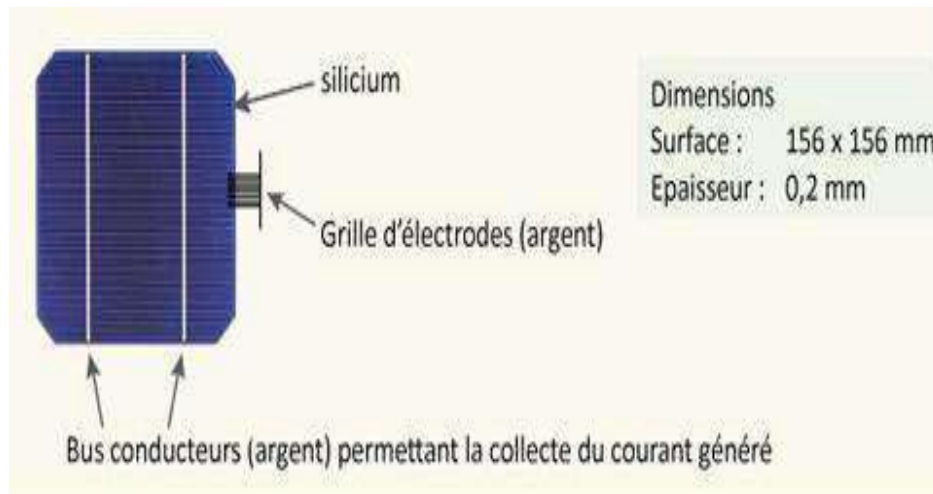


**Figure I.1** : Nouvelle technologie des cellules solaire

## I.2.1 Fabrication des cellules photovoltaïques

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées

« Lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques.



**Figure (I .2) :** Cellule photovoltaïque

### **I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque**

Les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont ; [5].

#### **I.3.1 Avantages**

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- Génère l'énergie requise.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- Entretien minimal.
- Aucun bruit.

#### **I.3.2 Inconvénients**

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque

### **I.4 L'effet photovoltaïque**

C'est un phénomène physique qui permet la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable à travers un matériau semi-conducteur. Ce phénomène a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel.

### **I.4.1 Cellule photovoltaïque**

C'est un dispositif électronique exposé à la lumière pour produire l'électricité. C'est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque qui est réalisé à base de silicium mélangé avec des impuretés de phosphore et de bore. Son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu.



**Figure (I.1) : cellule photovoltaïque**

### **I.4.2 Générateur photovoltaïque (GPV)**

C'est un rassemblement de cellules identiques pour former un module ou un panneau solaire, afin d'accroître la puissance générée. La mise en série de plusieurs cellules solaires permet d'augmenter la tension, tandis que la mise en parallèle conduit à une sommation des courants en conservant la tension.

Une combinaison série-parallèle est utilisée pour obtenir un PS aux caractéristiques désirées (tension et courant).

### I.4.2.1 Paramètres caractérisant le GPV

Les caractéristiques électriques du photovoltaïque sont les même que celles des cellules photovoltaïques avec rapports proportionnels. Ces rapports dépendent du nombre de cellules connectées en série / parallèle. La relation entre courant et la tension du module PVest non linéaire les courbes I-V et P-V sont très importants pour l'étude des caractéristiques du module PV

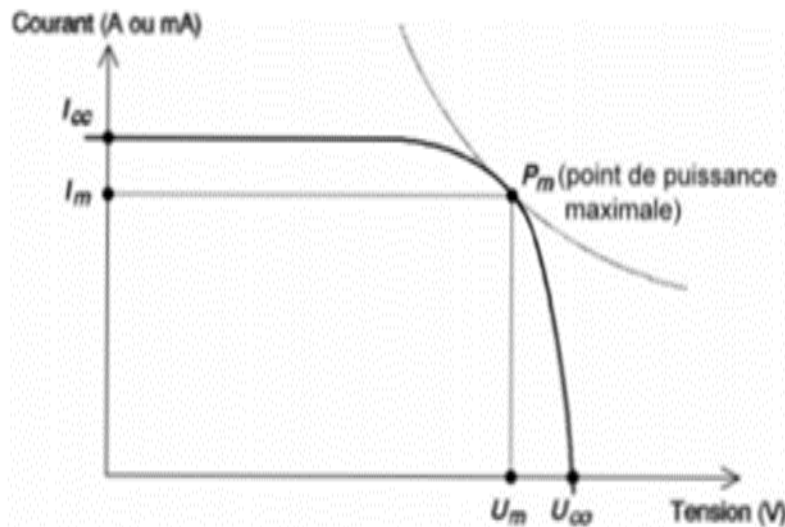


Figure (I.3) : Caractéristique de cellule PV

### I.4.2.2 Le courant de court-circuit $I_{sc}$

C'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous la condition court-circuit c.-à-d.  $V=0$ .

### I.4.2.3 La tension à circuit ouvert $V_{oc}$

C'est la tension à travers la jonction PN (sous ensoleillement constant) sans aucune circulation de courant.

### I.4.2.4 Le point de puissance maximale (MPP)

Le point de puissance maximale (Maximum Power Point), c'est le point où le système PV global fonctionne avec un rendement maximum et produit une puissance de sortie maximale. Une condition de puissance maximale est vérifiée quand  $I_{mpp}$  rencontre  $V_{mpp}$ , où :

**$I_{mpp}$**  : Le courant de point de puissance maximal.

**$V_{mpp}$**  : La tension de point de puissance maximal.

### I.4.2.5 Rendement maximale de la conversion

C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance de rayonnement incident sur la surface de la cellule.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{mpp}.V_{mpp}}{E.S_c} \quad (I.1)$$

Où :  $S_c$  : est la surface de la cellule,  $E$  : est l'ensoleillement ambiant.

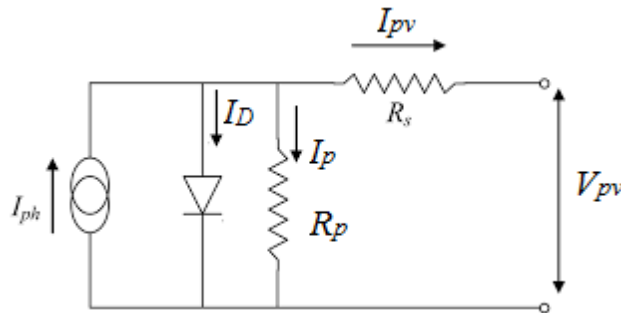
### I.4.2.6 Facteur de forme FF

C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge et le produit de :  $I_{sc}$ .  $V_{oc}$

$$FF = \frac{I_{mpp}.V_{mpp}}{V_{oc}.I_{sc}} \quad (I.2)$$

## I.5 Modèle mathématique d'une cellule PV

Le schéma équivalent d'une cellule PV est montré dans la figure 1. Le modèle considéré et constitué d'un générateur de courant continu  $I_{ph}$  qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, avec une diode parallèle modélisant la jonction P-N et de deux résistances  $R_p$  et  $R_s$  caractérisant respectivement les courants de fuite de la jonction et les diverses résistances des contacts de connexion.



**Figure (I.4):** Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le courant produit par le GPV est donné par les équations suivantes :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (I.3)$$

$I_{ph}$  : Le courant photonique, il dépend de la température et de l'ensoleillement

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (I.4)$$

$T_{ref}$  : Température de référence ( $^{\circ}K$ )

## Chapitre I Modélisation et Simulation des systèmes photovoltaïques

**T** : Température de fonctionnement de la cellule ( $^{\circ}K$ )

**G** : Eclairement ( $w/m^2$ )

**Gref** : Eclairement de référence ( $w/m^2$ )

**Isc** : Courant de court-circuit

**Ki** : Rapport entre le courant de court-circuit et la température

**ID** : Le courant de jonction P/N, donné par l'équation suivante :

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{KTaN_s}} - 1 \right) \quad (I.5)$$

**q** : Charge d'électron ( $q=1.6 \times 10^{-19} C$ )

**K** : Constante de Boltzmann ( $K=1.38 \times 10^{-23} J/K$ )

**a** : Facteur d'idéalité de la diode

**Ns** : Nombre de cellules connectées en série par module

**I<sub>s</sub>** : Le courant de saturation de la diode, donnée par :

$$I_s = I_{rs} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{-\frac{qE_g}{Ka} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (I.6)$$

**Eg** : L'énergie de gap du semi-conducteur utilisé.

**I<sub>rs</sub>** : Le courant de saturation inverse, donné par :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\frac{qV_{oc}}{eN_s a K T - 1}} \quad (I.7)$$

**I<sub>p</sub>** : Courant de fuit de la jonction P/N, donné par :

$$I_p = \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_p} \quad (I.8)$$

Valeurs numériques des constants utilisés dans la simulation :

**Ki**=0.00102A/ $^{\circ}K$  ; **q**=1.6 $\times 10^{-19}C$  ; **K**=1.38 $\times 10^{-23}J/K$  ; **a**=0.98117 ; **Eg**=1.12eV;

**Tref** =298.15 $^{\circ}K$  (25 $^{\circ}C$ ) ; **Gref** = 1000w/m<sup>2</sup>; **Rs** = 0.39383 $\Omega$  ; **Rp** = 313.3991  $\Omega$

**Isc** =7.84A ; **Voc** = 36.3.V; **Ns** = 60

Sur la base du modèle mathématique de la cellule PV, on peut obtenir le modèle de simulation comme suite :

## I.6 Schéma simulation d'un Panneau PV

Ce schéma bloc représente une simulation d'un panneau photovoltaïque (PV). Il décrit les différents éléments et leur interaction pour convertir l'énergie solaire en électricité.

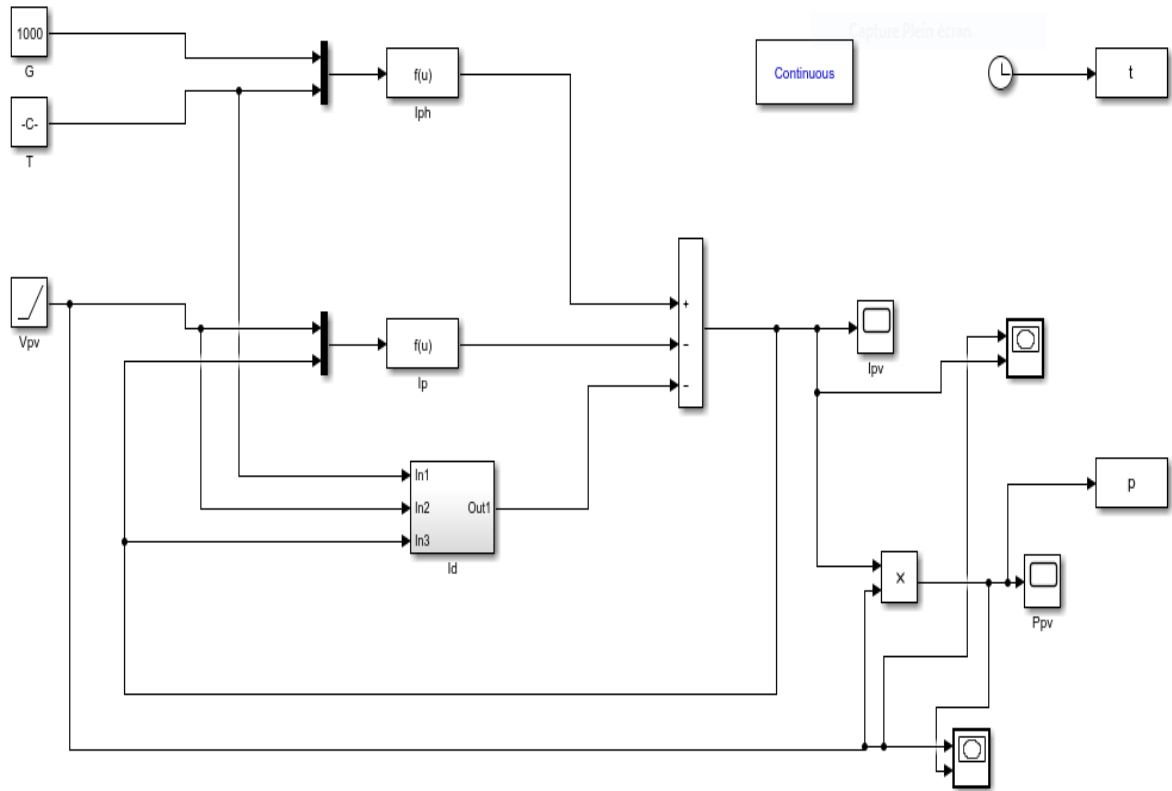
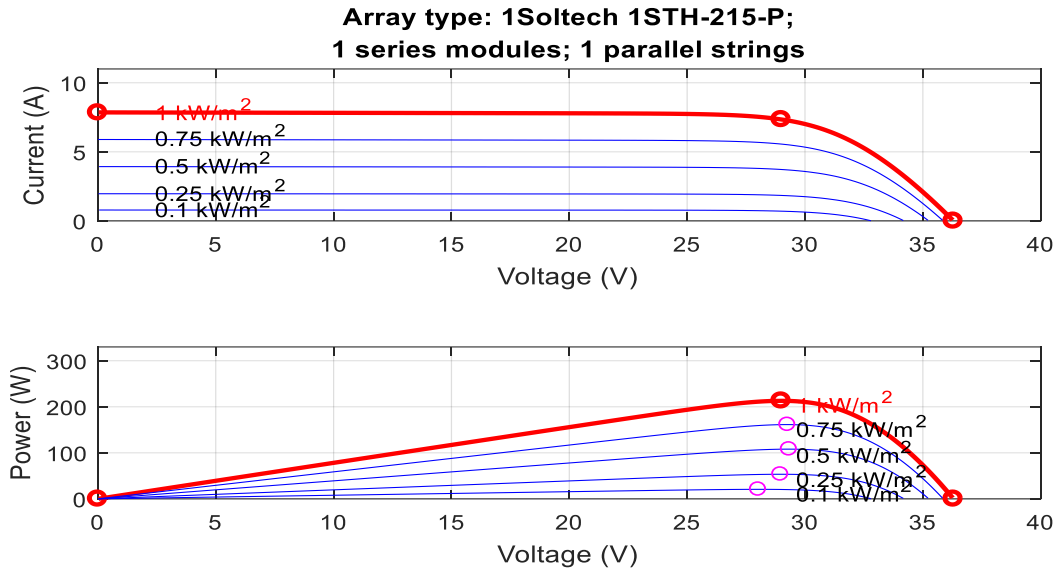


Figure ( I.5) : Modèle de simulation d'un Panneau PV

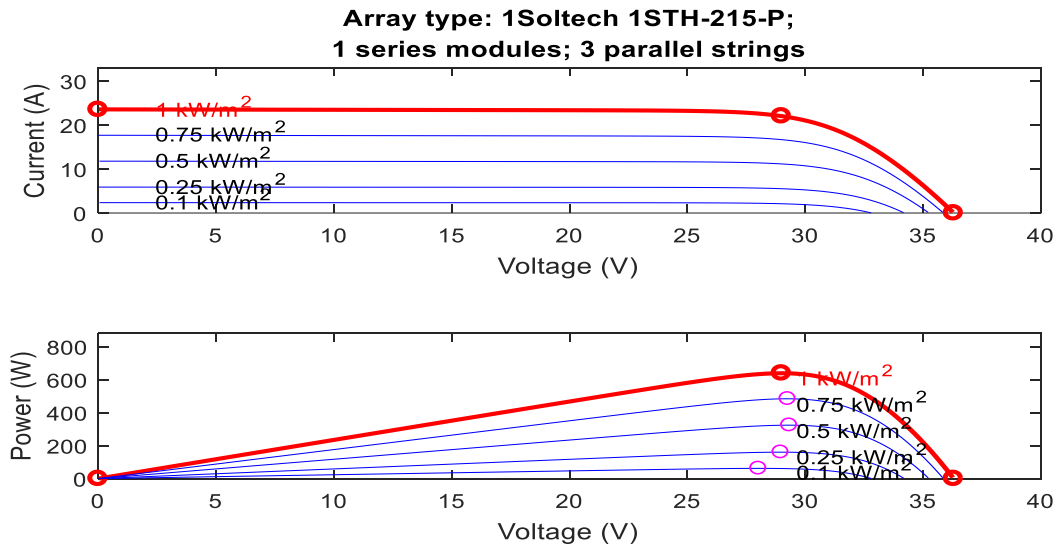
### I.6.1 Résultats de simulation d'un PV

Une simulation a été réalisée sous Matlab/Simulink pour analyser le comportement des modules et du champ photovoltaïque sous différentes conditions d'éclairement (1000, 750, 500, 250 et 100 W/m<sup>2</sup>) et de température (50, 40, 25 et 5 °C). Les figures (I.6, I.7 et I.8) illustrent les courbes caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) obtenues. Les résultats montrent que l'éclairement a un impact direct sur le courant généré : plus l'éclairement est élevé, plus le courant augmente, tandis que la tension ne subit que de légères variations. En revanche, la température influence principalement la tension, qui diminue lorsque la température

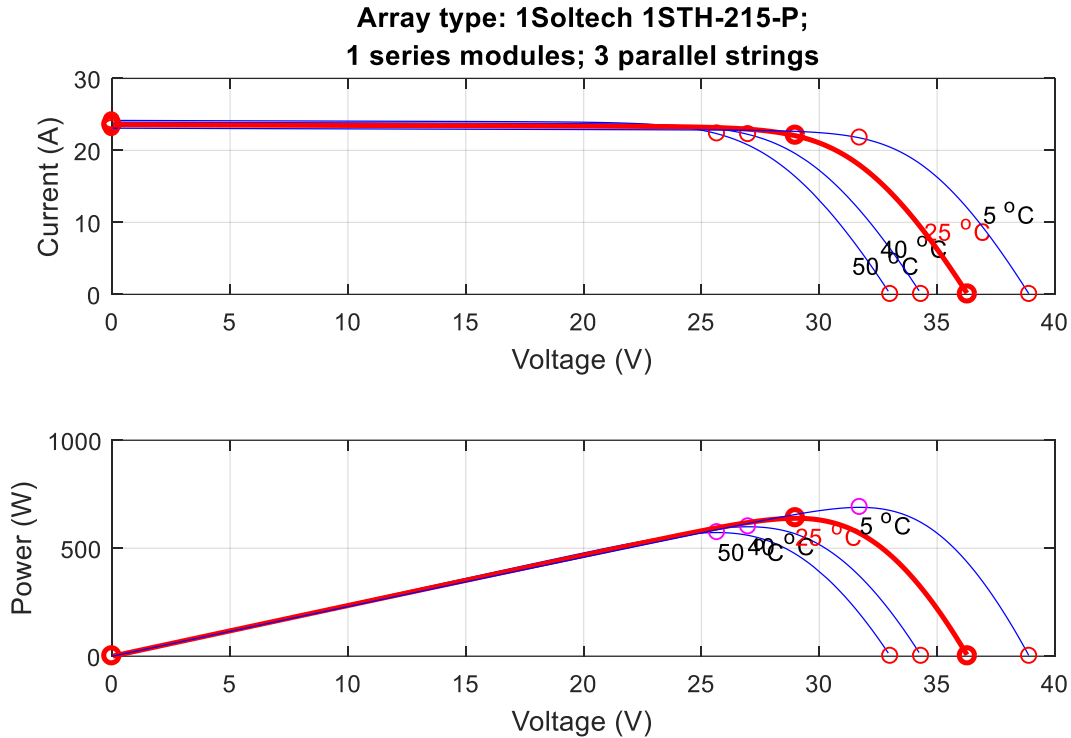
augmente, sans affecter significativement le courant. Cette influence se reflète automatiquement sur la puissance du module et du champ en raison de la relation  $P = V.I$ . On remarque ainsi que la puissance augmente avec l'augmentation de l'éclairement et diminue avec l'augmentation de la température.



**Figure (I.6):** Caractéristiques I-V et P-V d'un module photovoltaïque à 25°C et à des éclairements variables



**Figure (I.7):** Caractéristiques I-V et P-V d'un champ photovoltaïque de trois panneaux en série à 25°C et à des éclairements variables



**Figure (I.8):** Caractéristiques I-V et P-V d'un champ photovoltaïque de trois panneaux en série à  $1000 \text{ W/m}^2$  et à des températures variables.

### I.6.2. Phénomène d'ombrage

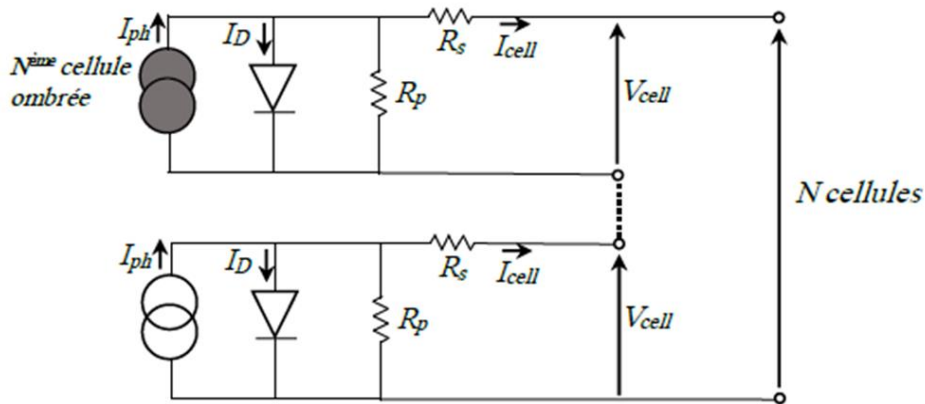
Pour protéger efficacement les cellules solaires ombrées des dommages causés par les points chauds et réduire les pertes de puissance dues à l'ombrage partiel, des diodes de bypass sont connectées en parallèle. Ces diodes deviennent conductrices sous un rayonnement non uniforme, permettant au courant des cellules non ombrées de les traverser.

Lorsqu'un groupe de cellules photovoltaïques (PV) est connecté en série, le courant global est limité par la cellule la moins performante ou la moins éclairée. Cette situation, appelée ombrage partiel, entraîne une baisse de courant dans la cellule touchée, qui peut même atteindre zéro. Le courant total doit alors traverser les résistances de cette cellule, provoquant une chute de tension de sortie.

L'ombrage d'une cellule dans une chaîne entraîne sa polarisation inverse, transformant la cellule en charge au lieu de générateur, et augmentant ainsi sa température. Si la température

devient trop élevée et que le système n'est pas bien protégé, un point chaud (hot spot) peut apparaître, risquant d'endommager irréversiblement la cellule ou le module.

En pratique, l'installation d'une diode de bypass par cellule est coûteuse. Habituellement, une diode est utilisée pour 20 cellules. Les points chauds peuvent également survenir lorsque des modules PV connectés en parallèle ont des tensions de circuit ouvert différentes. Si un module a une tension plus basse en raison de l'ombrage, il peut se comporter comme une charge, consommant la puissance des autres modules. Pour éviter cela, des diodes de blocage sont installées en série avec les chaînes de modules PV.



**Figure (I.8) :** Module PV avec une cellule touchée par l'ombre

### **I.6.2.1 Simulation d'un module PV partiellement ombré**

Afin de visualiser la caractéristique de la puissance à la sortie du panneau sous l'effet de l'ombrage, il est nécessaire de réaliser une schématisation électrique de ce phénomène (figure I.9). Cette schématisation doit inclure la modélisation du générateur photovoltaïque (GPV), de la diode et de la variation de l'insolation. Pour cela, l'environnement Matlab/Simulink est adapté pour effectuer cette simulation.

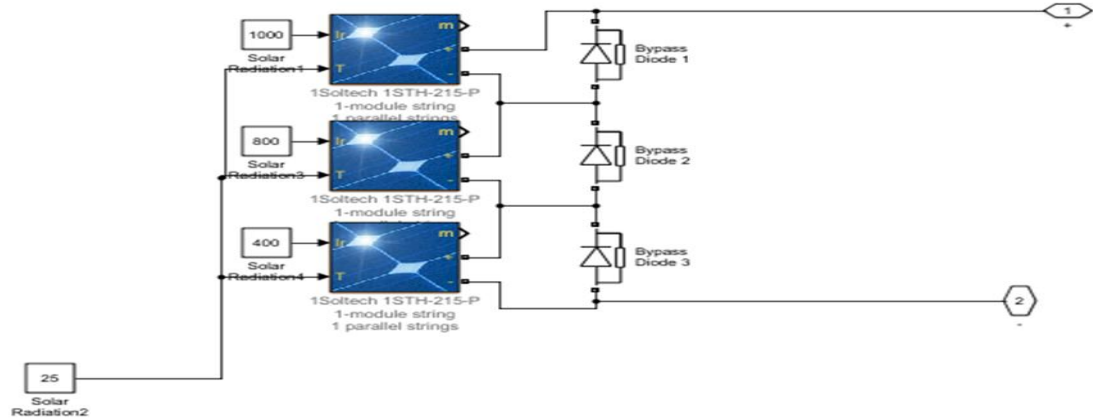


Figure (I.9) : Modèle de simulation d'un module PV avec 3 diodes de by-pass

### I.6.2.2 Résultats de simulation d'un PV avec un ombrage partiel

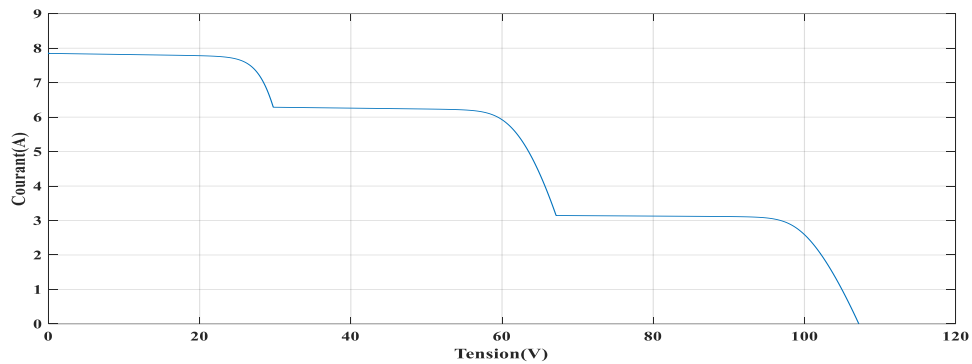


Figure (I.10) : Caractéristiques I-V d'un module PV partiellement ombré

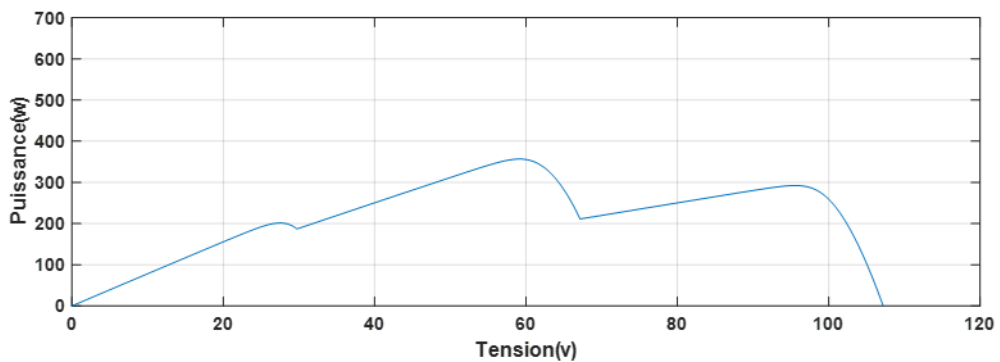


Figure (I.11) : Caractéristiques P-V d'un module PV partiellement ombré

Sur la base de les courbes présentées dans les figures (Figure I.10 et I.11), on observe une variation de la caractéristique ( $P_{pv}$  -  $V_{pv}$ ) du champ photovoltaïque due à l'effet d'ombrage partiel. Cette variation est attribuée aux différentes intensités d'éclairement. Le point de puissance maximale ( $P_{max}= 300$  W) est illustré dans la courbe. Cela est lié à la variation de l'éclairement.

### **I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exposé les notions de base sur le fonctionnement des cellules, des modules, et des générateurs photovoltaïques. Nous avons présenté l'influence de divers paramètres externes sur leurs caractéristiques. Nous avons également abordé le phénomène d'ombrage partiel pouvant survenir au sein d'un générateur et le comportement des cellules PV sous polarisation.

## **Chapitre II**

# **Convertisseur DC-DC et Technique MPPT P&O**

## II.1. Introduction

Comme exposé au premier chapitre, un GPV présente des caractéristiques I-V non linéaires et qui admettent un point de fonctionnement optimal dans les conditions homogènes d'éclairement et de température.

Une adaptation d'impédance s'impose et cela peut se faire par un couplage direct d'une charge adaptée ou en insérant entre le GPV et la charge électrique un dispositif électronique. Ce dispositif n'est autre qu'un convertisseur statique muni d'une commande de poursuite du MPP ; [8].

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude du convertisseur DC-DC type BOOST comme étage de conversion d'énergie, on présentera quelques techniques MPPT existantes qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale.

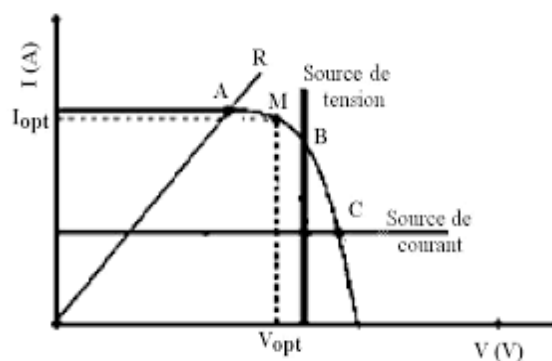
## II.2. Couplage direct d'un GPV à une charge résistive

Le point de fonctionnement du GPV résulte de l'intersection entre la caractéristique I-V du GPV, et la caractéristique I-V de la charge lorsque la connexion est directe entre le GPV et la charge.

Trois types de charge DC typiques existent : une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant.

### Remarque

Pour la connexion d'un GPV à une charge alternative, nous avons obligatoirement besoin d'un étage d'adaptation spécifique



**Figure (II.1) :** Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de charges en connexion directe

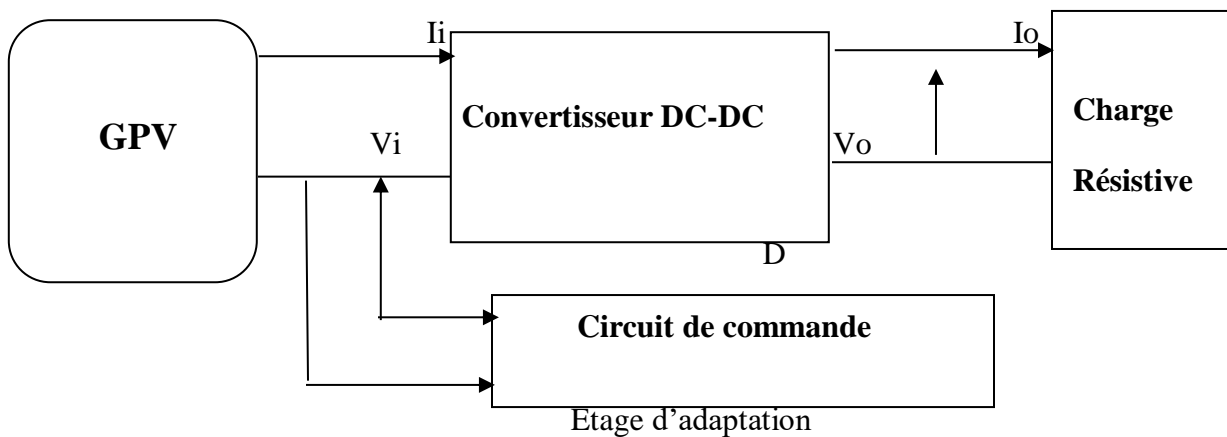
La figure (II.1), représente les caractéristiques I-V d'un GPV et les caractéristiques I-V des trois types de charges, les points d'intersection entre les caractéristiques I-V du GPV et celles des trois charges sont :

- 1) Point A pour une charge résistive,
- 2) Point B pour une charge de type source de tension,
- 3) Point C pour une charge en source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est inférieure à la puissance maximale disponible  $P_{max}$ . Donc, une perte de puissance aux bornes du GPV implique. Seule une charge dont la caractéristique passe par le point  $(V_{opt}, I_{opt})$  permet d'extraire la puissance optimale. La valeur de cette charge est :

$$R_{opt} = V_{opt} I_{opt} \quad (7)$$

Dans le cas général, il y a peu de chance pour que la charge réelle suivre naturellement ces variations. Il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire en insérant entre le générateur et la charge électrique, un dispositif adaptateur d'impédance. Ces adaptateurs d'impédance sont des convertisseurs DC/DC piloté par un circuit de commande, afin d'extraire la totalité de la puissance produite par le GPV.



**Figure( II.2):** Etage d'adaptation entre GPV et une charge Résistive

### II.3 Paramètres du système (GPV, étage d'adaptation et charge)

- Fonction de transfert de tension

$$F = \frac{V_o}{V_i} \quad (\text{II.1})$$

- Fonction de transfert de courant

$$F_i = \frac{I_o}{I_i} \quad (\text{II.2})$$

- Rendement d'un convertisseur DC-DC

$$= \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o I_o}{V_i I_i} = F_v F_i \quad (\text{II.3})$$

L'impédance de sortie du convertisseur

$$R_o = \frac{V_o}{I_o} \quad (\text{II.4})$$

- L'impédance d'entrée du convertisseur DC-DC : l'impédance d'entrée du convertisseur DC-DC est une valeur contrôlable, l'adaptation de l'impédance du panneau PV à l'impédance de la charge est nécessaire pour un transfert de puissance maximale. Le convertisseur DC-DC est commandé par le signal de rapport cyclique  $D$ , donc la modification du rapport cyclique entraîne la modification de l'impédance d'entrée du convertisseur DC-DC.

$$R_i = \frac{R_o F_i}{R_v} \quad (\text{II.5})$$

### II.4. Convertisseur DC-DC

Le convertisseur DC-DC est un dispositif électronique qui transforme une tension continue à une autre tension continue. Son rôle est de faire l'adaptation entre la source (GPV) et la charge, pour un transfert de puissance maximal. Les hacheurs présentent la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un générateur PV, ils sont des convertisseurs statiques permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et interrupteur qui est réalisé avec un dispositif semi-conducteur en mode commuté, généralement un transistor MOSFET ou IGBT. L'interrupteur travaille à une fréquence constante  $f$  avec un intervalle actif  $DT$ , où  $T$  est la période de commutation ( $T=1/f$ ) et  $D$  est le rapport cyclique de commutateur ( $D \in [0,1]$ ). La fréquence de commutation  $f$  se situe généralement dans la plage de 1KHz à 1MHz, dépendant

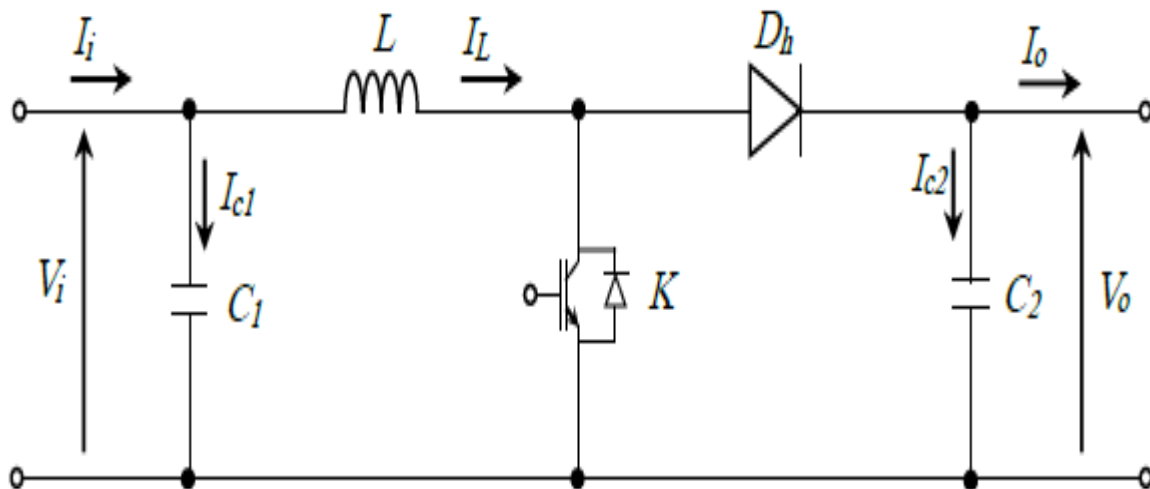
de la vitesse de commutation des dispositifs semi-conducteurs. Les valeurs moyennes de la tension et du courant de sortie peuvent être ajustées en variant le rapport cyclique  $D$ .

Le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée est appelé le rapport de conversion ( $Fv=VoVi$ ). Quand il est inférieur à 1, le convertisseur est appelé convertisseur abaisseur ou dévolteur (Buck converter); et quand il est supérieur à 1, le convertisseur est appelé convertisseur élévateur ou survolteur(BOOST).

## II.5 Convertisseur BOOST

Comme son nom indique, son application typique est la conversion d'une basse tension en une tension plus élevée. Par conséquent, son courant de sortie est inférieur à son courant d'entrée en raison de l'équilibre de la puissance.

La structure est composée principalement d'une inductance  $L$  et d'interrupteur  $K$  et diode  $D_h$



Figure( II.3): schéma électrique d'un convertisseur DC-DC de type BOOST

### II.5.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur BOOST peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur  $K$  :

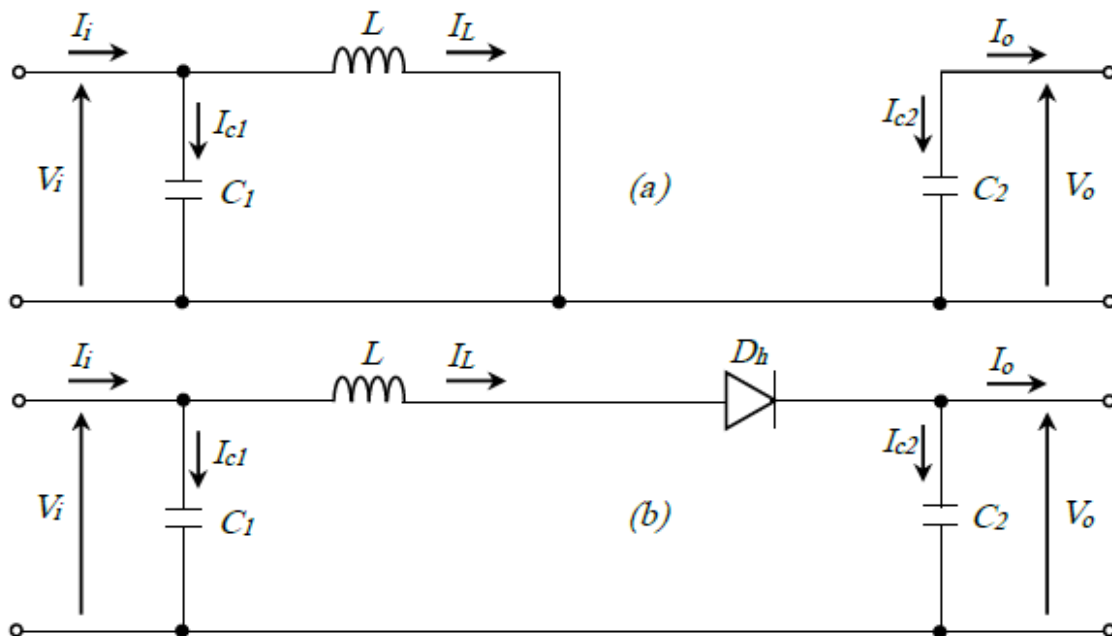
- Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur  $K$  est fermé, cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode  $D_h$  est alors bloquée et la charge est déconnectée de l'alimentation. Le condensateur  $C_2$  fournit de l'énergie à la charge.

- La phase de roue libre : lorsque l'interrupteur  $K$  est ouvert et la diode  $D_h$  est fermée, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est restituée au condensateur et à la charge. Lors de cette phase, le fait que l'inductance  $L$  soit en série avec la source de tension d'entrée permet d'obtenir un montage survolteur.

### II.5.2 Régimes de conduction

Le convertisseur BOOST est caractérisé par trois régimes de fonctionnement distincts :

- Conduction continue : le courant  $I_o$  ne s'annule jamais.
- Conduction critique : le courant s'annule ponctuellement.
- Conduction discontinue : le courant prend une valeur nulle, pendant une durée supérieure à



**Figure (II. 4 ) :** a) Schéma équivalent dun convertisseurBOOSTavec interrupteur fermé  
b) Schéma équivalent dun convertisseurBOOSTavec interrupteur ouvert

### II.5.3. Modèle mathématique équivalent

la figure II.4. a montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur avec interrupteur  $K$  fermé.

En appliquant les lois de Kirchoff sur les circuits équivalents, on obtient :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dvo(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_l = L \frac{di_l(t)}{dt} = Vi(t) \end{cases} \quad 0 < t < DT \quad (\text{II.6})$$

Pour la période  $(1-D)T$  du commutateur ouvert, on obtient :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dvo(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2} = C_2 \frac{dvo(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ V_l = L \frac{di_l(t)}{dt} = V_i(t) - V_l(t) \end{cases} \quad DT < t < T \quad (\text{II.7})$$

En arrangeant les termes des équations (13) et (14), on obtient :

$$\begin{cases} i_l(t) = i_i(t) - C_1 \frac{dvi(t)}{dt} \\ i_o(t) = (1-D)i_l - C_2 \frac{dvo(t)}{dt} \\ V_i(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} + (1-D)V_o \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

### II.5.4. Rapport de conversion

L'approximation de l'existence de petites ondulations permet de remplacer les variables dépendantes du temps par leurs valeurs moyennes.

Pour :  $0 < t < DT$

$$\begin{cases} i_{c1} = I_i - I_l \\ i_{c2} = -I_o \\ V_l = V_i \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Et pour :  $DT < t < T$

$$\begin{cases} I_{c1} = I_i - I_l \\ I_{c2} = -I_o \\ V_l = V_i \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

En régime permanent :

$$\begin{cases} \langle I_{c1} \rangle = D(I_i - I_l) + (1-D)(I_i - I_l) = 0 \\ \langle I_{c2} \rangle = D(-I_o) + (1-D)(I_l - I_o) = 0 \\ \langle V_l \rangle = DV_i + (1-D)(V_i - V_o) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Ceci peut être réduit à :

$$\begin{cases} V_i = (1-D)V_o \\ I_i = (1-D)I_l \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Donc, on peut exprimer le rapport de conversion :

$$\begin{cases} F_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} & \text{(a)} \\ F_i = \frac{I_o}{I_i} = 1 - D & \text{(b)} \end{cases} \quad (II.13)$$

En remplaçant les deux termes (a) et(b) de l'équation (20) dans l'équation (12), on obtient l'impédance d'entrée du BOOST :

$$R_{i= \frac{F_i}{F_V} = \frac{1-D}{1-D} R_L \Rightarrow R_i (1-D)^2 R_L \quad (II.14)$$

Par conséquent, l'impédance de sortie du convertisseur BOOST( $R_L$ ) est exprimée comme suit :

$$R_L = \frac{R_i}{(1-D)^2} \quad (II.15)$$

$$\text{Donc , } R_{L \min} = \frac{R_i}{(1-D_{\min})^2} \quad (II.16)$$

ET

$$R_{L \max} = \frac{R_i}{(1-D_{\max})^2} \quad (II.17)$$

Pour :  $D_{\min}=0.1$  ,  $D_{\max}=0.9$  et  $R_i = R_{opt}$  ,on peut trouver l'intervalle ou l'impédance de sortie ne doit pas d'être dehors , afin de suivre le MPP en se basant sur le convertisseur BOOST .

Pour notre module PV :

$$R_{OPT} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} = \frac{36.3}{7.84} = 4.63 \Omega$$

Donc ,  $R_{L \min}=4.63 \Omega$  et  $R_{L \max}=\Omega$

### **Remarque:**

Le convertisseur BOOST ne peut suivre le MPP que dans une plage d'impédance de charge spécifique

## **II.6. Recherche du point de puissance maximal**

Pour un éclairement et une température donnée, il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale. L'optimisation consiste à poursuivre ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur. Cette adaptation de charge dont le principe s'effectue en générale à l'aide d'un convertisseur statique, es nommée « Recherche du Point de Puissance Maximale », ou bien « Maximum Power Point Tracking » (MPPT).

L'adaptateur peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

Les techniques de contrôle utilisées consistent 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 à tout moment.

Pour une variation d'ensoleillement ou température ou de la charge, pour une puissance incidente  $W1$ , la puissance optimale transférée à la charge est obtenue pour un rapport cyclique  $D1$ . Si la puissance incidente change ( $W2$ ), alors le point de puissance maximale est changé. Pour converger vers ce point, il faut ajuster le rapport cyclique à une nouvelle valeur  $D2$ . Plusieurs solutions ont été proposées pour l'algorithme de recherche du MPP commandant le convertisseur statique.

### **II.6. 1.Méthode de perturbation et observation P&O**

Ce type de commande se base sur la recherche de la puissance maximale par la variation ou la perturbation de la tension de sortie du panneau PV et ceci en agissant sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, et en analysant la puissance, si celle-ci augmente suite à une perturbation alors on garde la même direction, sinon on inverse le sens de la perturbation au cycle suivant. Le point de puissance maximale est atteint lorsque le rapport est nul.

Voici l'algorithme exact :

- 1) Pour une tension  $U1$  fixée, on mesure la puissance correspondante  $P1$  délivrée par le générateur.
- 2) Après un certain temps, on impose une tension  $U2 = U1 + \Delta U$  et mesure également la puissance correspondante  $P2$ .
- 3) Si  $P2$  est supérieur à  $P1$  : l'algorithme cherche à imposer une tension plus grande :

$$U3 = U2 + \Delta U$$

Sinon : l'algorithme cherche au contraire à abaisser la tension :

$$U3 = U1 - \Delta U$$

On résume cette analyse dans quatre cas :

- **1er cas** :  $\Delta U > 0$  et  $\Delta P > 0$  : le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; et puisque  $\Delta P > 0$ , on est donc dans la bonne direction. On augmente la valeur de la tension du panneau PV dans la prochaine itération.
- **2ème cas** :  $\Delta U < 0$  et  $\Delta P > 0$  : le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP ; et puisque  $\Delta P > 0$ , on est donc dans la bonne direction. On diminue la valeur de la tension du panneau PV dans la prochaine itération.

- **3ème cas** :  $\Delta U < 0$  et  $\Delta P < 0$  : le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; et puisque  $\Delta P < 0$ , on est donc dans le mauvais sens. Lors de la prochaine itération on doit corriger le sens c.-à-d. on augmente la valeur de la tension du panneau PV.
- **4ème cas** :  $\Delta U > 0$  et  $\Delta P < 0$  : le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP ; et puisque  $\Delta P < 0$ , on est donc dans le mauvais sens. Lors de la prochaine itération on doit corriger le sens c.-à-d. on diminue la valeur de la tension du panneau PV.

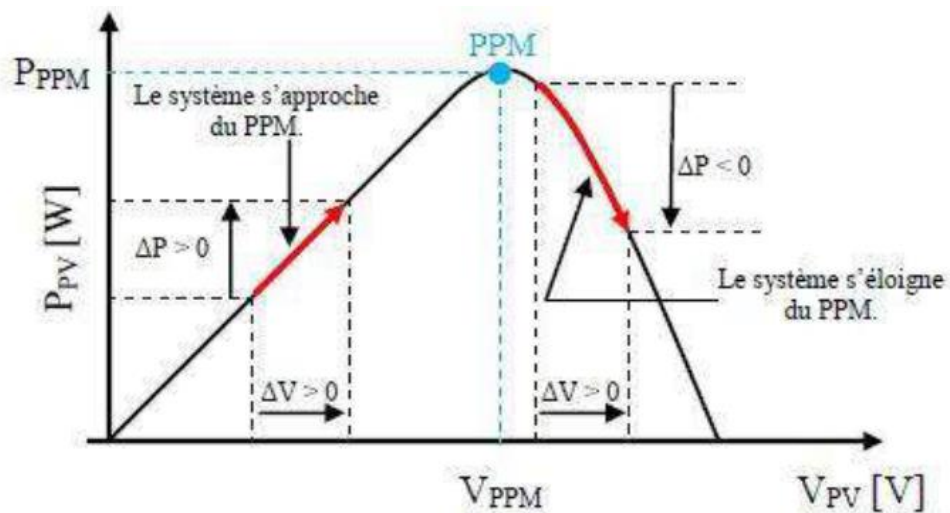
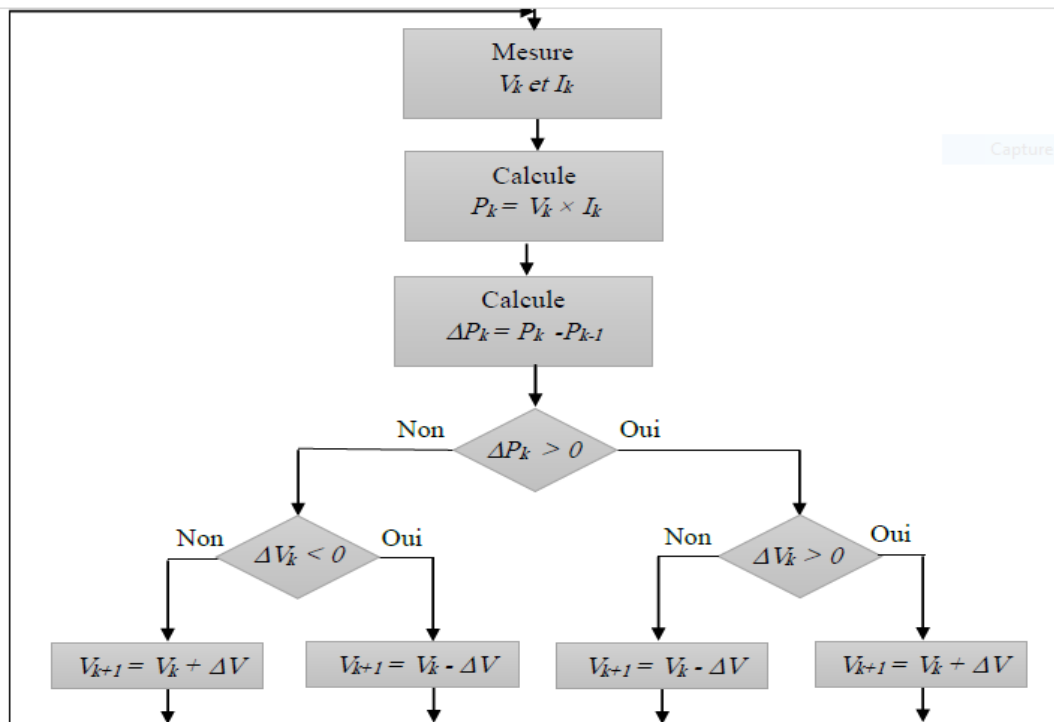


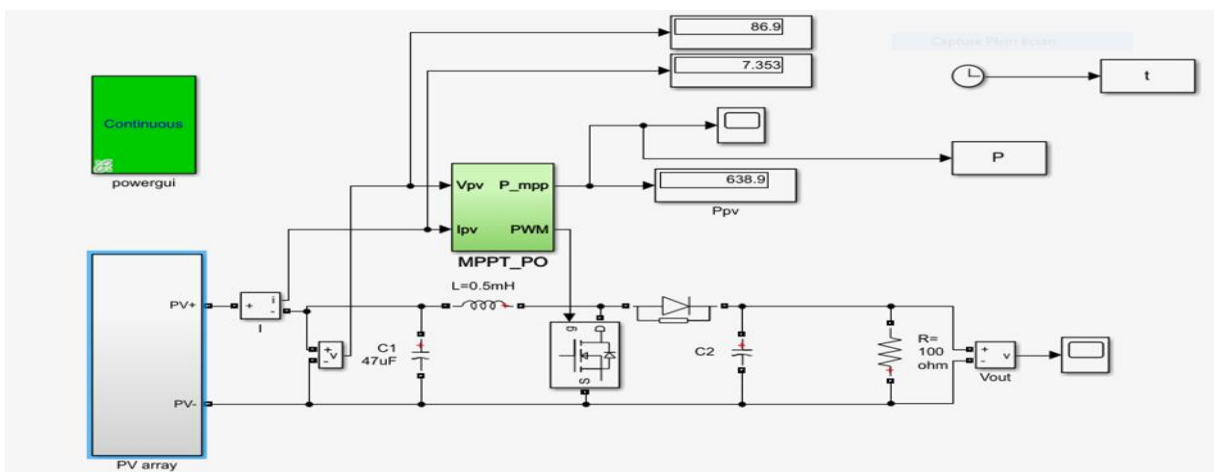
Figure (II. 5) : Recherche du PPM par la méthode (P&O)

### II.6.2 L'algorithme P&O



Figure( II.6) : Organigramme de la méthode P&O

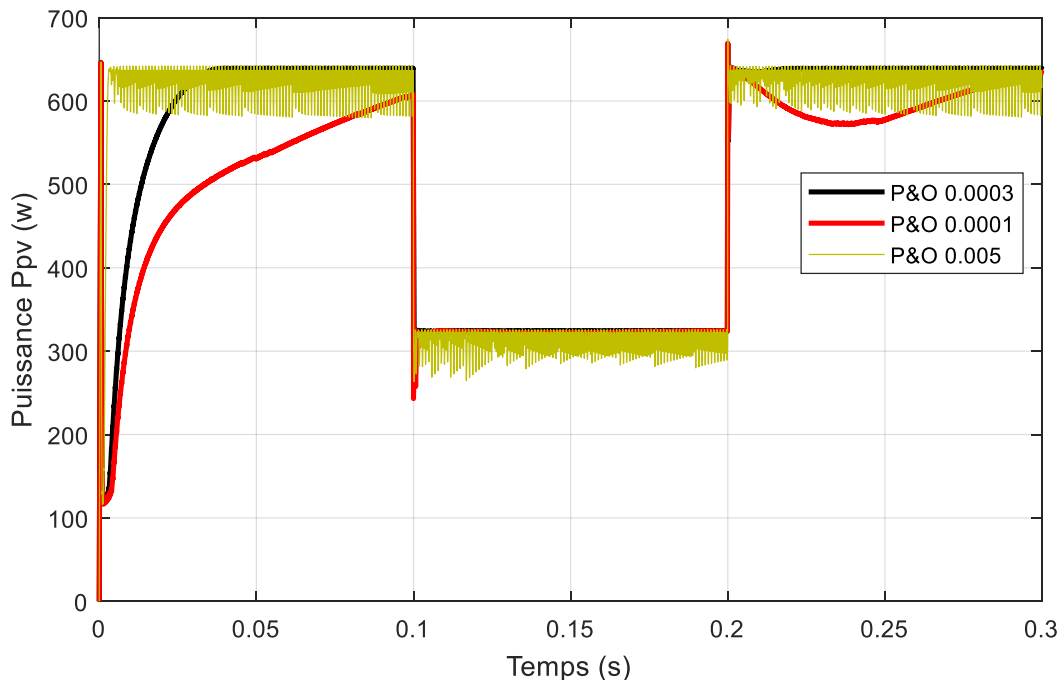
### II.7 Schéma de Simulation de la méthode P&O



Figure( II.7) : Simulation de la modèle P&O

## II.8 Résultats de Simulation P&O

Dans cette partie, une analyse comparative par simulation est effectuée pour montrer la performance de l'algorithme MPPT basé sur P&O. L'étude comparative prend en compte la rapidité du suivi de point de puissance maximale et l'oscillation autour de point de fonctionnement. Pour comparer les performances de l'algorithme P&O dans les deux régimes (dynamique et statique), P&O a été testé avec trois pas différents 0,0001, 0,0003 et 0,005. La température de cellules a été maintenue à une valeur constante de 25°C tandis que l'éclairement subit une diminution de 1000W/m<sup>2</sup> à 500W/m<sup>2</sup> puis une augmentation de 500W/m<sup>2</sup> à 1000W/m<sup>2</sup> dans un intervalle de 0.3s (figure (II.8)). Cette diminution ou augmentation d'éclairement cause bien sûr une diminution ou une augmentation de la puissance. Les figures suivantes représentent les résultats de simulation.



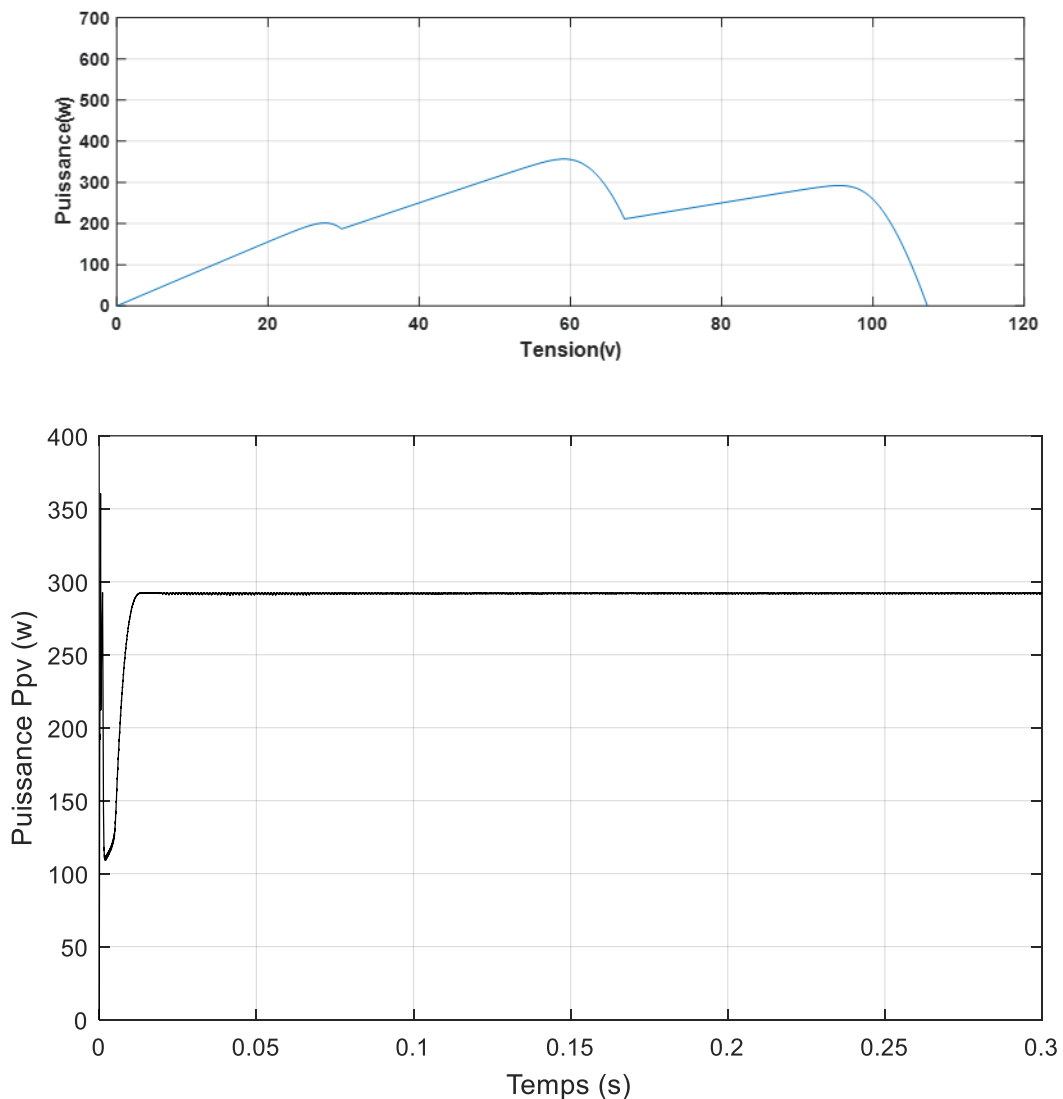
**Figure II.8 :** Variation de la puissance du panneau PV en utilisant la technique P&O avec  $T=25^{\circ}\text{C}$

D'après la figure (II.8), on constate que l'algorithme P&O avec un pas de 0.0003, montre une bonne performance dynamique par rapport au P&O de 0.0001 et 0.005, il peut converger plus rapidement vers l'état stationnaire. Il prend 0.025 s pour atteindre le MPP, tandis que le P&O avec un pas de 0.0001 prend 0.1 s pour atteindre le MPP comme le montre la figure (III.8). La performance dynamique de l'algorithme P&O peut être encore améliorée par un pas plus

grand. Cependant, cela aura un effet négatif sur la performance statique. Un algorithme P&O avec un pas variable peut éliminer la nécessité d'effectuer un compromis compliqué entre la performance en régime permanent et la performance dynamique.

## II.9 Résultats de la méthode P&O d'ombrage partiel

Afin de visualiser la caractéristique de la puissance à la sortie du panneau sous l'effet de l'ombrage, il est nécessaire de réaliser une simulation de système photovoltaïque. Pour cela, le système est testé avec trois éclairements différents sous l'effet d'ombrage ( $1000 \text{ w/m}^2$ ,  $800 \text{ w/m}^2$ , et  $400 \text{ w/m}^2$ )



**Figure II.9** : L'évolution de la puissance  $P_{pv}$  sous l'effet de l'ombrage partiel.

D'après la courbe illustrée dans la figure suivante (Figure II.9), on constate que la puissance produite du champ photovoltaïque varie sous la condition d'ombrage, entraînant une diminution de la puissance délivrée par les trois panneaux. Par conséquent, pour éviter de compromettre la rentabilité d'une installation photovoltaïque, il est crucial de minimiser les pertes de rendement dues aux conditions d'ombrage dès la phase de planification. Une des solutions est d'utiliser une technique de suivi de la puissance maximale, comme la méthode de PSO, que nous aborderons dans le chapitre suivant, pour résoudre le problème du suivi du point de puissance maximale en cas d'ombrage partiel.

### **II. 10 Conclusion**

Dans ce chapitre sa première partie on a étudié un convertisseur de type BOOST et son mode de fonctionnement, et dans la deuxième partie, nous avons étudié les techniques de commandes les plus utilisées (P&O).

El simulation MATLAB/SIMULINK la méthode dans un panneau PV.

Nous allons également comparer et discuter algorithmes utilisés pour suivre la puissance maximale dans des conditions normales et ombrées.



## **Chapitre III**

# **Simulation d'un systémé photovoltaïque dans les conditions d'ombrages partiles**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différents résultats de simulation de l'ensemble des éléments électriques constituant un système photovoltaïque, le modèle contient une représentation détaillée des composants principaux du système, le générateur photovoltaïque PV, le convertisseur DC-DC de type BOOST et la commande MPPT. Afin d'évaluer la poursuite du point de fonctionnement maximal délivré par panneau photovoltaïque par l'application des algorithmes de commande MPPT.

### III.2 Méthode d'optimisation par essaim de particules (P S O)

En 1995, Eberhart et Kennedy ont proposé pour la première fois un algorithme d'optimisation d'essaims de particules (P S O), qui était motivé par le volage d'oiseaux et la nage des poissons ; [9]. Afin de traiter des problèmes dans lesquels la meilleure solution peut être représentée en point ou en surface dans un espace dimensionnel. De nombreuses particules (agents) sont utilisées dans l'algorithme P S O et chaque particule peut partager les informations au sein de son propre processus de recherche. Chaque particule doit respecter deux règles de base : Suivre la particule la plus efficace et déterminer les conditions optimales acquises par la particule elle-même.

En suivant les deux règles ci-dessus chaque particule peut éventuellement progresser vers la solution optimale. Les deux équations suivantes peuvent être utilisées pour caractériser la méthode standard P S O

$$V_i(k+1) = W V_i(k) + c_1 r_1 (p_{best} - X_i(k)) + c_2 r_2 (G_{best} - X_i(k)) \quad (III.1)$$

$$X_i(k+1) = X_i(k) + V_i(k+1) \quad (III.2)$$

**P<sub>best</sub>** : Est la meilleure position individuelle de la particule  $i$  ou  $i = 1, 2, \dots, n$

**G<sub>best</sub>** : La meilleure position de toutes les particules.

**X<sub>i</sub>** : La position de la particule.

**V<sub>i</sub>** : La vitesse de la particule.

**K et i** : représentent le numéro d'itération et le nombre des particules.

**W** : Constante, appelée coefficient d'inertie.

Chapitre III Simulation d'un système photovoltaïque dans les conditions d'ombrages  
partiles

$r_1, r_2$  : sont des valeurs aléatoires réparties dans  $[0,1]$ .

$C_1, C_2$  : Constantes appelées coefficients d'accélération.

Par conséquent, pour applique l'algorithme P S O dans les applications PV. La position des particules ( $X_i(k)$ ) dans les équations(1)et(2) peut être considérée comme le rapport cyclique

( $D_i(k)$ ) du convertisseur PV ,tandis que la vitesse ( $V_i(k)$ ) peut être considérée comme la variation du rapport cyclique ( $\Delta D_i(k)$ ) et la fonction fitness étant la puissance correspondante a' chaque rapport cyclique, en résumé :

$$\begin{cases} X_i=D_i \\ V_i=\Delta D_i \\ P_{best}=D_{besti} \\ G_{best}=D_{bestG} \end{cases} \quad (III.3)$$

$$F(x)=P(D)$$

Par conséquent, la PSO pour MPPT peut être exprimée par les équation (II.21) et (II.22)

$$\Delta D_i(k+1) = W\Delta D_i(k) + c_1 r_1 (p_{best} - D_i(k)) + c_2 r_2 (G_{best} - D_i(k)) \quad (III.4)$$

$$D_i(k+1) = D(k) + \Delta D_i(k+1) \quad (III.5)$$

Où:

**$D_i(k+1)$** : Le rapport cyclique de la particule i a' l'instant (k+1).

**$D_i(k)$**  : Le rapport cyclique de la particule i a l'instant (k).

**$\Delta D_i(k+1)$** : La variation du rapport cyclique de la particule i a l'instant (k+1).

**$\Delta D_i(k)$**  : La variation du rapport cyclique de la particule i a l'instant (k).

**$D_{besti}$** : Le meilleur rapport cyclique de la particule i.

**$D_{bestG}$**  : le meilleur rapport cyclique global (de toute les particules de l'essaim).

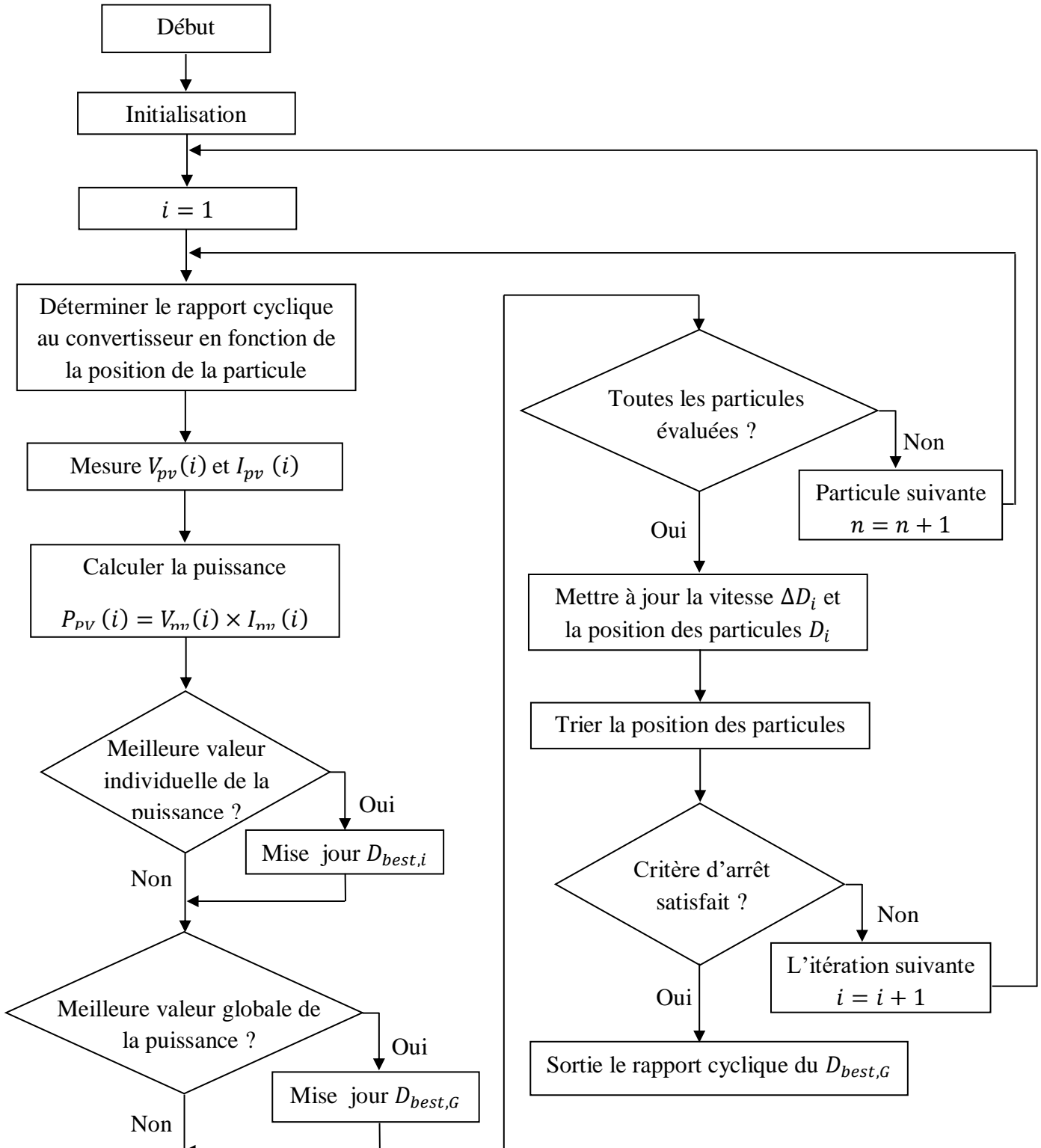
La variation du rapport cyclique  $\Delta D_i(k)$  est influencé par deux variables : La meilleure solution trouvée par particule elle-même ( $D_{besti}$ ),et la meilleure solution dans toute la population ( $D_{bestG}$ ).

Si le rapport cyclique actuel  $D_i(k)$  est loin de ces deux valeurs, il sera mis à jour par une grande vitesse. Quand la condition dans l'équation (7) est satisfaite, ( $D_{besti}$ ) dans l'équation(6) sera mis a' jour ,sino ,(  $D_{besti}$ ) conserve sa valeur actuelle .Ensuite , la puissance de chaque particule sera évaluée voir si la  $D_{bestG}$  doit être mise a jour.

$$D_{besti} = Di(k) \tag{III.6}$$

$$P(Di(k) > p(D_{besti})) \tag{III.7}$$

### III.2.1 L'algorithme PSO



**Figure III.7:** Organigramme de l'algorithme P S O

### Chapitre III Simulation d'un système photovoltaïque dans les conditions d'ombrages partielles

Les étapes de l'algorithme se résument en ce qui suit :

➤ **Etape 1 :** Initialisation de l'algorithme

Les particules (les valeurs initiales de  $D_i$  et  $\Delta D_i$ ) sont générées d'une façon aléatoire sur l'espace de travail (nombre de particules  $n_p$  de l'essaim).

Les constantes d'optimisation ( $w, r_1, r_2, c_1, c_2$ ) sont aussi dans ces étapes, ces constantes définissent le comportement de l'évolution de l'algorithme et nécessitent une bonne connaissance du système.

➤ **Etapes 2 :** Evaluation des particules

Chaque rapport cyclique est appliqué au convertisseur, la tension et le courant correspondants seront récupérés et la puissance de chaque particule est calculée. Cette puissance est plus grande pour un rapport cyclique optimal.

➤ **Etape 3 :** Mettre à jour la position optimale locale globale

Si le rapport cyclique d'une particule donne la meilleure puissance de son parcours alors ce rapport sera enregistré tant que l'optimum local  $D_{best.i}$ , et s'il donne la plus grande puissance que celles obtenues par les autres particules alors il devient l'optimum globale  $D_{best.G}$ . équation (2. 6) et (2. 7).

➤ **Etape 4 :** Mettre jour  $D_i$  et  $\Delta D_i$

Si le critère d'arrêt est satisfait alors le meilleur rapport cyclique  $D_{best.G}$  est sinon une optimisation de  $D_i$  et  $\Delta D_i$  de toutes les particules est appliquée en utilisant les équations (2.4) et (2.5) s'il n'y a pas de changement dans l'éclairement le MPP ne change pas, il est donc inutile de perturber le système d'une manière continue à la recherche d'un nouveau MPP, pour cela un étage est inséré dans le logigramme pour tester le changement dans l'ensoleillement ;[10].

### III.3 Description de la chaîne photovoltaïque

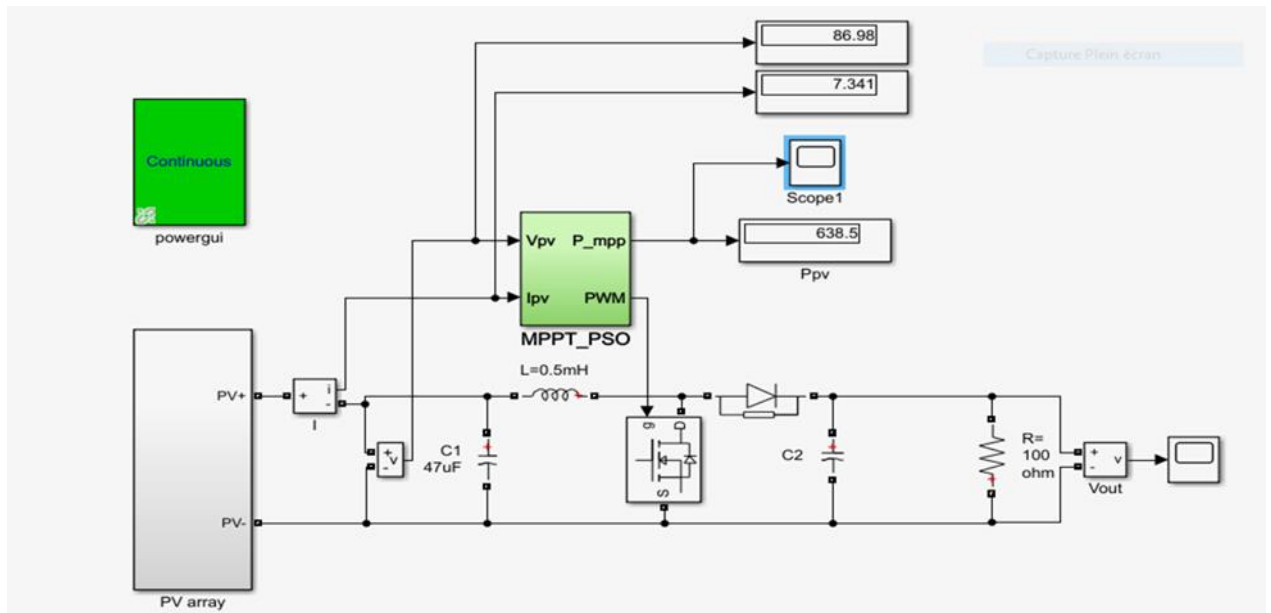
Une chaîne photovoltaïque est constituée de quatre blocs le premier bloc représente la source d'énergie panneau photovoltaïque, le second bloc est un convertisseur DC-DC, le troisième bloc représente la charge et le quatrième bloc représente le système de commande. La chaîne de convertisseur d'un système photovoltaïque est alimentée par un générateur PV à travers un convertisseur DC-DC commandé par une commande MPPT. Ce dernier fait varier le rapport cyclique du convertisseur de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit la puissance disponible à ses bornes.

#### III.3.1 Simulation de la méthode PSO

Le panneau solaire est représenté par un bloc de Simulink, il est construit à partir de trois modules connectés en série, il donne une puissance maximale de 638W, la charge est représentée par une résistance de 100Ω, et un convertisseur BOOST qui simule le fonctionnement de la conversion. Les paramètres du convertisseur BOOST sont :

$$L = 0.5mH, C1 = 47\mu F, C2 = 1000mF, F = 1.5kHz, R1 = 100\Omega$$

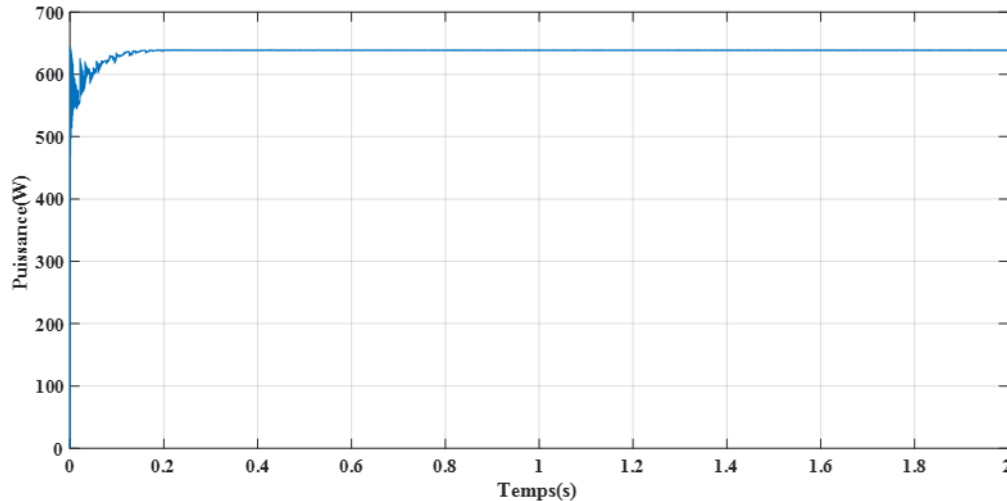
Les résultats de simulation de la méthode PSO sont donnés par la figure suivante :



**Figure III.8 :** Schéma bloc de simulation de système PV avec la technique PSO

### III. 3.2 Résultats de simulation de la méthode PSO

Une simulation d'un système photovoltaïque (PV) équipé d'un convertisseur Boost et d'une charge résistive, utilisant un algorithme MPPT basé sur l'optimisation par essaim de particules (PSO) est effectuée. Le système fonctionne dans des conditions de test standard (STC), avec un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25 °C.



**Figure III.9 :** Variation de la puissance du panneau PV de commande P S O d'un

#### III.3.3 Interprétation des résultats :

**a. Convergence Rapide:** La puissance de sortie augmente rapidement jusqu'à sa valeur maximale en moins de 0,1 seconde. Cela suggère que l'algorithme MPPT-PSO est très efficace pour trouver le point de puissance maximale (MPP) du panneau PV.

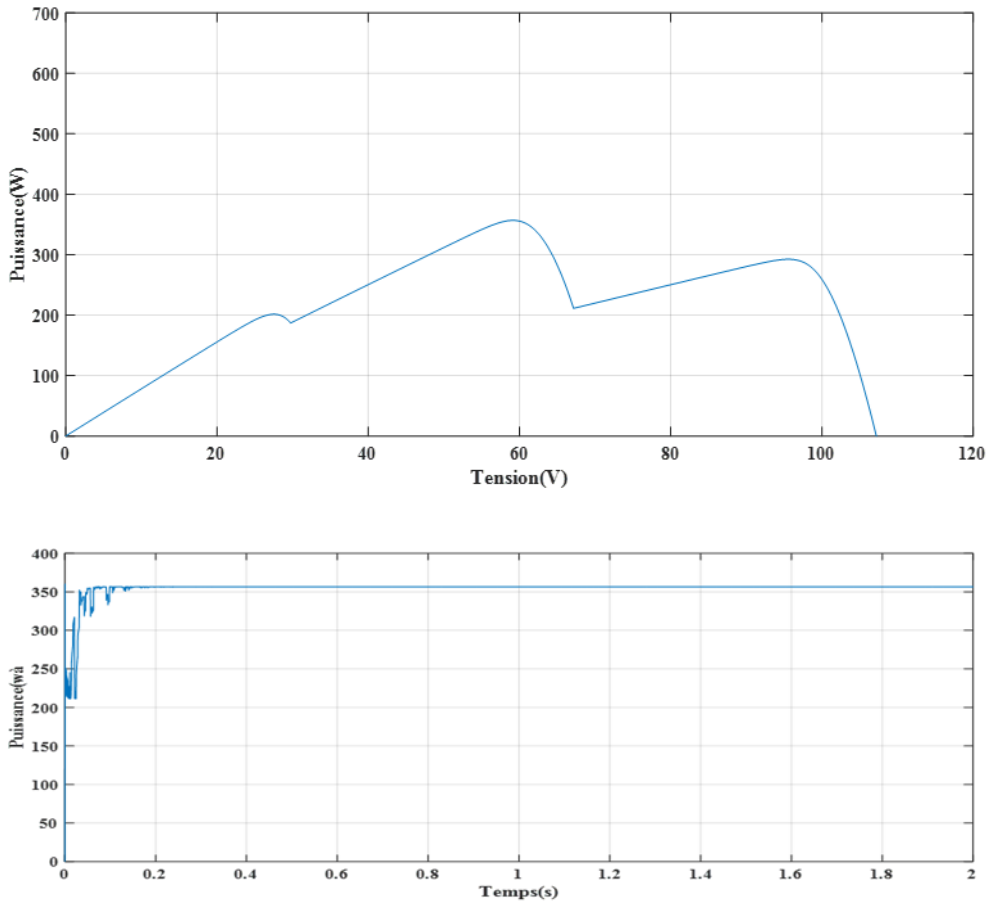
**b. Fonctionnement Stable:** Après avoir atteint le MPP, la puissance de sortie reste stable à environ 638 W. Cela indique que l'algorithme MPPT-PSO suit avec succès le MPP même avec de légers changements dans l'éclairement solaire ou la température.

**c. Absence d'Oscillations:** La puissance de sortie ne présente aucune oscillation significative. C'est un résultat souhaitable car les oscillations peuvent entraîner des pertes de puissance et une réduction de l'efficacité.

Globalement, les résultats montrent que l'algorithme MPPT-PSO mis en œuvre dans le système fonctionne bien, atteignant une convergence rapide vers le MPP et maintenant un fonctionnement stable.

### III.3 Simulation de la méthode PSO d'un ombrage partiel

La puissance fournie par le champ PV avec la méthode PSO sous l'ombrage partiel avec une température de 25°C et un ensoleillement de (1000 ;800 ;400) W/m<sup>2</sup> est représentés sur les figures suivantes :



**Figure III.15 :** Variation de la puissance du panneau PV de commande P S O d'un ombrage des conditions constantes T=25°C

La figure représente la puissance de sortie d'un système photovoltaïque (PV) utilisant un algorithme MPPT basé sur l'optimisation par essai de particules (PSO), sous l'effet d'ombrage.

#### III.3.1 Interprétation des résultats :

La figure montre que l'algorithme MPPT PSO est capable de trouver et de suivre le MPP même en présence d'ombrage, mais la puissance de sortie est réduite par rapport à un fonctionnement sans ombre. Les fluctuations de puissance pendant la phase de convergence indiquent que l'algorithme s'adapte aux changements induits par l'ombrage.

## **III.4 Comparaisons les deux méthode (P&O et P S O)**

### **III.4.1 Méthode P&O**

#### **Avantages :**

- Simplicité : La méthode P&O est relativement simple à mettre en œuvre, ce qui en fait une option attrayante pour de nombreux ingénieurs.
- Faible coût : Cette méthode ne nécessite pas de matériel ou de logiciel complexe, ce qui la rend économique à utiliser.
- Adaptabilité : La méthode P&O peut être appliquée à une variété de systèmes, ce qui la rend polyvalente dans différents contextes.
- Rapidité : Elle peut générer rapidement des résultats préliminaires, ce qui permet de prendre des décisions rapides en phase de conception ou de test.

#### **Inconvénients :**

- Sensibilité aux fluctuations : La méthode P&O peut être sensible aux fluctuations rapides des conditions environnementales ou du système, ce qui peut entraîner une performance instable.
- Convergence lente : Dans certains cas, la méthode P&O peut avoir une convergence lente vers le point de fonctionnement optimal, ce qui peut prolonger le temps nécessaire pour atteindre une solution satisfaisante.
- Risque de sur-réaction : En raison de sa conception réactive, la méthode P&O peut réagir de manière excessive aux changements soudains, ce qui peut entraîner des oscillations autour du point de fonctionnement optimal.
- Manque de précision : Dans certaines situations, la méthode P&O peut fournir des estimations du point de fonctionnement qui ne sont pas aussi précises que celles obtenues avec d'autres méthodes plus sophistiquées.

### **III.4.2 Méthode PSO**

#### **Avantages :**

- L'algorithme PSO est un algorithme sans dérivé
- Il est facile à mettre en œuvre, de sorte qu'il peut être appliqué à la fois dans la recherche scientifique et les problèmes d'ingénierie
- Il a un nombre limité de paramètres et l'impact des paramètres sur les solutions
- Il existe certaines techniques qui assurent la convergence et la valeur optimale du problème se calcule facilement en peu de temps.
- PSO dépend moins d'un ensemble de points initiaux que d'autres techniques d'optimisation

- Il est conceptuellement très simple

**Inconvénients :**

- L'essai peut prématurément converger.
- Les approches stochastiques ont un problème de dépendance tout changement d'un de leurs paramètres peut avoir un effet sur le fonctionnement de l'algorithme tout comme sur la solution obtenue

### **III.5 Conclusion**

Dans le chapitre troisième, nous utiliserons MATLAB/SUMILINK pour concevoir notre circuit dans les parties suivantes. Nous présenterons modèle pour un système photovoltaïque autonome simple.

Nous allons également comparer et discuter d'algorithme (P S O) utilisés pour suivre la puissance maximale dans des conditions normales et ombrées

Nous avons effectué dans ce chapitre la simulation de tous les équipements représentant l'ensemble du système photovoltaïque, le générateur photovoltaïque, le hacheur survaleur BOOST, la commande MMPT.

Dans le but d'étudier le comportement du système photovoltaïque nier rapport aux variations Climatique, nous avons simulé au début le système sous les conditions d'éclairement uniforme en utilisons deux commande P&O et P S O, et puis nous avons conclu que cette dernière a prouvé qu'elle a des meilleures performances temps de réponse rapide.

Aussi nous avons parlé du problème, tout aussi réaliste, de l'ombrage partiel du GPV et nous avons proposé un modèle qui permet la simulation d'un tel phénomène. Ensuite, afin de démontrer que les algorithmes classiques étaient incapables de suivre le point maximum, nous avons comparé la commande P S O avec commande P & O et conclu que P&O est coincer la première LMPP par contre la commande P S O montre une grande capacité de poursuivre le GMMP avec une très faible oscillation à l'était permanent.

## **Conclusions Générales et perspectives**

Pour concevoir un système PV autonome parfait, il est nécessaire de maintenir la puissance PV à son maximum. Les travaux présentés portaient sur l'analyse, la conception et la simulation d'un système photovoltaïque autonome.

L'objectif de notre travail était d'extraire la puissance maximale en utilisant différents algorithmes, tels que les méthodes classique P&O et la nouvelle méthode P S O sous l'ombrage partiel puis en comparant les résultats pour montre l'efficacité de l'algorithme P S O lors de l'extraction du GMPP. Même s'il y a des changements dans l'éclairement. Ce travail est testé avec le logiciel MATLAB/ SIMULINK.

Les techniques MPPTs ont été testée sous STC, provoques par des augmentations lents et rapides d'ensoleillement ou par diminution de la température des cellules.

La technique moderne P S O a été testée sous différent modèle d'ombrage particule.

Lorsque la technique MPPT est utilisé, il n'est pas nécessaire de saisir le rapport cyclique, l'algorithme itéré et décide le rapport cyclique par lui-même.

Mais si MPPT n'aurait pas été utilisé, l'utilisateur est obligé d'entrer la valeur du rapport cyclique dans le système. En cas de modification de l'éclairement solaire, le point de puissance maximale change et rapport cyclique requis pour le fonctionnement du modèle change également. Mais si le rapport cyclique utilisé constant, le point de puissance maximale ne peut pas être suivi et le système est donc moins efficace.

Les objectifs du projet ont été atteint ainsi que la compréhension globale des systèmes PV il est également démontré que l'algorithme P S O présente de nombreux avantages, tels que la stabilité (aucune oscillation) autour du MPP il montre une grande capacité à distinguer les pics local et globale, ce qui signifie qu'il suivre le véritable MPP sous un ombrage partiel.

En perspective ce travail sera suivre ultérieurement par l'élaboration d'algorithme P S O pour la recherche globale du MPP dans le cas de l'ombrage partiel

### **References Bibliographiques**

- [1] M.A.G.de Brtio, L. Galotto, L.P. Sampaio, G. de A zevedo Melo and C.A.Canessin ,  
“Evaluation of the Main MPPT Techniques for photovoltaic Applications” , IEEE  
Transactions on Industrial Electronics, vol. 60,no,3pp.1156-1167,2013.
- [2] DwivediLaxmi,Vikram Singh Arjiun pareek,et Prabhat Yadav.”MATLAB/SIMULINK  
based study of series –parallel connected photovoltaic system under partial shaded condition  
“. Vol.vol-3, 2016
- [3] G.J.Yu,Y.S.Jung ,J.Y.Choi,J-H.Song, and G.S.Kim, ”Anovel two-mode MPPTcontrol  
algorithm based on comparative study of existing “,in Conference Record of the Twenty-  
ninth IEEE,Photovoltaic Specialists conference,2002,pp.1531-1534
- [4] F.Liu,S.Duan, F.Liu,B.Liuand Y.Kang ,”A Variable step Size INC MPPT Method for  
PVSytems” ,IEEE Transactions on Industrial Electronics ,vol.55,no.7,pp.2622 2628,2008.
- [5] Talha, Abdelaziz et K Ameer, Modélisation Et Commande D'un générateur  
photovoltaïque Muni Dun Régulateur MPPT,2009.
- [6] Hussein, Ahmed, A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules  
Vol.25.2017.
- [7] Z. idir, A, adar Etude et simulation du comportement d'un générateur photovoltaïque en  
présence de problème de désadaptation “mémoire de master académique en automatique  
université A MIRA Bejia,2016
- [8] Ould Cherchali, A,Morsli ,M.S .Boucherit , L,Barane et Atlemcani, du point de  
puissance maximale d'un système photovoltaïque .Laboratoire de Recherche en  
Electrotechnique et Automatique .Université de Médéa Algérie.
- [9] Liu ,Y,H ;Huang ,S,C;Huang,J.W;Liang ,W,C,A particle swarm optimization –based  
maximum power point tracking algorithm for v systems operating under partially  
conditions .LEEE Trans.Energy convers .2012,27,1027-1035
- [10] Hadji, « Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie  
photovoltaïque » thèse de doctorat en électronique université Farhat Abbas Stif,2018

## ملخص

في هذه الأطروحة سنقوم بنفيذ المحاكاة والتحسين وانشاء النظام يعمل بالطاقة الكهروضوئية بمروحية معززة تتركز هذه الدراسة على تنفيذ خوارزميات مختلفة لتتبع اقصى نقطة طاقة مثل خوارزمية الاضطراب والمراقبة ( P&O ) وهكذا بد انا بمحاكاة و نمودجة الخلية الكهروضوئية و محول التعزيز وفق نموذج رياضي ثم دخلنا في P&O التفاصيل في الذاكرة ثم تقديم خوارزميتين لمتابعة في جميع الظروف الجوية ( حتى في ظروف تظليل ) .  
( P S O ) أظهرت نتائج محاكاة ان خوارزمية ( اكثر كفاءة و قوة في تتبع الاستطاعة LMPP و لكن تقنية ) نتائج جيدة في تتبع الاستطاعة القصوى GMPPالقصوى

## Résumé

Dans cette thèse nous réaliserons la simulation, l'optimisation et la construction d'un système PV avec un hacheur booster. Cette étude se concentre sur la mise en œuvre de différents algorithmes pour suivre le point de puissance maximale, tels que l'algorithme d'observation et de perturbation (P&O). Ainsi, nous avons commencé par simuler et modéliser la cellule photovoltaïque et le convertisseur élévateur selon un modèle mathématique. Ensuite, nous sommes entrés dans les détails. En mémoire, deux algorithmes MPPT sont introduits pour suivre le MPP dans toutes les conditions météorologiques (même dans des conditions d'ombrage des grains). Les résultats de la simulation ont montré que la technique (P&O) donne de bons résultats dans le suivi de la puissance LMPP, mais que la technique (PSO) est plus efficace et plus puissante, en particulier dans le suivi de la puissance maximale (GMPP)

## Abstract

In this thesis, we will carry out the simulation, optimization and construction of a PV system with a booster chopper. This study focuses on the implementation of different algorithms to track the maximum power point, such as the Observation and Perturbation (P&O) algorithm. Thus, we started by simulating and modeling the photovoltaic cell and the boost converter according to a mathematical model. Then we got into the details. In memory, two MPPT algorithms are introduced to track the MPP in all weather conditions (even in grain shading conditions). The simulation results showed that the (P&O) technique performs well in tracking LMPP power, but the (PSO) technique is more efficient and powerful, especially in tracking maximum power (GMPP).