

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique  
Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



**Faculté des Sciences et de la Technologie**

Département de Technologie

Mémoire Présenté

Pour l'Obtention de Diplôme

Master

En ÉLECTROTECHNIQUE

Spécialité Électrotechnique Industrielle

Thème

**Commande MPPT pour les systèmes  
photovoltaïques en utilisant PSO**

*présenté par*

**Mr. HAFFAF Ahmed  
Mr. MERZOUGUI Hakim**

*Encadré par*

**Mr. Ben Youcef Abou Sofiane**

**Année Universitaire 2019/2020**

### *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail  
A mes très chers parents  
A toute ma famille haffaf et mahroug  
A mes très chères frères mostapha  
hemza, amine, hakim et youcef  
A tous promo BAC 2015  
A Toute la promotion de 2 ème année master  
Electrotechnique industrielle 2019-2020.  
A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science  
Et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien  
et la prospérité de l'humanité.*

*« Haffaf Ahmed »*

### *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail  
A mes très chers parents  
A toute ma famille Merzougui et ghernougue  
A mes très chères frères Asnouni  
Youcef, ahmed et mohamed  
A tous promo BAC 2015  
A Toute la promotion de 2 ème année master  
Electrotechnique industrielle 2019-2020.  
A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science  
Et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien  
et la prospérité de l'humanité.*

*« Merzougui Hakim »*

## *Remerciements*

*Tout d'abord nous remercions le bon dieu puissant pour la bonne santé, la volonté et la patience qu'il nous a donnée tout au long de notre étude, et nous voudrions en premier lieu remercier nos parents.*

*Nous remercions le docteur **Ben Youcef Abou Sofiane**, notre promoteur pour ses conseils et suggestions avisés qui nous ont aidés à mener à bien ce travail et d'avoir apporté à ce mémoire ses remarques et conseils. Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel du département de L'électrotechnique pour les facilités qu'ils m'ont accordé pour parfaire ce travail. Enfin, on remercie toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, on les Remercie tous.*

## Abstract

The present work consists in a simulation study of a photovoltaic generator, this study is based on the optimization of its output power when the photovoltaic field is subjected to partial shading. For this, the PSO particle swarm optimization algorithm "Particle Swarm Optimization" has been used to determine the optimum duty cycle applying on the boost type converter in order to improve the generator's performance and efficiency of the power point of view.

The reliability and feasibility of the strategy used have been verified and approved using cosimulation which combines the two simulation platforms Simulink / MATLAB and Psim.

The simulation results showed the good performance of the strategy used.

**Key words:** PV generator, power optimization, MPPT, PSO algorithm

## Résumé

Le présent travail consiste en une étude de simulation d'un générateur photovoltaïque, cette étude est basée sur l'optimisation de sa puissance de sortie lorsque le champ photovoltaïque est soumis à un ombrage partiel. Pour cela, l'algorithme d'optimisation par essaim de particules PSO « Particle Swarm Optimization » a été utilisé pour déterminer le rapport cyclique optimale à appliquer sur le convertisseur de type boost afin d'améliorer les performances et l'efficacité du générateur du point de vue puissance.

La fiabilité et la faisabilité de la stratégie utilisée ont été vérifiées et approuvées en utilisant la cosimulation qui combine les deux plates-formes de simulation Simulink/MATLAB et Psim.

Les résultats de simulation ont montré les bonnes performances de la stratégie utilisée .

**Mots clés:** :générateur PV reconfigurable, l'optimisation topologique, l'algorithme PSO.

## ملخص

يتكون هذا العمل من دراسة محاكاة لمولد كهرو ضوئي , و تحسين الطاقة الناتجة عندما يتعرض لتظليل جزئي, لهذا الغرض تم استخدام خوارزمية تحسين سرب جسيمات لتحديد نقطة العمل المثلى التي سيتم تطبيقها على محول من أجل تحسين أداء وكفاءة مولد من وجهة نظر الاستطاعة.

تم التحقق من موثوقية وجدوى الاستراتيجية المستخدمة والموافقة عليها باستخدام محاكاة التي تجمع بين منصتي المحاكاة: Simulink/MATLAB و Psim

اظهرت نتائج المحاكاة الاداء الجيد للإستراتيجية المستخدمة.

**الكلمات المفتاحية:** مولد كهرو ضوئي , خوارزمية تحسين سرب جسيمات ,نقطة الطاقة القصوى , تحسين الطاقة.

# Contents

|   |            |
|---|------------|
| <b>Dedicace</b>                               | <b>i</b>   |
| <b>Dedicace</b>                               | <b>i</b>   |
| <b>Remerciements</b>                          | <b>ii</b>  |
| <b>Résumé</b>                                 | <b>iii</b> |
| <b>Table des matières</b>                     | <b>iv</b>  |
| <b>Liste des figures</b>                      | <b>vi</b>  |
| <b>Liste des tableaux</b>                     | <b>ix</b>  |
| <b>Liste d'Abréviations</b>                   | <b>xi</b>  |
| <b>Introduction</b>                           | <b>1</b>   |
| <b>1 L'Énergie Solaire Photovoltaïques</b>    | <b>3</b>   |
| 1.1 Introduction . . . . .                    | 3          |
| 1.2 Rayonnement Solaire . . . . .             | 3          |
| 1.3 Spectre du rayonnement . . . . .          | 5          |
| 1.3.1 Mesure du rayonnement solaire . . . . . | 5          |
| 1.3.2 Les types de rayonnement . . . . .      | 6          |
| 1.4 L'énergie solaire . . . . .               | 7          |
| 1.4.1 l'énergie passive . . . . .             | 7          |
| 1.4.2 l'énergie solaire thermique . . . . .   | 7          |
| 1.4.3 l'énergie thermodynamique . . . . .     | 8          |
| 1.4.4 l'énergie photovoltaïque . . . . .      | 8          |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 1.5      | Energie solaire photovoltaïque . . . . .  | 8         |
| 1.5.1    | Historique du photovoltaïque . . . . .  | 8         |
| 1.5.2    | Définition . . . . .  | 9         |
| 1.5.3    | L'effet photovoltaïque . . . . .  | 9         |
| 1.5.4    | Principe de la conversion d'énergie photovoltaïque . . . . .                                    | 9         |
| 1.5.5    | Différents types des cellules solaires . . . . .  | 10        |
| 1.6      | Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque . . . . .                        | 14        |
| 1.6.1    | Les avantages . . . . .   | 14        |
| 1.6.2    | Les inconvénients . . . . .   | 15        |
| 1.7      | Le Potentiel Solaire en Algérie . . . . .   | 15        |
| 1.8      | Potentiel énergétique en Algérie . . . . .  | 16        |
| 1.9      | Le future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie . . . . .                                 | 18        |
| 1.10     | Conclusion . . . . .  | 18        |
| <b>2</b> | <b>Modélisation d'un générateur photovoltaïque</b>  | <b>19</b> |
| 2.1      | Introduction . . . . .  | 19        |
| 2.2      | Générateur Photovoltaïque GPV . . . . .   | 19        |
| 2.3      | Panneau photovoltaïque . . . . .  | 20        |
| 2.4      | Module photovoltaïque . . . . .   | 21        |
| 2.4.1    | La constitution d'un module photovoltaïque . . . . .  | 23        |
| 2.4.2    | Association en série et en parallèle d'un module PV . . . . .                                   | 23        |
| 2.5      | Caractéristique d'un module photovoltaïque . . . . .  | 25        |
| 2.5.1    | Courant de court-circuit . . . . .  | 25        |
| 2.5.2    | Tension de circuit ouvert (Voc) . . . . .   | 26        |
| 2.5.3    | La puissance crête . . . . .  | 26        |
| 2.5.4    | Rendement . . . . .   | 26        |
| 2.5.5    | Facteur de forme (FF) . . . . .   | 26        |
| 2.6      | Modélisation d'une cellule photovoltaïque . . . . .   | 27        |
| 2.6.1    | Model ideal d'une cellule photovoltaïque . . . . .  | 27        |
| 2.6.2    | Model réel d'une cellule photovoltaïque . . . . .   | 28        |
| 2.6.3    | Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I = f(V)$ et $P = f(V)$ . . . . . | 29        |
| 2.7      | Point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque . . . . .                                | 31        |
| 2.8      | Effet de l'ombrage (Shading) . . . . .  | 31        |
| 2.9      | Système de protection . . . . .   | 32        |
| 2.10     | Conclusion . . . . .  | 33        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>3</b> | <b>Poursuite du point de puissance maximale (MPPT)</b>   | <b>34</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .   | 34        |
| 3.2      | Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) . . . . .  | 35        |
| 3.2.1    | Convertisseur buck . . . . .   | 36        |
| 3.2.2    | Convertisseur BOOST . . . . .  | 38        |
| 3.2.3    | Convertisseur Buck-Boost . . . . .   | 40        |
| 3.3      | Principe De La Commande MPPT . . . . .   | 42        |
| 3.4      | Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée . . . . .                            | 43        |
| 3.4.1    | Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée<br>du convertisseur statique . . . . .  | 43        |
| 3.4.2    | Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie<br>du convertisseur statique . . . . . | 44        |
| 3.5      | Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche . . . . .                               | 44        |
| 3.5.1    | MPPT Direct . . . . .  | 44        |
| 3.5.2    | MPPT Indirect . . . . .  | 45        |
| 3.6      | Les Algorithmes MPPT les plus fréquents . . . . .  | 45        |
| 3.6.1    | les méthodes classiques . . . . .  | 45        |
| 3.6.2    | Commande a incrémentation de la conductance (Inc cond) . . . . .                                     | 49        |
| 3.6.3    | les méthodes Modernes (méthodes de recherche globale) . . . . .                                      | 51        |
| 3.6.4    | Autres Méthodes de recherche globale . . . . .   | 54        |
| 3.7      | les Critères d'évaluation d'une commande MPPT . . . . .  | 55        |
| 3.8      | Conclusion . . . . .   | 56        |
| <b>4</b> | <b>L'algorithme PSO,Simulation et Discussion les résultats</b>                                       | <b>57</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .   | 57        |
| 4.2      | Définition de PSO . . . . .  | 57        |
| 4.3      | Applications des algorithmes PSO Commande MPPT . . . . .   | 58        |
| 4.4      | Résultats de simulation . . . . .  | 61        |
| 4.4.1    | Eclairage uniforme de $1000W/m^2$ . . . . .  | 62        |
| 4.4.2    | Dans des conditions d'ombrage . . . . .  | 64        |
| 4.5      | Conclusion . . . . .   | 69        |
| 4.6      | Conclusion générale . . . . .  | 70        |
|          | <b>Bibliography</b>  | <b>75</b> |

# List de Figures

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Courbes d'ensoleillement typique par heure (latitude 45) . . . . .  | 4  |
| 1.2  | Courbes d'ensoleillement typique par mois . . . . .   | 4  |
| 1.3  | Distribution spectrale du rayonnement solaire. [8] . . . . .  | 5  |
| 1.4  | Composante du rayonnement global sur un plan horizontal . . . . .   | 7  |
| 1.5  | schématique d'une cellule solaire . . . . .   | 10 |
| 1.6  | photos d'une cellule mono cristalline . . . . .   | 11 |
| 1.7  | photo de cellule poly cristallin . . . . .  | 12 |
| 1.8  | Photo d'une cellule amorphe . . . . .   | 12 |
| 1.9  | Photo d'une Cellules à couches minces . . . . .   | 13 |
| 1.10 | photo d'une Cellules organiques . . . . .   | 14 |
| 1.11 | Moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie . . . . .  | 16 |
| 1.12 | Programme d'électrification de 20 villages du sud . . . . .   | 17 |
| 1.13 | Puissance photovoltaïque installée dans le grand sud . . . . .  | 17 |
| 2.1  | les Composants d'un GPV . . . . .   | 20 |
| 2.2  | Panneau photovoltaïque . . . . .  | 20 |
| 2.3  | Boite de dérivation . . . . .   | 21 |
| 2.4  | Module photovoltaïque . . . . .   | 22 |
| 2.5  | Câblage des cellules dans un module . . . . .   | 22 |
| 2.6  | Encapsulation des cellules. . . . .   | 23 |
| 2.7  | Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série . . . . .                              | 24 |
| 2.8  | Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle . . . . .                          | 25 |
| 2.9  | Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque . . . . .  | 27 |
| 2.10 | Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque . . . . .   | 28 |
| 2.11 | Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique $I - VT = 25^{\circ}C$ . . . . .                         | 30 |
| 2.12 | Effet de la température sur la caractéristique $I - V$ à un ensoleillement constant $1000W/m^2$ . . . . . | 30 |



|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.13 | Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge . . . . .  | 31 |
| 2.14 | L'effet du Shading sur la caractéristique P-V d'un module photovoltaïque .  | 32 |
| 2.15 | Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour . . . . .  | 33 |
| 3.1  | convertisseurs DC-DC . . . . .  | 35 |
| 3.2  | différents types de convertisseurs DC-DC . . . . .  | 36 |
| 3.3  | Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck. . . . .  | 37 |
| 3.4  | Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost . . . . .  | 38 |
| 3.5  | Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé . . . . .  | 38 |
| 3.6  | Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert . . . . .   | 39 |
| 3.7  | Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost . . .   | 41 |
| 3.8  | Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur, une commande MPPT et une charge. . . | 42 |
| 3.9  | Principe de la commande MPPT . . . . .  | 43 |
| 3.10 | Schéma de converge vers le PPM par P&O . . . . .  | 46 |
| 3.11 | Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O . . . . .   | 47 |
| 3.12 | Divergence de la méthode P&O . . . . .  | 48 |
| 3.13 | Trajectoire par Incrémentation de Conductance . . . . .   | 50 |
| 3.14 | Organigramme de la méthode Incrément de Conductance. . . . .  | 50 |
| 3.15 | Exemple d'un réseau de neurones . . . . .   | 51 |
| 3.16 | Bloc ANN diagramme avec deux entrées neurones . . . . .   | 52 |
| 3.17 | Bloc ANN diagramme avec trois entrées . . . . .   | 52 |
| 3.18 | Principe de la commande à logique flou . . . . .  | 53 |
| 3.19 | structure de base de la commande floue . . . . .  | 53 |
| 4.1  | le mouvement des Particules dans PSO . . . . .  | 58 |
| 4.2  | Schéma de principe du système proposé. . . . .  | 59 |
| 4.3  | Organigramme de l'algorithme proposé . . . . .  | 60 |
| 4.4  | La partie électronique de la simulation à l'aide du logiciel Psim . . . . .   | 61 |
| 4.5  | La partie commande de la simulation dans l'environnement SimuLink/MatLab  | 62 |
| 4.6  | Courbe P-V avec éclairement uniforme de $1000W/m^2$ . . . . .   | 62 |
| 4.7  | Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme PSO       | 63 |
| 4.8  | Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme P&O       | 63 |
| 4.9  | Variation du rapport cyclique calculé par l'algorithme de commande MPPT   | 64 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.10 | Courbe P-V avec des conditions d'ombrage (cas de deux maximums, le max global se trouve avant le max local) . . . . .   | 65 |
| 4.11 | Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme PSO (sous l'ombrage) . . . . .                    | 65 |
| 4.12 | Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme P&O (sous l'ombrage) . . . . .                    | 66 |
| 4.13 | Courbe P-V avec des conditions d'ombrage (cas de deux maximums, le max global se trouve après le max local) . . . . .   | 66 |
| 4.14 | Variations de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme PSO (sous l'ombrage) . . . . .                   | 67 |
| 4.15 | Variations de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme P&O (sous l'ombrage) . . . . .                   | 67 |
| 4.16 | Courbe P-V avec des conditions d'ombrage (cas de trois maximums) . . . . .  | 68 |
| 4.17 | Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme PSO (sous l'ombrage, cas de 3 maximums) . . . . . | 68 |
| 4.18 | Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme P&O (sous l'ombrage, cas de 3 maximums) . . . . . | 69 |

# List de Tableaux

- 1.1 Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie . . . . . 15
- 3.1 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue. . . . . 54

# Liste d'Abréviations

|                          |   |
|--------------------------|---|
| <i>PV</i>                | Photovoltaïque.   |
| <i>MPP</i>               | Maximum Power Point   |
| <i>MPPT</i>              | Maximum Power Point Tracking.   |
| <i>DC</i>                | Courant Continu (Direct Curent).  |
| <i>AC</i>                | Courant Alternatif (Alternative Curent).  |
| <i>R<sub>S</sub></i>     | Résistance série [ $\omega$ ].  |
| <i>R<sub>P</sub></i>     | Résistance parallèle [ $\omega$ ].  |
| <i>EV A</i>              | Ethylène Acétate de Vinyle.   |
| <i>K<sub>i</sub></i>     | Coefficient de variation du courant ( $I_{cc}$ ) en fonction de la température ( $A/^{\circ}K$ ). |
| <i>E</i>                 | éclairage reçu( $W/m^2$ ).  |
| <i>S</i>                 | Surface de la cellule( $m^2$ ).   |
| <i>K</i>                 | constante de Boltzmann( $1.38.10^{-23}Joules/Kelvin$ ) .  |
| <i>T</i>                 | température de la jonction $p - n$ des cellules .   |
| <i>q</i>                 | charge d'un électron ( $1,602.10^{-19}C$ ) .  |
| <i>E<sub>0</sub></i>     | éclairage de référence ( $W/m^2$ ).   |
| <i>FF</i>                | Facteur de forme.   |
| <i>I<sub>ph</sub></i>    | photo- courant.   |
| <i>I<sub>d</sub></i>     | courant traversant la diode.  |
| <i>I<sub>sd</sub></i>    | courant de saturation de diode.   |
| <i>V<sub>e</sub></i>     | tension à la borne de la diode.   |
| <i>n</i>                 | le facteur d'idéalité de la diode .   |
| <i>T</i>                 | température absolue (en kelvin).  |
| <i>V<sub>t</sub></i>     | la tension thermique.   |
| <i>K</i>                 | coefficient de Boltzman ( $1.38.10^{-23}J/k$ ).   |
| <i>I<sub>P</sub></i>     | le courant qui traverse la résistance parallèle $R_p(A)$ .  |
| <i>G</i>                 | l'irradiation solaire.  |
| <i>T<sub>ref</sub></i>   | la température de référence $298k(25^{\circ}C)$ .   |
| <i>I<sub>s,ref</sub></i> | est la tension de circuit ouvert de la cellule solaire à la condition de référence.               |
| <i>E<sub>g</sub></i>     | énergie de rupture de bande du <i>semi - conducteur</i> = $1,1eV$ .                               |
| <i>V<sub>i</sub></i>     | tension d'entré.  |
| <i>V<sub>s</sub></i>     | tension de sortie.  |
| <i>CS</i>                | convertisseur statique  |
| $\alpha$                 | le rapport cyclique.  |
| <i>I<sub>s</sub></i>     | courant moyen dans la charge.   |
| <i>I<sub>l</sub></i>     | Le courant moyen traversant l'inductance.   |
| <i>V<sub>k</sub></i>     | Tension de l'interrupteur .   |
| <i>I<sub>k</sub></i>     | Le courant de l'interrupteur .  |
| <i>I<sub>e</sub></i>     | Le courant diode .  |
| <i>T<sub>d</sub></i>     | Période de découpage.   |
| <i>V<sub>oc</sub></i>    | tension en circuit ouvert.  |
| <i>I<sub>cc</sub></i>    | courant en court-circuit .  |

## Introduction Générale

La diminution d'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque, etc...) reviennent au premier plan de l'actualité et leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue coût et performance de production. Cependant, leur système de conversion de l'énergie en électricité souffre souvent d'un manque d'optimisation qui en fait encore des systèmes trop chers, et présentant des déficiences importantes en rendement et en fiabilité. Pour cela, bien qu'il existe de plus en plus de travaux de recherches prouvant la viabilité de sources comme, par exemple, l'énergie photovoltaïque (PV), beaucoup de réticentes existent encore pour installer ces systèmes à grande échelle, autant en production de masse que chez des particuliers.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT : Maximum Power Point Tracking).

Le but de ce travail est faire une brève étude sur les systèmes PV et le développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de puissance maximale pour une bonne exploitation quelque soient les conditions météorologiques.

La rédaction de notre mémoire se compose de quatre chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté des notions générales sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire, l'énergie photovoltaïque bien sûr et le principe d'une cellule photovoltaïque, les types des cellules solaires, les avantages et les inconvénients de cette énergie renouvelable et quelque information sur le potentiel algérien et le future d'énergie photovoltaïque dans Algérie.

- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de générateur photovoltaïque, La constitution d'un module photovoltaïque et Association en série et en parallèle d'une module PV. Par la suite, on présente les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque et modélisation d'un module BLD SOLAR dans un environnement MatLab et dans différents degrés de température et d'éclairements, et aussi l'effet des diodes by-pass.
- Le troisième chapitre présentera les principaux convertisseurs statistique tel que le Buck, le Boost et le Buck-Boost, qui seront contrôlés par la commande MPPT, le principe de la recherche du point de puissance maximal, les classifications de la commande MPPT et le principe de fonctionnement de quelques-unes de ces méthodes.
- Le quatrième chapitre, quant à lui détaillera la simulation du système photovoltaïque et l'algorithme MPPT basé sur la méthode d'optimisation par essaims particulaires (PSO : Particle Swarm Optimization) dans un environnement de co-simulation (MatLab-Simulink / Psim) tout en donnant les principaux résultats. Cette co-simulation entre le MatLab et le Psim est utilisé pour accélérer le temps des simulations.

Une conclusion générale dressera le bilan de cette étude.

# L'Énergie Solaire Photovoltaïques

## 1.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsque'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol.

On peut ainsi compter sur  $10000w/m^2$  crête dans les zones tempérées et jusqu'à  $14000W/m^2$  lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [1] [2] .

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le rayonnement solaire et les types d'énergie solaire, l'effet photovoltaïque, principe de la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi que Le Potentiel Solaire en Algérie et Le future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.

## 1.2 Rayonnement Solaire

Le rayonnement solaire transmis dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions.

Lorsque'elle a voyagé 150 millions de kilomètres du Soleil vers la Terre, sa densité ex-

traterrestre totale diminue à  $1367W/m^2$ . [3]

La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon plusieurs facteurs qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [3] [4].

En résumé, on peut dire que l'intensité du rayonnement solaire est extrêmement variable suivant [5]:

- la localisation géographique du site (spécialement par rapport à sa latitude).
- la saison.
- l'heure.
- les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...).
- l'altitude du lieu.

Il est possible de représenter l'allure des courbes correspondant aux variations de l'ensoleillement selon différents paramètres les figures 1.1 et 1.2.

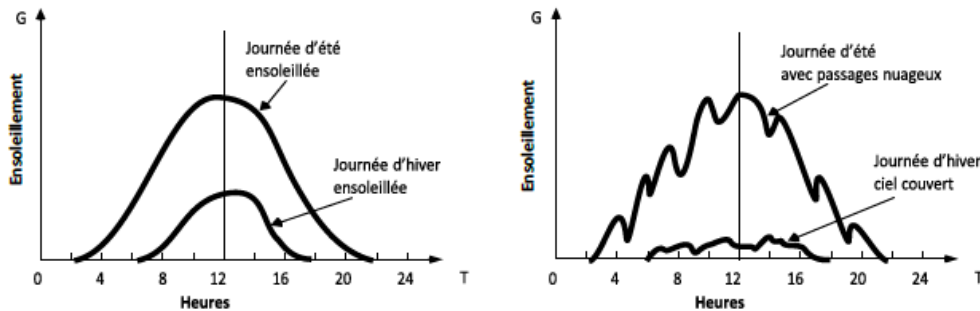


Figure 1.1: Courbes d'ensoleillement typique par heure (latitude 45)

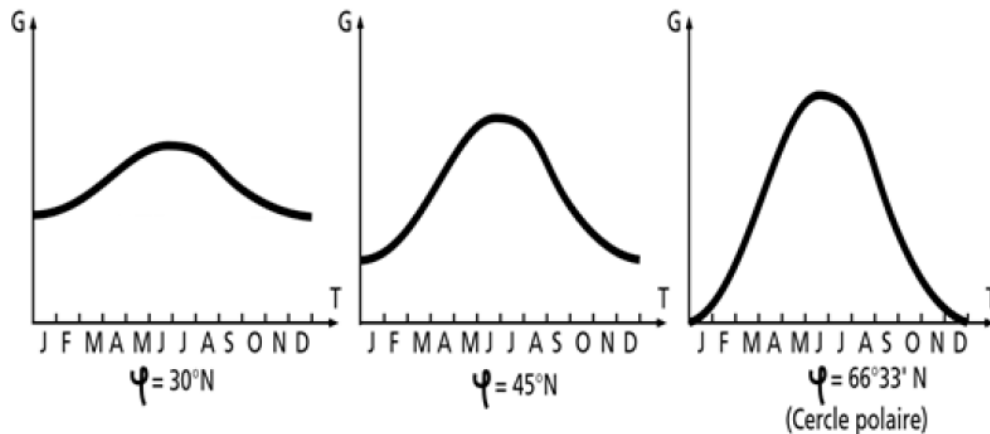


Figure 1.2: Courbes d'ensoleillement typique par mois



## 1.3 Spectre du rayonnement

La répartition spectrale du rayonnement solaire [6] est déterminée par la température de sa surface, à savoir  $5900K$ .

La figure (1.3) donne l'allure de la répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère (l'éclairement spectral est défini comme une puissance reçue par une surface pour une longueur d'onde donnée ; il s'exprime en  $W/m^2.Nm$  [7]) comparé à celle du corps noir à  $5900K$ , on constate que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir. A partir de soleil ils nous parviennent :

- Les Ultraviolets (UV), de  $200 - 400nm$ , invisibles, provoquent des dommages sur les cellules photovoltaïques.
- La Lumière visible, de  $400 - 800nm$ , visibles, ils nous permettent de distinguer les formes et les couleurs.
- Les Infrarouges (IR), de  $800 - 1400nm$ , invisibles, chauffent la matière solide ou gazeuse qu'ils rencontrent.

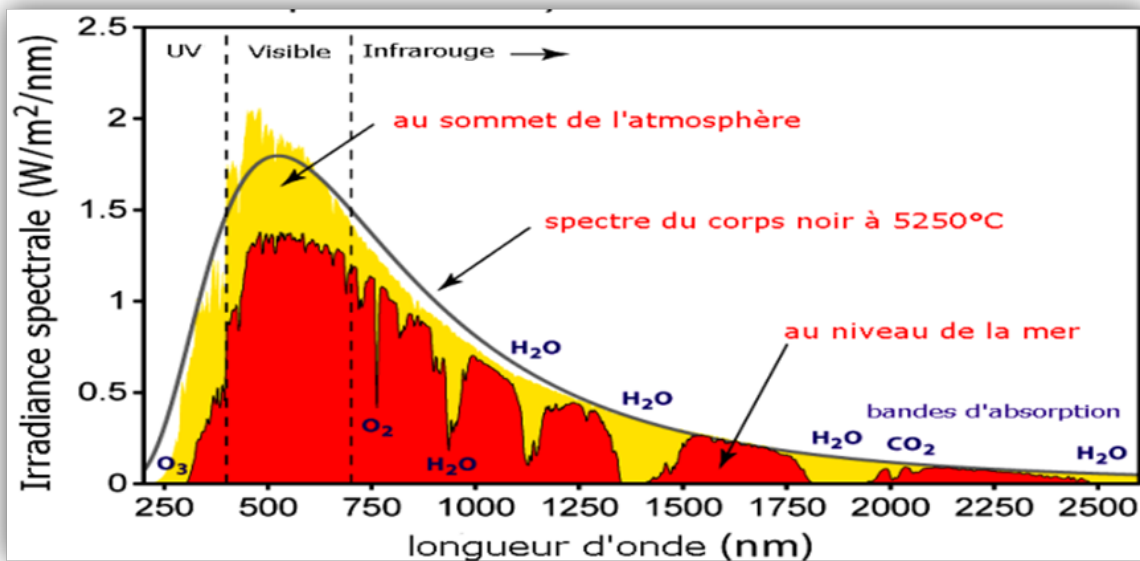


Figure 1.3: Distribution spectrale du rayonnement solaire. [8]

### 1.3.1 Mesure du rayonnement solaire

L'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ).

Comme on l'explique à la section La ressource solaire, l'ensoleillement varie de zéro, au lever du Soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire.

L'ensoleillement peut également exprimer la quantité d'énergie solaire captée sur un plan pendant un intervalle déterminé. Il s'exprime habituellement en kilowattheure par mètre carré ( $kWh/m^2$ ), en «heure de soleil maximum», en méga joule par mètre carré ( $MJ/m^2$ ) ou en calorie par centimètre carré ( $cal/cm^2$ ) pour l'intervalle déterminé – une journée ou une heure.  $1kWh/m^2j = 1$  heure de soleil maximum( $1000W/m^2$ )/ $jour = 3,6MJ/m^2j = 86cal/cm^2j$  Les valeurs quotidiennes d'ensoleillement sont habituellement présentées sous forme de moyennes mensuelles pour différentes latitudes et inclinaisons à des endroits précis (afin de rendre compte de l'effet de conditions météorologiques différentes).

Le plus souvent, on exprime l'ensoleillement en «heures de soleil maximum», c'est-à-dire par le nombre équivalent d'heures par jour où l'éclairement est en moyenne de  $1000W/m^2$ . Ainsi, un ensoleillement de six heures de soleil maximum indique que le rayonnement reçu au cours d'une journée est le même que si le Soleil avait brillé pendant six heures à  $1000W/m^2$ .

Les heures de soleil maximum sont un indice utile pour le dimensionnement des systèmes photovoltaïques, car ces systèmes sont habituellement évalués en watt-crête ( $Wc$ ), c'est-à-dire sous un éclairement de  $1000W/m^2$  [5].

### 1.3.2 Les types de rayonnement

Il y a quatre types de rayonnement [5] [8]:

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

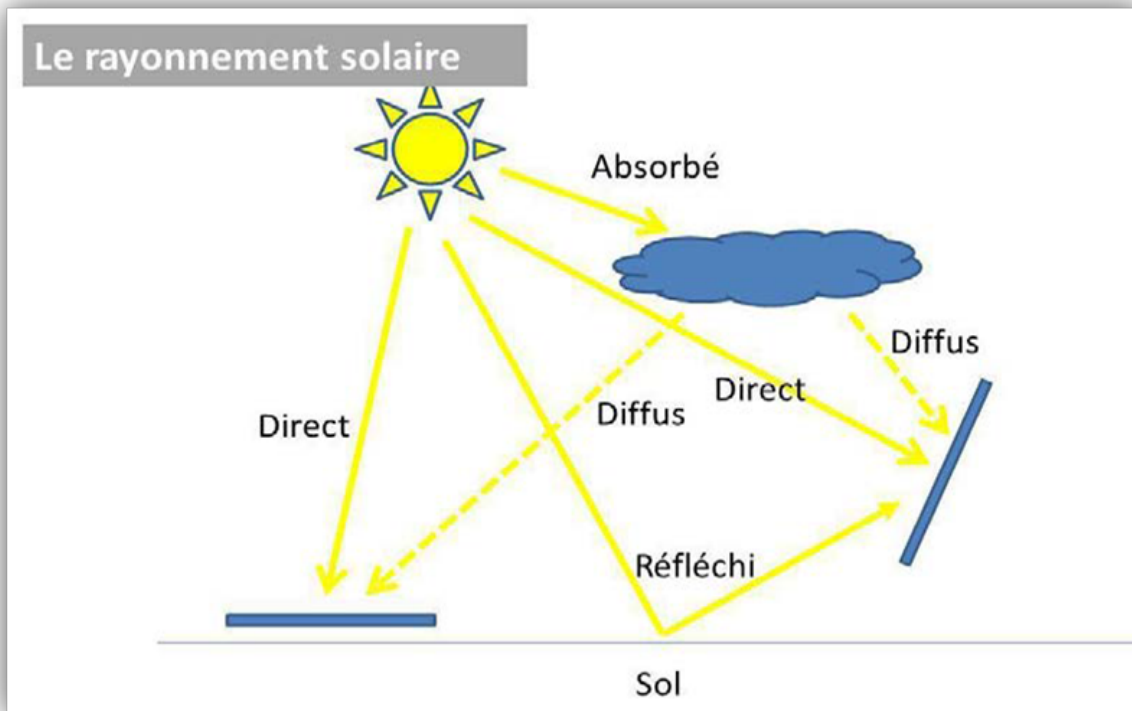


Figure 1.4: Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

## 1.4 L'énergie solaire

Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires. [9] [10]

### 1.4.1 l'énergie passive

Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.

Il consiste à laisser entrer le rayonnement solaire naturellement dans une construction par l'intermédiaire de surface vitrées et/ou par la mise en œuvre de façade du type double-peau ou encore mur trombe. Prévu dès la conception architecturale, le solaire passif n'engendre que de faibles sur coûts .

### 1.4.2 l'énergie solaire thermique

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique (chaleur). Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage ou pour obtenir de l'eau chaude.

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques.

### 1.4.3 l'énergie thermodynamique

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

### 1.4.4 l'énergie photovoltaïque

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

## 1.5 Energie solaire photovoltaïque

### 1.5.1 Historique du photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité). [11]

#### 1.5.1.1 Les dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque

- **En 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.
- **En 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. [4]
- **En 1905** : Albert Einstein publie un article sur l'effet photoélectrique, c'est pour cette recherche il obtient un prix Nobel en 1921.
- **En 1954** : D. M. Chapin, C. S. Fuller et G. L. Pearson, deux ingénieurs des Bell Téléphone Laboratoires (États-Unis), annoncent la mise au point d'une cellule dont

le rendement de conversion énergétique atteint 6%, marquant ainsi véritablement la naissance de l'électricité photovoltaïque.

- **En 1959** : les États-Unis mettent en orbite Vanguard, le premier satellite alimenté par des cellules photovoltaïques.
- **En Années 1970** : les crises pétrolières renforcent l'intérêt et les crédits accordés à l'énergie photovoltaïque.
- **1978** : le premier mégawatt crête installé est atteint dès 1978.
- **De 2010 à 2016** : la puissance installée du parc photovoltaïque mondial a été multipliée par 6 entre fin 2010 (50 GW) et fin 2016 (305 GW) [12].

### 1.5.2 Définition

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique.

Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque et l'association des modules donne un générateur photovoltaïque GPV qui a une caractéristique statique courant-tension ( I-V) non linéaire, présentant un point de puissance maximale (PPM).

Cette caractéristique dépend du niveau de rayonnement et de la température de la cellule ainsi que d'autres paramètres de l'ensemble. [13]

### 1.5.3 L'effet photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque [14].

### 1.5.4 Principe de la conversion d'énergie photovoltaïque

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers (des impuretés) en petit nombre sont substitués dans un réseau cristallin (dopage).

Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès :

il sera dit de type N (exemple: silicium dopé au phosphore), au contraire si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons: il sera dit de type P (exemple: silicium dopé au bore).

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore. Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives.

Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés afin de collecter les électrons en mouvement. figure(1.5) [15]

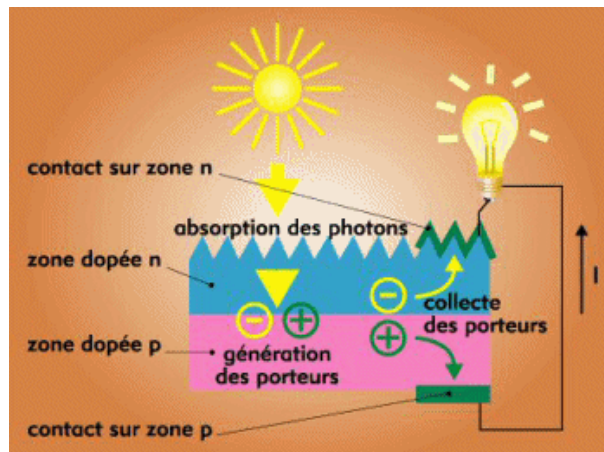


Figure 1.5: schématique d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie en énergie électrique.

Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

Absorption des photons (dont l'énergie supérieure de gap) par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons trous dans le matériau semi-conducteur ; Collecte des particules générées dans le dispositif Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant: d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

### 1.5.5 Différents types des cellules solaires

Dans cette partie, nous présentons les différentes cellules photovoltaïques en donnant leurs caractéristiques principales selon le type de matériaux utilisés.

### 1.5.5.1 Les cellules en silicium mono cristallines

Elles sont les photopiles de la première génération, possédant un taux de rendement de 12 à 17 %, mais la méthode de leurs productions est laborieuse et difficile, puisque il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.



Figure 1.6: photos d'une cellule mono cristalline

### 1.5.5.2 Les cellules en silicium poly cristallines

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les différentes orientations des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 13%, mais leur coût de production est moins élevé que celui des cellules mono cristallines.

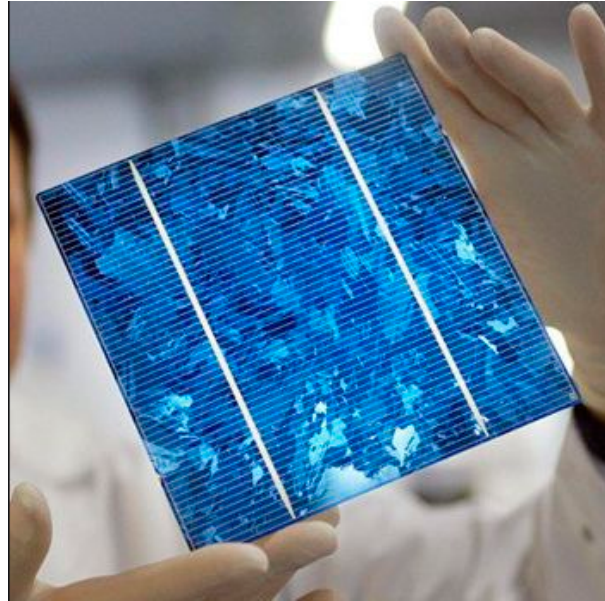


Figure 1.7: photo de cellule poly cristallin

### 1.5.5.3 Les cellules amorphes

Elles ont un coût de production moins chère, mais malheureusement leur rendement est faible (8 à 10%).

La cellule est gris très foncé .Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium, où on peut appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du plastique souple ou du métal.

C'est le silicium amorphe qu'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices et les montres, mais aussi plus récemment sur les grandes surfaces utilisées pour la couverture des toits. [15]

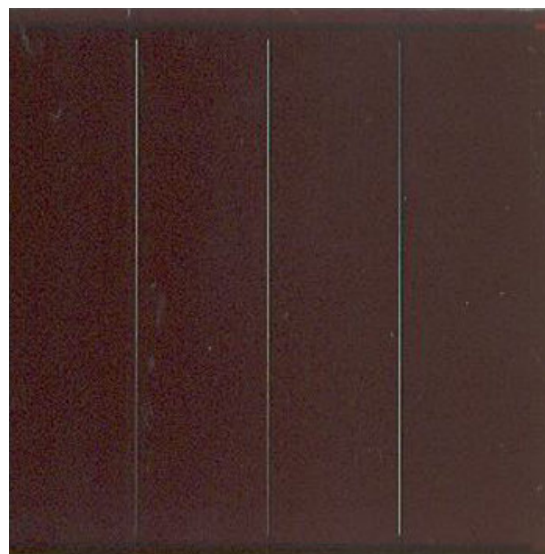


Figure 1.8: Photo d'une cellule amorphe



#### 1.5.5.4 Cellules à couches minces

La technologie des couches minces a l'avantage de produire les cellules par un procédé de revêtement à grande surface peu onéreux.

Elles sont plus minces et peuvent même être déposées sur des supports flexibles figure(1.9). Par contre leur rendement est plus bas que celui des cellules cristallines. Divers matériaux semi-conducteurs entrent en ligne de compte pour cette technologie :

le silicium amorphe et micro-amorphe, le Cd-Te (tellure de cadmium), le CIS (sélénure de cuivre et d'indium), parfois aussi le CIGS (séléniure de cuivre, indium et gallium). Les nanotechnologies (cellules à colorants) ne jouent pas encore un grand rôle [16].

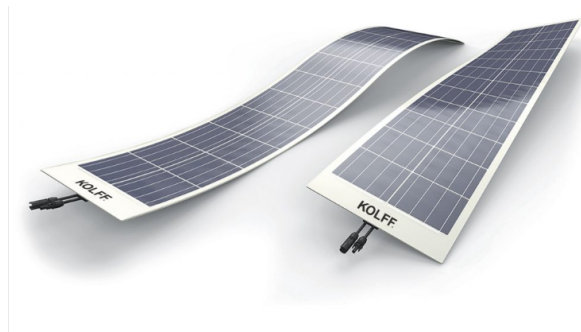


Figure 1.9: Photo d'une Cellules à couches minces

#### 1.5.5.5 Cellules organiques « plastiques »

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor.

Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978, La cellule composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion, ces cellules comprennent deux voies :

la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ».

Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures) . [17]



Figure 1.10: photo d'une Cellules organiques

## 1.6 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### 1.6.1 Les avantages

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville.
- L'énergie photovoltaïque est renouvelable et gratuite.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans. [18] [19]

### 1.6.2 Les inconvénients

- Le coût très élevé et pollution lors de la fabrication.
- Faible rendement de conversion.
- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- S'il faut stocker l'énergie dans des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).

Malgré ces inconvénients le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir.

En plus la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'atténuer surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication. [18] [19]

## 1.7 Le Potentiel Solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1m^2$  est de l'ordre de  $5KWh$  sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700KWh/m^2$  par an au nord et  $2263kwh/m^2$  par an au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique.

Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [20] [21].

Table 1.1: Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie

| Région                                     | Régions côtières | Hauts plateaux | Sahara |
|--|------------------|----------------|--------|
| Superficie                                 | 4%               | 10%            | 86%    |
| Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an) | 2650             | 3000           | 3500   |
| Energie moyenne reçue ( $KWh/m^2/an$ )     | 1700             | 1900           | 2650   |

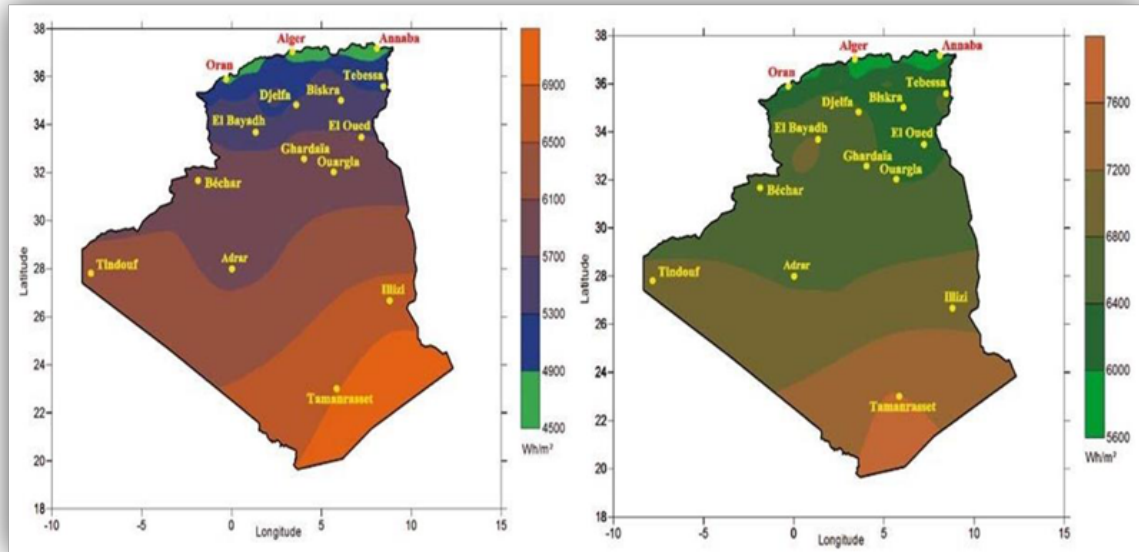


Figure 1.11: Moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie

a- Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale période 1992-2002.

b- Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale d'un ciel totalement clair.

## 1.8 Potentiel énergétique en Algérie

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année [22].

Le potentiel énergétique solaire permet de palier à certaines lacunes, quant à l'amélioration des conditions de vie des citoyens par le biais de la voie solaire d'origine photovoltaïque.

Cette voie permet d'assurer entre autres [23] [24]:

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

Dans notre pays, les premières expériences sont apparues avec le programme d'électrification rurale solaire durant la période 1995-2002 qui a concerné 20 villages répartis dans 4 wilayas

du grand sud de l'Algérie:

Tamanrasset (9 villages), Tindouf (3 villages), Illizi (6 villages) et Adrar (2 villages), comme le montre la figure (1.12) Ces villages étaient caractérisés par leur isolement et leur éloignement de tout réseau de communication.

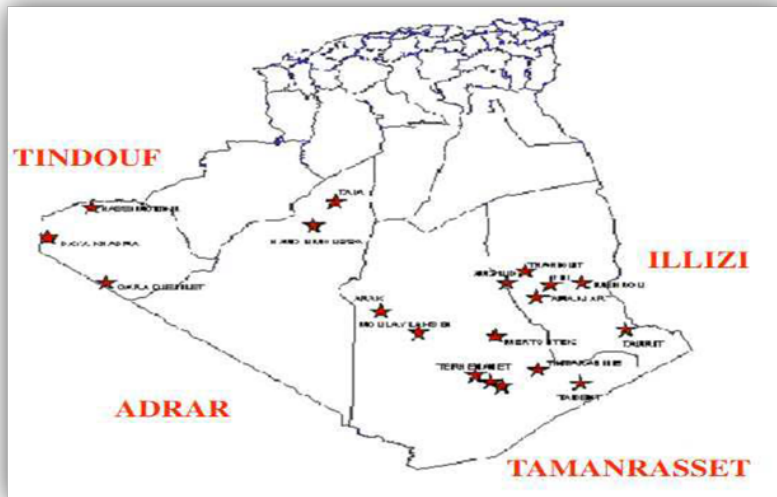


Figure 1.12: Programme d'électrification de 20 villages du sud

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

Le solaire photovoltaïque pourrait également constituer une alternative pour un programme ultérieur.

Le tableau (1.2) indique la puissance installée pour chaque wilaya [25].

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

Figure 1.13: Puissance photovoltaïque installée dans le grand sud

L'Algérie enregistre un taux faible en matière d'énergie renouvelable dans le bilan énergétique national qui ne représente que 0,02 % de la consommation nationale d'électricité [22] [26].

## 1.9 Le future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie

Cette énergie est une source d'énergie non polluante qui répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux.

Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture.

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire.

Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020.

D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030 [20].

## 1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque .

Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques ainsi que leur type avec à la fin un aperçu de cette énergie en Algérie.

# Modélisation d'un générateur photovoltaïque

## 2.1 Introduction

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire, aux quels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie) des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur [27].

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant finals du générateur photovoltaïque.

La modélisation des modules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents, en prenant plus en moins de détails.

Le courant généré par le module photovoltaïque à une tension donnée dépend uniquement de l'éclairement et la température de la cellule.

## 2.2 Générateur Photovoltaïque GPV

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque.

Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel figure(2.1) .

Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés

sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [28].

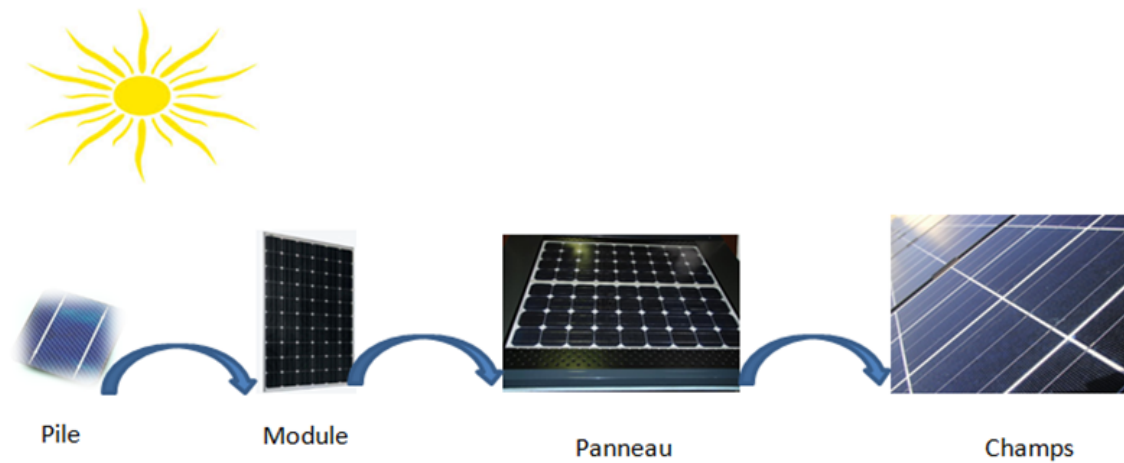


Figure 2.1: les Composants d'un GPV

## 2.3 Panneau photovoltaïque

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [29].



Figure 2.2: Panneau photovoltaïque

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connexions entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

La boîte de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur lequel se trouvent :



- Des diodes schotcky séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boîtes permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- Des besoins en électricité.
- La taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.



Figure 2.3: Boite de dérivation

## 2.4 Module photovoltaïque

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

Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN).

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque.

En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité.

Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [29].

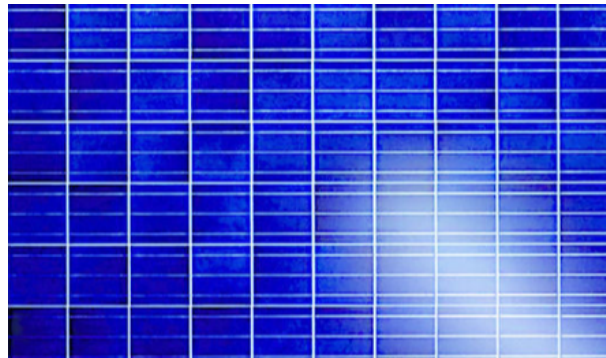


Figure 2.4: Module photovoltaïque

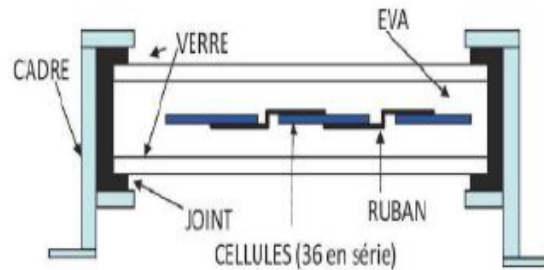


Figure 2.5: Câblage des cellules dans un module

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

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

### 2.4.1 La constitution d'un module photovoltaïque

a. Câblage des cellules photovoltaïques: les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+).

b. Les cellules sont encapsulée sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents EVA, (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle).

c. Le module est encadré en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation.

d. Un verre trempé en face avant sert à protégé les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière.

e. La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR.

f. La boîte de jonction est une boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement des cellules avec les diodes by-pass.

g. Les 2 câbles unipolaires sont raccordés.

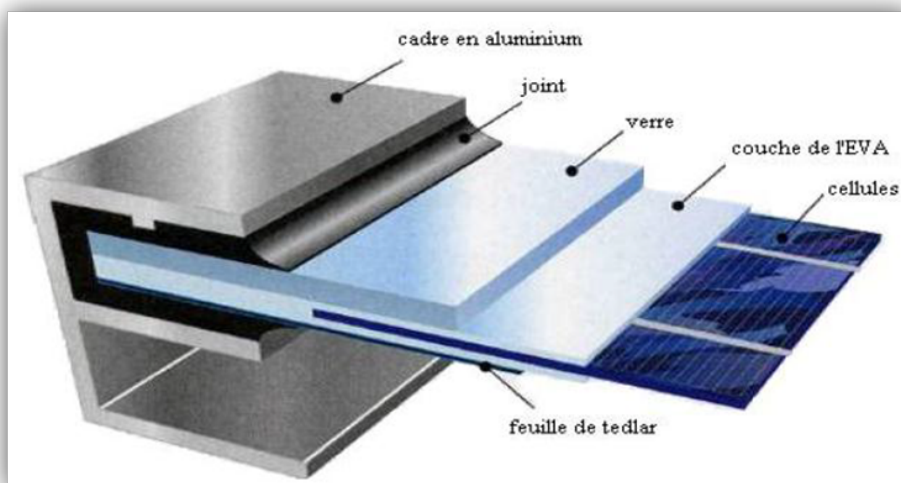


Figure 2.6: Encapsulation des cellules.

### 2.4.2 Association en série et en parallèle d'un module PV

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, . . . etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente. [30]

### 2.4.2.1 Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. [30]

L'équation (2.1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules est :

$$V_{oc} = N_s V_{oc} \tag{2.1}$$

Avec:  $V_{oc}$ : la tension du circuit ouvert.

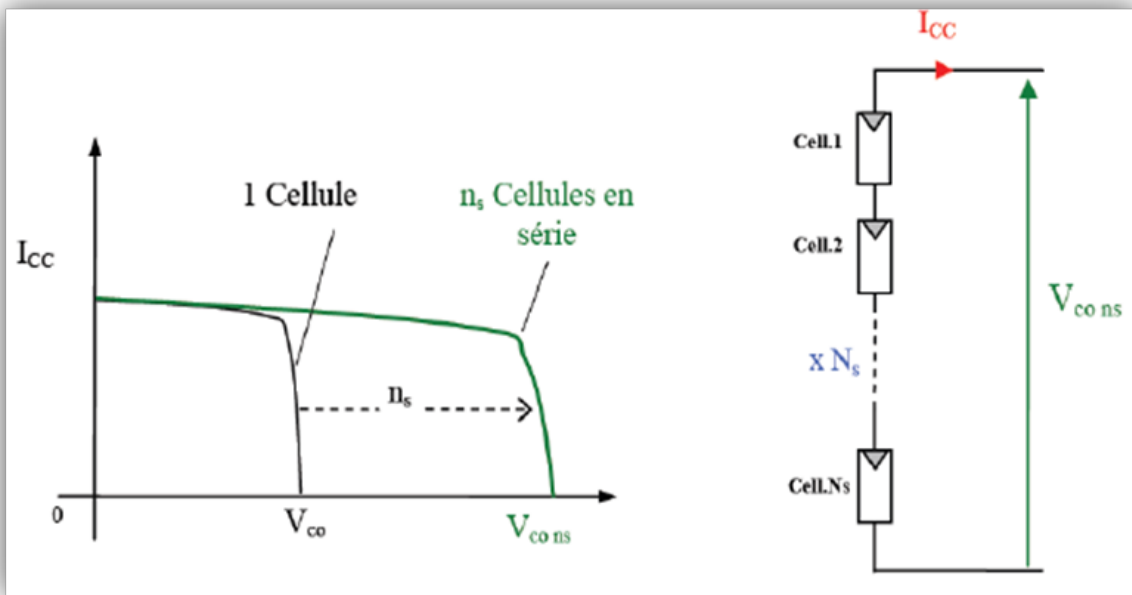


Figure 2.7: Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série

### 2.4.2.2 Association en parallèle

En additionnant des modules ou cellules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche. [30]

L'équation (2.2) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $N_p$  cellules.

$$I_{cc} = N_p I_{cc} \tag{2.2}$$

Avec  $I_{cc}$ : Le courant de court circuit.

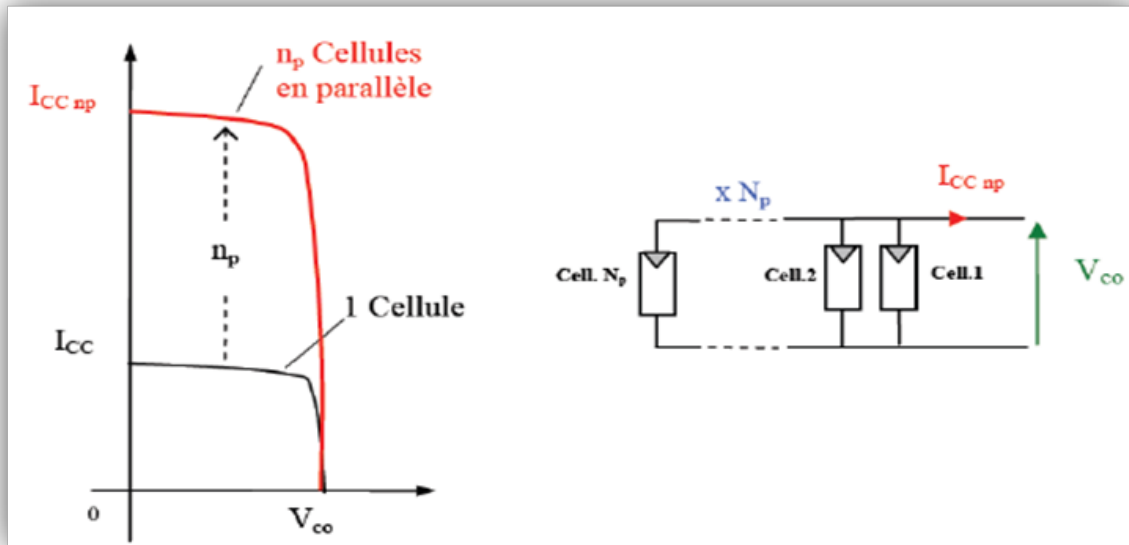


Figure 2.8: Caractéristique résultante d'un groupement de  $n_p$  cellules en parallèle

## 2.5 Caractéristique d'un module photovoltaïque

Caractéristiques d'un module photovoltaïque réel est caractérisé par les paramètres fondamentaux suivants :

### 2.5.1 Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque est nulle. Dans le cas idéal ce courant est directement proportionnel à l'énergie rayonnante reçue, c'est-à-dire à l'éclairement  $E(W/m^2)$ , à la température ambiante et à la vitesse de circulation de l'air ambiant, il est également directement fonction de la surface de la cellule.

Quantitativement, il à la plus grande valeur du courant génère par la cellule (pratiquement  $I_{sc} = I_{ph}$ ). Le courant court-circuit est donné par :

$$I_{sc} = K_i * ES \quad (2.3)$$

$K_i$  : Coefficient de variation du courant  $I_{sc}$  en fonction de la température( $A/K$ ).

$E$  : éclairement reçu( $W/m^2$ ).

$S$  : Surface de la cellule( $m^2$ ).

### 2.5.2 Tension de circuit ouvert (Voc)

C'est la tension aux bornes du module en absence de tout courant pour un éclairage.

Elle peut aussi être définie comme la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul, elle dépend fortement de l'éclairement de la cellule, et se calcule par :

$$V_{oc} = \frac{\alpha * K * T}{q} * Ln \frac{E}{E_0} \quad (2.4)$$

avec

K: constante de Boltzmann (1.38.10<sup>-23</sup>Joules/Kelvin) ;

T: température de la jonction p-n des cellules ;

q: charge d'un électron (1,602.10<sup>-19</sup>C) ;

E: éclairement reçu (W/m<sup>2</sup>);

E<sub>0</sub>: éclairement de référence(W/m<sup>2</sup>);

### 2.5.3 La puissance crête

C'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions appelées conditions standard (25°C, 1.5AM est un éclairement de 1000W/m<sup>2</sup>).

### 2.5.4 Rendement

Nous pouvons définir le rendement d'une cellule photovoltaïque comme le quotient de la puissance maximale et de la puissance lumineuse reçue par la cellule.

Cette puissance lumineuse correspond au produit de l'aire de la cellule par l'ensoleillement.

[31]

$$n = \frac{M_m * I_m}{ptnc} = \frac{p_{max}}{S * E} \quad (2.5)$$

### 2.5.5 Facteur de forme (FF)

Il permet de juger de la qualité d'une cellule photovoltaïque. Il est défini comme le rapport entre le point de puissance maximum et le produit courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert : [32]

$$ff = \frac{p_{max}}{S * E} \quad (2.6)$$

## 2.6 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

### 2.6.1 Model idéal d'une cellule photovoltaïque

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (2.9) qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale .

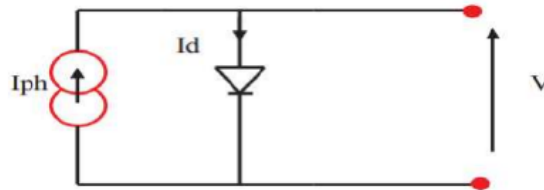


Figure 2.9: Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_d \quad (2.7)$$

avec

$I_{ph}$  : photo- courant.

$I_d$  : courant traversant la diode.

Pour un générateur PV idéal, la tension aux borne de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (2.8)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_{sd} [exp^{\frac{V}{nV_t}} - 1] \quad (2.9)$$

Avec

$I_{sd}$  :courant de saturation de diode.

$V$  : tension à la borne de la diode.

$n$  : le facteur d'idéalité de la diode .

$T$  : température absolue (en kelvin).

$V_t$  : la tension thermique donnée par :

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (2.10)$$

q : charge de l'électron ( $1.9 \cdot 10^{-19}$  coul).  
 k : coefficient de Boltzman ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/k).

Dans la relation sera :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right] \quad (2.11)$$

### 2.6.2 Model réel d'une cellule photovoltaïque

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite.

On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_{sh}$

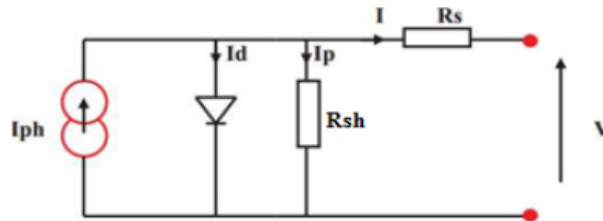


Figure 2.10: Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque

On définit :

- $I_{ph}$  : photocourant, ou courant généré par l'éclairement (A).
- La résistance shunt «  $R_{sh}$  » en parallèle avec la diode. (en  $\Omega$ )
- La résistance série «  $R_s$  ». (En  $\Omega$ )
- Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (2.12)$$

Avec :

- $I$  : le courant de sortie (A).
- $I_{ph}$  : est le courant photonique (A).
- $I_d$  : le courant de diode (A).
- $I_p$  : le courant qui traverse la résistance parallèle  $R_{sh}$  (A).

Donc on a :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{CC,ref} + k_i (T - T_{ref})) \quad (2.13)$$

Sachant que

$$I_{ph,ref} = I_{cc,ref} \quad (2.14)$$



$I_{ph}$  : le courant photonique de référence (A).

$I_{cc,ref}$  : le courant de court-circuit des cellules solaires aux conditions standard Les conditions de référence sont fixées par le constructeur mais généralement,  $T_{ref} = 25^\circ C$  :

$G_{ref} = 1000 W/K$ ,  $T_{ref} = 25^\circ C$ .

$K_i$  = le coefficient de courant en fonction de la température.

$G$  = l'irradiation solaire.

$T_{ref}$  = la température de référence  $298k(25^\circ C)$ . L'équation bien connue d'estimation de courant de saturation de diode est donnée par:

$$I_s = I_{s,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q \cdot EG}{n \cdot k} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.15)$$

Où, le courant nominal de saturation  $I_{(s,ref)}$  aux conditions standard donné par :

$$I_{s,ref} = \frac{I_{cc,ref}}{\left[ \exp \left( \frac{qV_{corref}}{nV_t} \right) - 1 \right]} \quad (2.16)$$

$I_{s,ref}$ : est la tension en circuit ouvert de la cellule solaire à la condition de référence

$E_g$ : énergie de rupture de bande du semi-conducteur =  $1,1 eV$ .

$q$  : Charge de l'électron ( $1.6 \cdot 10^{-19} C$ )

Donc le courant fourni par la cellule sera :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{v + IR_s}{nV_t} \right) - 1 \right] - \frac{v + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.17)$$

### 2.6.3 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I = f(V)$ et $P = f(V)$

Les courbes présentées sur les figures (2.11.) et (2.12.) montrent l'effet de l'éclairement et la température sur la caractéristique courant-tension d'une cellule PV, respectivement. Le courant du module est proportionnel à l'ensoleillement, tandis que la tension du circuit-ouvert change légèrement avec l'ensoleillement. L'augmentation de la température cause une diminution apparente de la  $V_{oc}$ , par contre elle a un léger effet sur le courant.

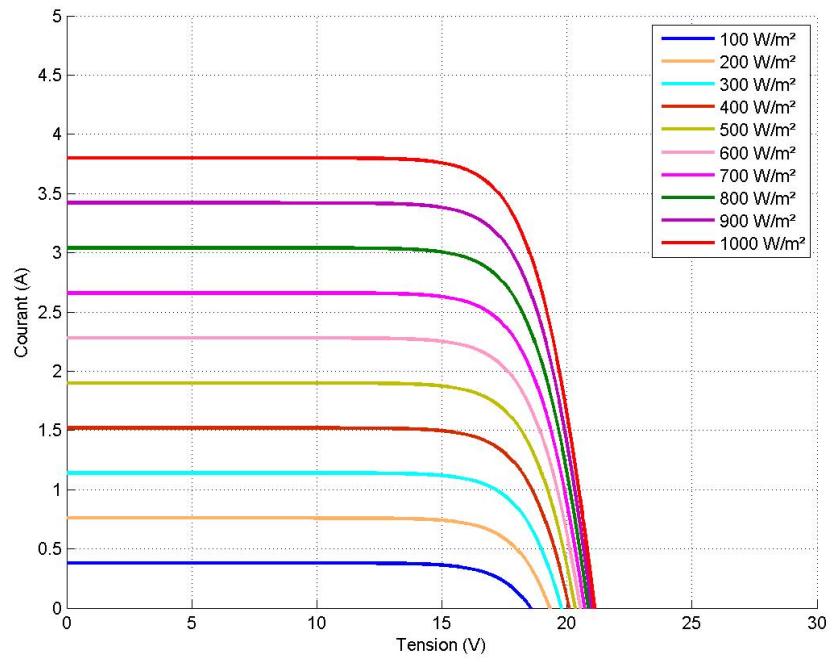


Figure 2.11: Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique  $I - VT = 25^{\circ}C$

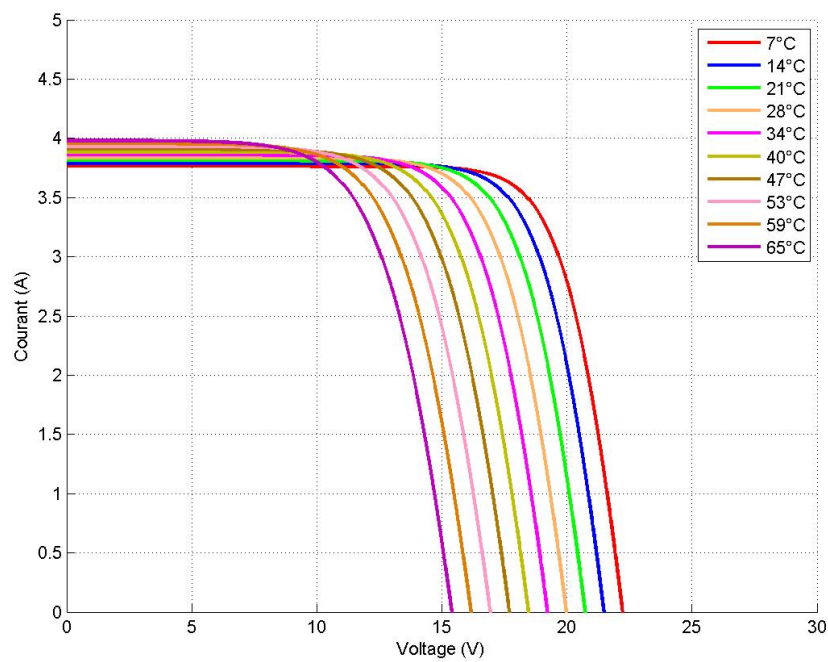


Figure 2.12: Effet de la température sur la caractéristique  $I - V$  à un ensoleillement constant  $1000W/m^2$

## 2.7 Point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque

Considérons la caractéristique  $I - V$  du générateur photovoltaïque ; pour un niveau d'ensoleillement et une température fixe ; chargée avec une charge (de type : résistive, source de courant ou de tension) constante.

La droite de charge coupe la caractéristique  $I(V)$  du GPV en un point appelé point de fonctionnement comme le montre la figure(2.13).

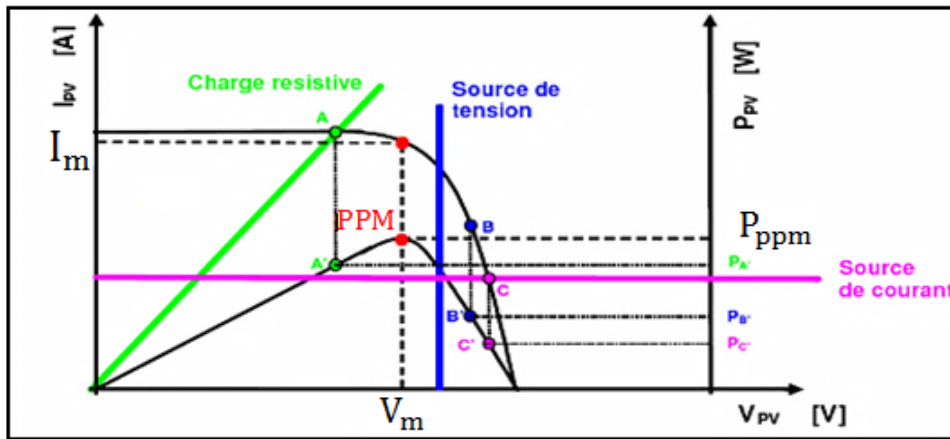


Figure 2.13: Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge

Les puissances fournies par le générateur aux points A', B' et C', correspondent à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible ( $P_{ppm}$ ). Ceci entraîne une perte d'une partie de la puissance fournie par le générateur PV entraînant des pertes importantes à longue durée.

Une caractéristique très importante des panneaux photovoltaïques est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé PPM (Maximum Power Point), défini par une tension et un courant donnés.

Ce point dépend principalement de l'insolation, de la température et des variations de la charge. Etant donné que ces derniers paramètres sont variables avec le temps, des algorithmes MPPT pour extraire le point de puissance maximale en temps réel ont été développés.

## 2.8 Effet de l'ombrage (Shading)

Lorsqu'un module photovoltaïque est partiellement ensoleillé (ombre, salissures nonuniformes), ayant subi des dommages mécaniques (vandalisme, craquage durant l'assemblage) ou bien présentant des dispersions dans les paramètres des cellules, certaines cellules de-

viennent consommatrices d'énergie.

Pour faire alors face à ce problème, les modules ombragés sont court-circuités à l'aide des diodes by-pass. Cependant, la mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de plusieurs points maximaux, comme il est indiqué par la figure (2.14), sur la courbe I(V).

La recherche du point de puissance maximale, en particulier en présence du problème de shading, sera considérée dans les chapitres suivants. [33]

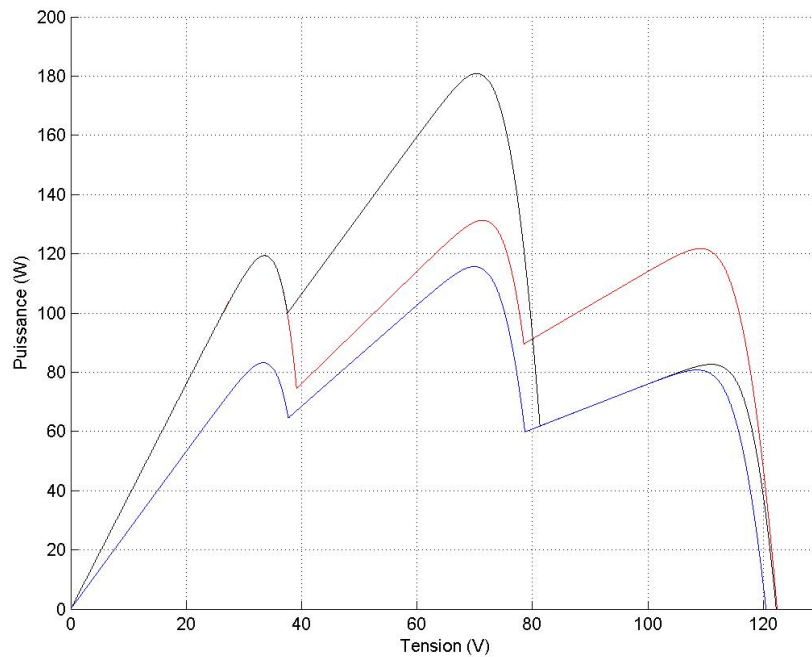


Figure 2.14: L'effet du Shading sur la caractéristique P-V d'un module photovoltaïque

## 2.9 Système de protection

Le groupement des cellules photovoltaïques présente un effet indésirable lorsque le module est partiellement à l'ombre ou lorsque les cellules ne sont pas éclairées équitablement (éclairage non homogène).

Donc pour résoudre ce problème et pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées. [34]

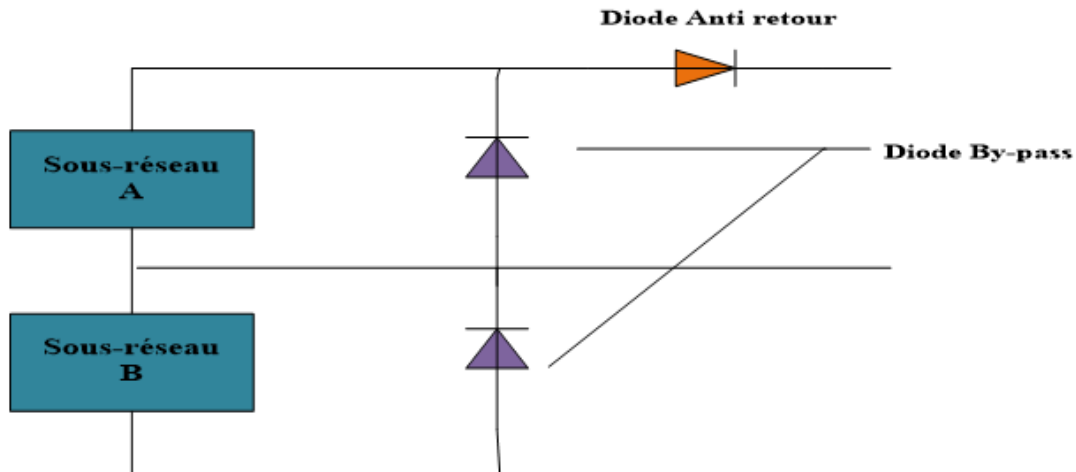


Figure 2.15: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

- **La diode anti-retour** : empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- **Les diodes by-pass** : peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées [34].

## 2.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et d'un module photovoltaïque, les caractéristiques et la constitution du module photovoltaïque avec ses performances.

Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques, le Point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, l'effet de l'ombrage et le système de protection (Diodes By-pass).

# Poursuite du point de puissance maximale (MPPT)

## 3.1 Introduction

Un générateur photovoltaïque possède des caractéristiques variable dépendent de l'éclairement solaire et de la température, ces variations climatiques entraînent des fluctuations du point de puissance maximal, le panneau solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour un point de certaine tension et courant de fonctionnement, point de fonctionnement dépend à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge pour adapté cette point en utilisant un système d'adaptation représentant en Convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite de point de puissance maximale «Maximum Power Point Tracking» (MPPT). [34] [35]

Ce système d'adaptation permettant de tirer le maximum d'énergie d'une installation solaire photovoltaïque grâce à des algorithmes spécifiques.

Le régulateur MPPT permet d'optimiser le rendement des panneaux solaires jusqu'à 30% pour un panneau photovoltaïque donné, les batteries stockent donc 30% d'électricité en plus par rapport à un régulateur solaire classique Les premières utilisations de cette technique dans les années 60, dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux photovoltaïques [36].

Alors l'objectif de ce chapitre est l'étude des quelques types convertisseurs DC-DC, les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques. (l'hacheur BUCK , l'hacheur BOOST et l'hacheur BUCK-BOOST) et la commande MPPT des convertisseurs DC-DC. On présente le principe de fonctionnement, Classification et les types d'algorithmes utilisés dans la commande MPPT.

## 3.2 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

La hacheur est un convertisseur statique de type DC-DC permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [37].

Les composants de circuits d'hacheur généralement sont des condensateurs, d'inductances et de commutateurs qui ne consomment aucune puissance active dans le cas idéal, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé). Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible [38].

La figure(3.1) Représente le montage d'un convertisseur DC/DC, entre la source et la charge.

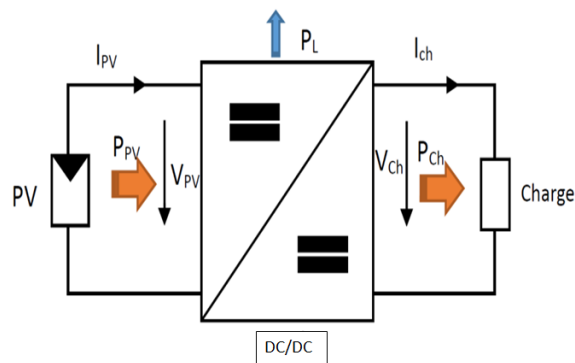


Figure 3.1: convertisseurs DC-DC

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques :

- Élévateur de tension « BOOST » ou notamment appelé hacheur survolteur.
- Abaisseur de tension «BUCK » ou hacheur dévolteur.
- Abaisseur/Élévateur de tension « BUCK-BOOST ».

Selon la position du commutateur et de l'hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés comme le montre le schéma ci-dessous [39] :

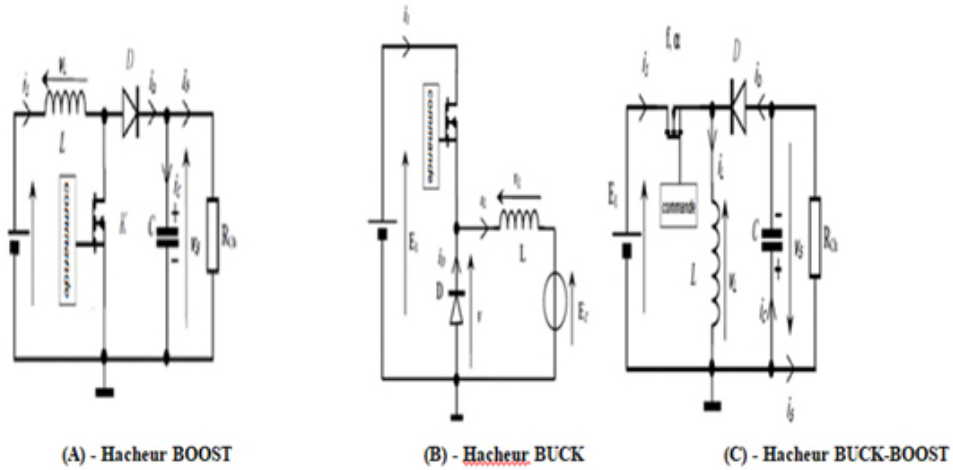


Figure 3.2: différents types de convertisseurs DC-DC

### 3.2.1 Convertisseur buck

Dans l'étude du convertisseur Buck qui peut être souvent trouvé sous le nom de convertisseur dévolteur ou hacheur série. Son objectif de utilisation est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $\alpha = \frac{V_s}{V_i}$  change avec le rapport cyclique du commutateur. La figure(3.3) présente le schéma de principe du convertisseur buck [4] et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source.



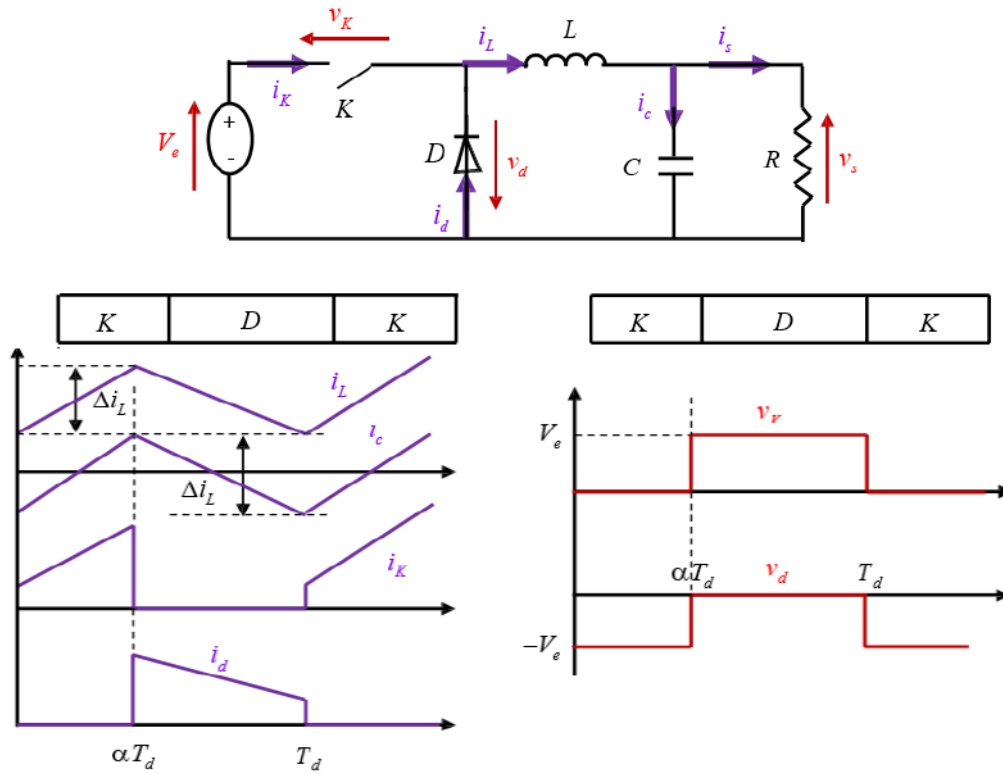


Figure 3.3: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck.

L'ondulation de la tension de sortie donnée respectivement par :

$$V_s = \alpha V \quad (3.1)$$

$$\Delta i_l = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{l.f} \quad (3.2)$$

$$\Delta v_s = \frac{\Delta i_l}{8c.f} = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{8c.l.f^2} \quad (3.3)$$

Le convertisseur est donc abaisseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :

$$I_l = I_s \quad (3.4)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes en tension :

$$V_{k_{max}} = |V_{d_{max}}| = V_e \quad (3.5)$$

En courant :

$$i_{k_{max}} = i_{d_{max}} = i_{l_{max}} = i_l \frac{\Delta i_l}{2} \quad (3.6)$$

### 3.2.2 Convertisseur BOOST

Un convertisseur BOOST qui peut être souvent trouvé sous le nom de convertisseur survolteur ou hacheur parallèle. Son objectif d'utilisation est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

Il est composé d'un interrupteur  $K$  (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode  $D$  l'interrupteur  $K$  est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion ( $MLI$ ) de période de découpage fixe  $T_d$  et de rapport cyclique variable  $\alpha$ .

Le principe de fonctionnement pour les deux interrupteurs est la complémentarité, quand  $K$  est fermé  $D$  est ouvert ; et quand  $K$  est ouvert,  $D$  est fermé. Durant chaque période,  $K$  est fermé de l'instant 0 à  $\alpha T_d$  et ouvert de  $\alpha T_d$  à  $T_d$  La figure 3.4 donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite). [40]

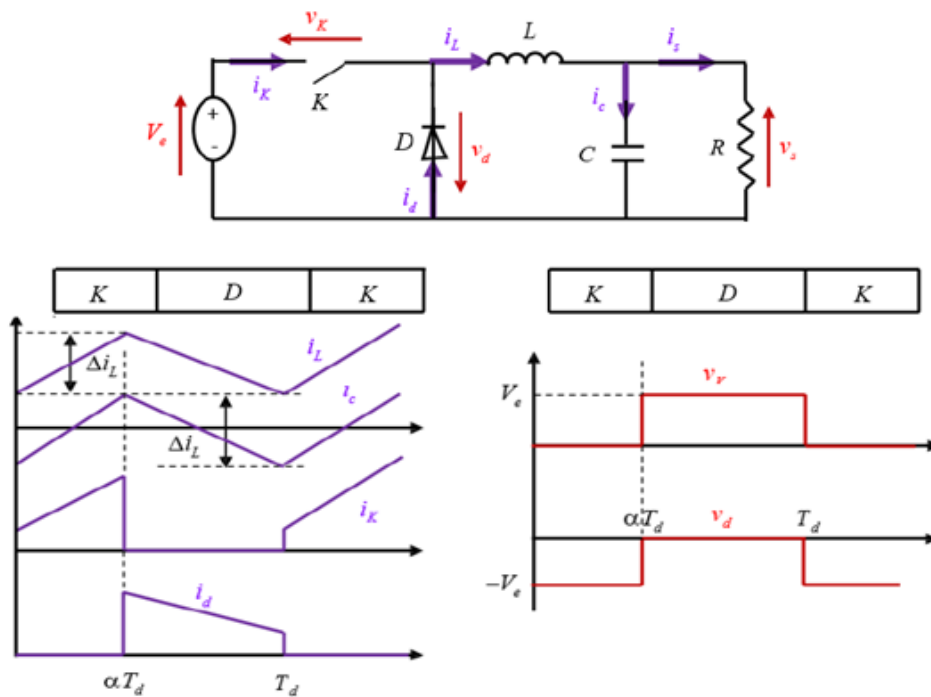


Figure 3.4: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost

- cas de l'interrupteur  $K$  est fermé ( $0 < t < \alpha T_d$ ), le circuit du convertisseur sera :

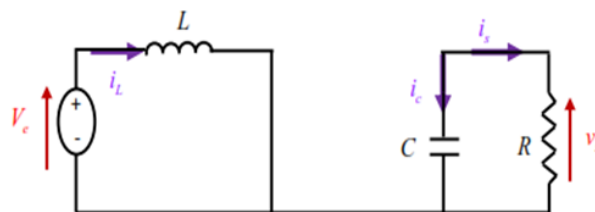


Figure 3.5: Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé

$$L \frac{di_l}{dt} = V_c \quad (3.7)$$

$$I_L = I_{\min} + \frac{V_c}{L} t \quad (3.8)$$

Avec  $I_{\min}$  la valeur minimale du courant dans l'inductance A l'instant  $t = \alpha T_d$ , le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale  $I_{\max}$ :

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_c}{L} \alpha T_d \quad (3.9)$$

- Le cas de l'interrupteur K est ouvert  $\alpha T_d < t < T_d$  le circuit du convertisseur sera :



Figure 3.6: Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert

$$L \frac{di_l}{dt} = V_c - V_s \quad (3.10)$$

$$I_L = I_{\min} + \frac{V_c - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (3.11)$$

A l'instant  $t = T_d$ , le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{\min}$ :

$$I_{\min} = I_{\max} + \frac{V_c - V_s}{L} (t - \alpha) T_d \quad (3.12)$$

Soit  $\delta i_l = I_{\max} - I_{\min}$  l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (3.9) et (3.12), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  :

$$V_s = \left( \frac{1}{1 - \alpha} \right) V_e \quad (3.13)$$

À par terre l'égalité on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension. En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique:

$$I_l = \left( \frac{1}{1 - \alpha} \right) I_e \quad (3.14)$$

De l'expression (3.9), on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_l = \frac{\alpha V_s}{L} T_d = \frac{\alpha V_c}{L f} \quad (3.15)$$

Avec  $f$  la fréquence de découpage.

Pendant la première séquence de fonctionnement  $0 < t < \alpha T_d$ , seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire :

$$c \frac{dv_s}{dt} = -i_s \quad (3.16)$$

Alors l'ondulation de la tension de sortie peut être exprimée par:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{c.f} = \frac{\alpha V_s}{(1-\alpha) R c f} \quad (3.17)$$

D'après l'analyse des deux séquences de fonctionnement, on constate que les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes en courant et en tension:

$$I_{k,\max} = I_{d,\max} = I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_l}{2} = \frac{I_S}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_l}{2} \quad (3.18)$$

$$V_{k,\max} = V_{d,\max} = V_{\max} = V_{s,\max} + V_s + \frac{\Delta i_l}{2} = \frac{V_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_l}{2} \quad (3.19)$$

### 3.2.3 Convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur Buck-Boost combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma et les formes d'ondes de courants et tensions présentées à la figure (3.7).

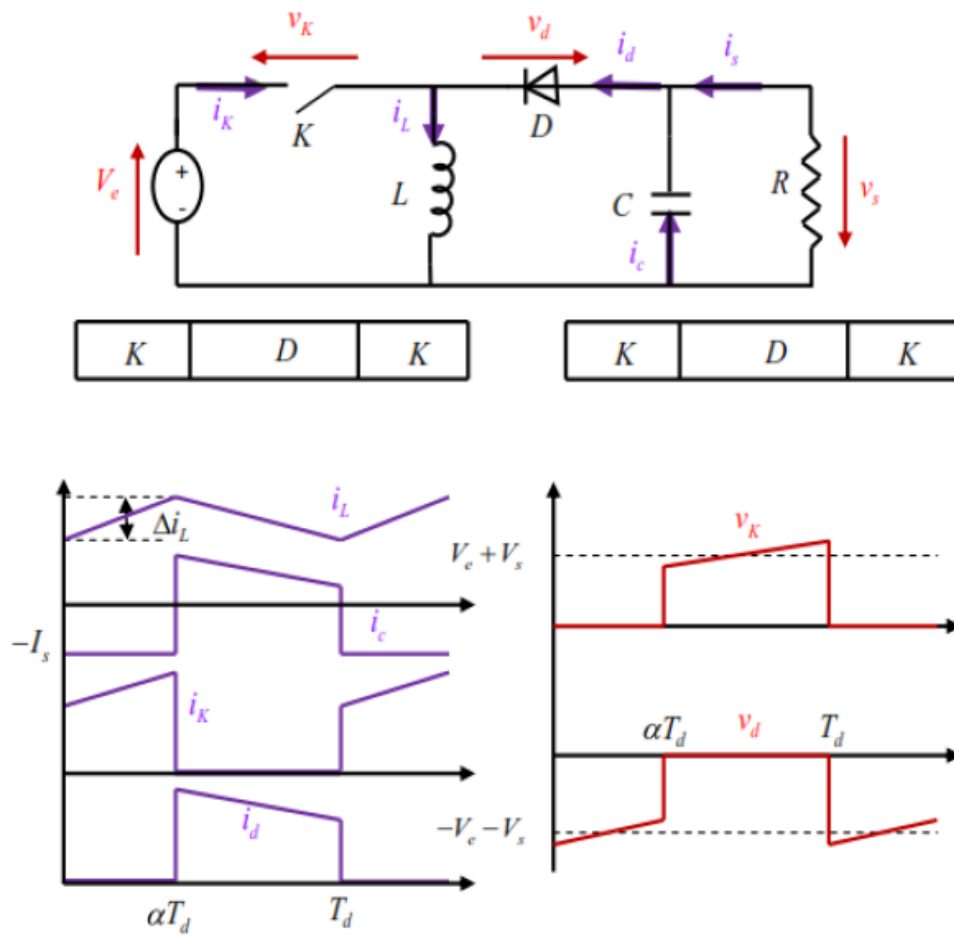


Figure 3.7: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost

La tension de sortie moyenne est donnée par:

$$V_s = \left( \frac{\alpha V_c}{1 - \alpha} \right) \quad (3.20)$$

L'ondulation de courant dans l'inductance est donnée par :

$$\Delta i_l = \frac{\alpha V_c}{lf} \quad (3.21)$$

Et l'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{cf} = \frac{\alpha^2 V_s}{(1 - \alpha)RCf} \quad (3.22)$$

En générale La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension [40].

Le courant moyen traversant l'inductance est donné par :

$$I_l = \left( \frac{I_s}{1 - \alpha} \right) \quad (3.23)$$

Les contraintes en tension et en courant sur l'interrupteur commandé et la diode sont:  
En tension:

$$V_{k,\max} = |V_{d,\max}| = V_{s,\max} + V_s = \frac{V_c}{1 - \alpha} + \frac{\Delta i_l}{2} \quad (3.24)$$

En courant :

$$I_{k,\max} = I_{d,\max} = I_{L,\max} = \frac{I_s}{1 - \alpha} + \frac{\Delta i_l}{2} \quad (3.25)$$

### 3.3 Principe De La Commande MPPT

La puissance produise par un panneau PV dépend des conditions climatiques (température et irradiation) et de la charge, dans l'étude caractéristique de puissances pv en peut trouvé une point max MPP pour chaque variation des facteurs climatique, Ce point défini par son courant  $I_{mpp}$  et sa tension  $V_{mpp}$ .

Un système MPPT (Maximum Power Point Tracker) doit être utilisé pour permettre le fonctionnement d'un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation).

Pour faire cette optimisation le système MPPT contient généralement un algorithme qui donne le point de puissance maximale et un convertisseur statique DC-DC (hacheur), Il peut être représenté par le schéma de la figure (3.8).

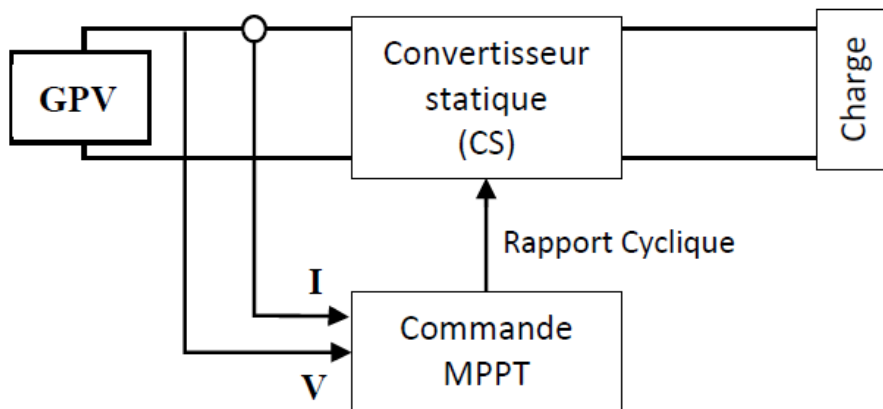


Figure 3.8: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur, une commande MPPT et une charge.

La commande *MPPT* basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  du convertisseur statique à l'aide d'un signal électrique approprié pour tirer la valeur optimale de manière à maximiser la puissance fournie par le panneau PV.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [38] [41].

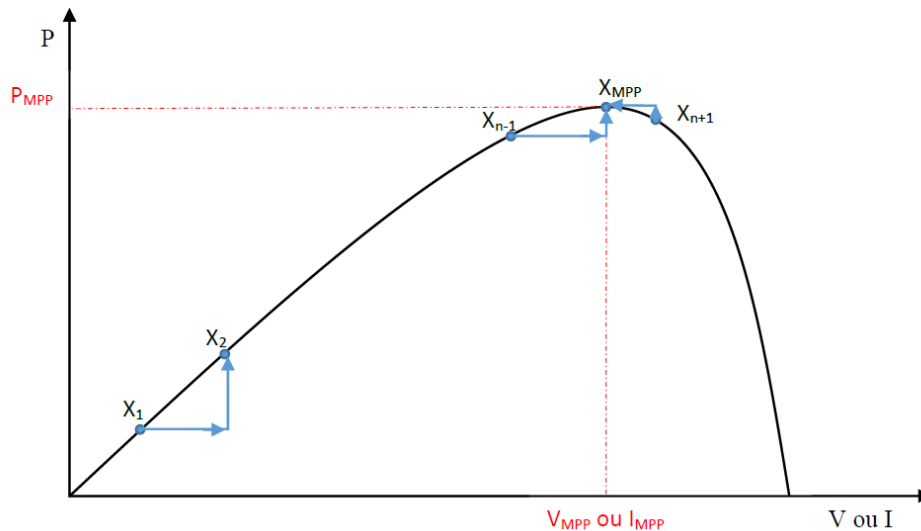


Figure 3.9: Principe de la commande MPPT

## 3.4 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée

### 3.4.1 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur statique

Ce type de commandes *MPPT* fait une recherche du MPP à partir de l'évolution de la puissance fournie par le GPV qui nécessite la mesure du courant et de la tension en entrée du convertisseur. Il y a des algorithmes qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM. Tel que P&O et les algorithmes d'incrément de conductance et des autres commandes qui sont basées sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal ( $V_{OPT}$  et  $I_{OPT}$ ) et les paramètres caractéristiques du module PV ( $V_{OC}$  et  $I_{CC}$ ) comme les MPPT inspirées des réseaux de neurones.

Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [34].

### 3.4.2 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur statique

Il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie du convertisseur statique. Par exemple ;

les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie Généralement tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie pour l'approximation de  $P_{max}$  basées sur rendement du convertisseur, plus l'étape de conversion est rapide, plus l'approximation est valable. Par contre, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis [42].

## 3.5 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

### 3.5.1 MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV.

Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement.

Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée.

Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation.

Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement.

La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [34]-[42]- [4].



### 3.5.2 MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{cc}$  ou  $V_{oc}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable.

Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser.

Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [42].

## 3.6 Les Algorithmes MPPT les plus fréquents

Il existe plusieurs algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale dans les commandes MPPT plus ou moins performantes en général sont basés sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique et les propriétés du GPV, on peut classifier en deux catégories les méthodes classiques et les méthodes modernes. Dans cette partie nous allons parler sur les algorithmes la plus fréquente à savoir:

- Les méthodes classiques :
  - la méthode perturbation et observation (P&O).
  - la méthode de la conductance incrémentale, (IC).
- Les méthodes modernes :
  - la méthode de réseaux de neurones (Neural Network).
  - la méthode de la logique floue (Fuzzy Logic Control).

### 3.6.1 les méthodes classiques

#### 3.6.1.1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

en généralement P&O c'est l'algorithme le plus utilisée grâce à sa simplicité et sa facilité de réalisation. cette méthode repose sur la perturbation (variation) de la tension  $V_{ref}$ , ou du courant  $I_{ref}$ , et faire la comparaison avec les mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{PV}$  et  $I_{PV}$  respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température [4].

Le principe de l'algorithme P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible

amplitude autour de sa valeur initiale et analyser la conduite de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la Figure (3.10).

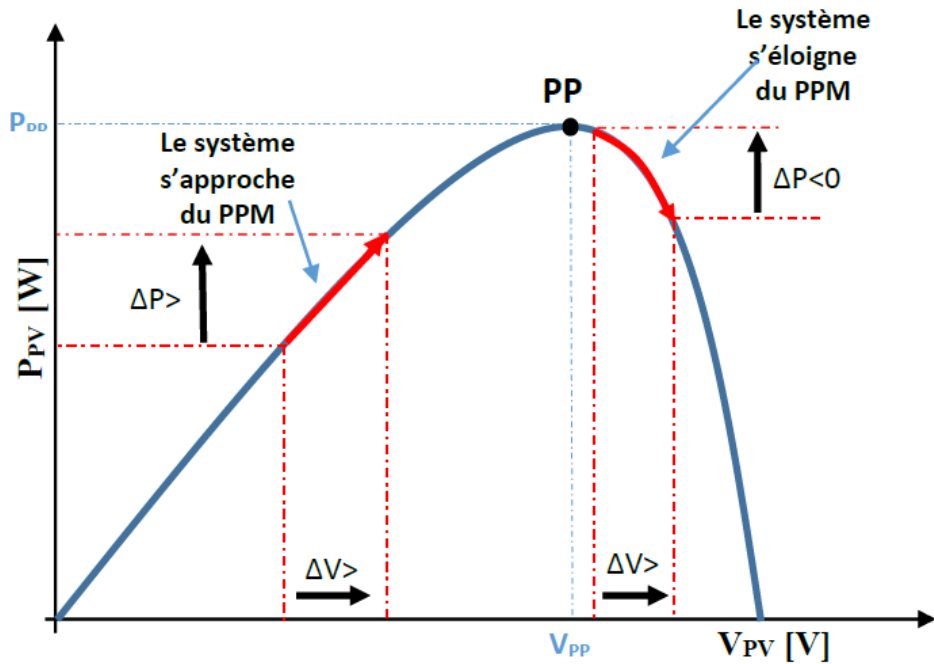


Figure 3.10: Schéma de convergence vers le PPM par P&O

On peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le MPP, un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au point MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [43].

La Figure (3.6) représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

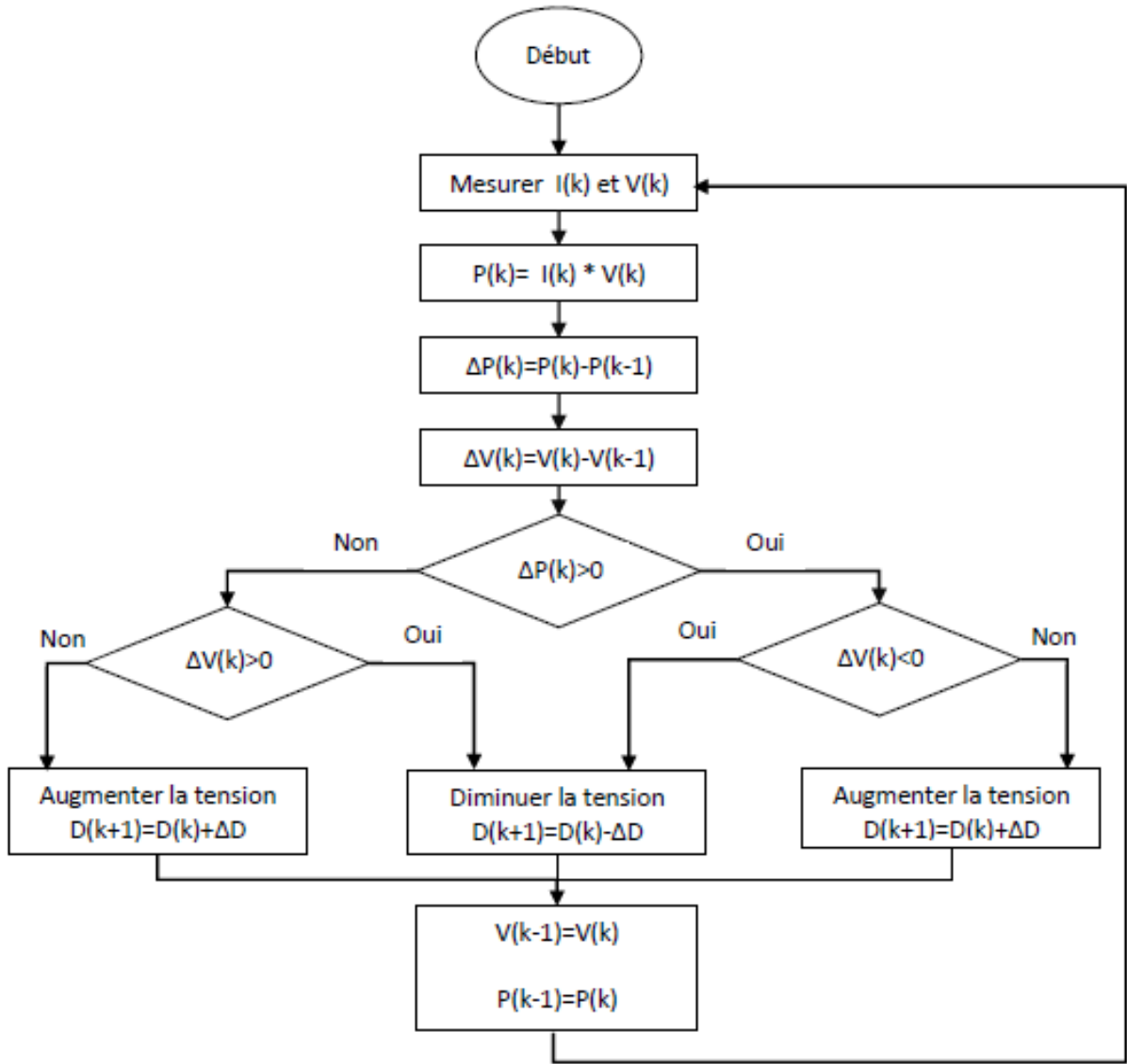


Figure 3.11: Algorithme de MPPT à base de la méthode P&amp;O

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [17].

$P_{PV_{n-1}}$  : L'enceinne puissance dans le temps  $(t - 1)$

$$\Delta V = V_{PV_n} - V_{PV_{n-1}} \quad (3.26)$$

$$\Delta P = P_{PV_n} - P_{PV_{n-1}} \quad (3.27)$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint [44].

Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [27] :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.
- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Alors Il faut trouver un équilibre entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions climatique.

Figure (3.12) Commenant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation  $\Delta V$  dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de  $P_1 P_2$ , sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [45].

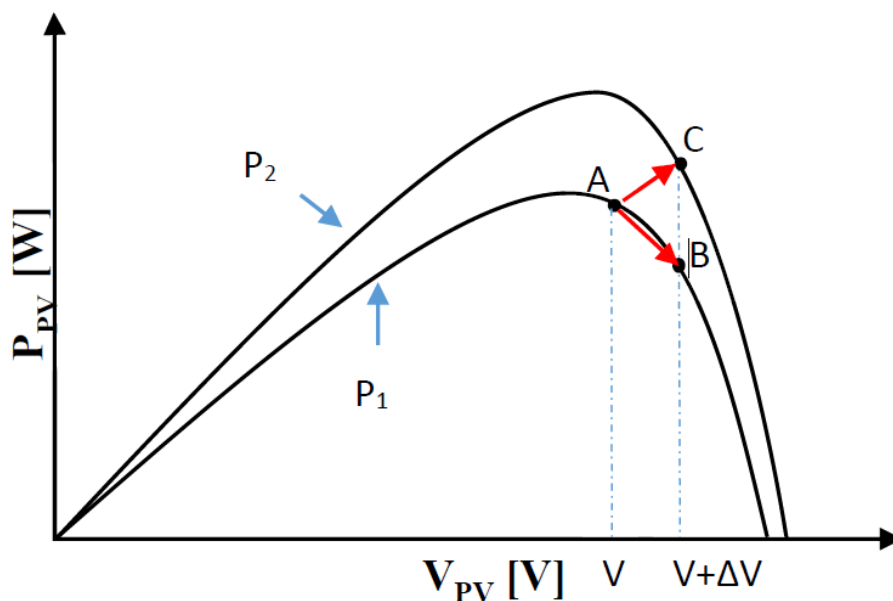


Figure 3.12: Divergence de la méthode P&O

### 3.6.2 Commande a incrémentation de la conductance (Inc cond)

Incrémentation de la conductance est la commande de MPPT qui basée sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM [46].

Son principe est de comparer la conductance ( $G = I_{pv}/V_{pv}$ ) et la conductance incrémentale  $\Delta G = (\Delta I_{pv}/\Delta V_{pv})$  et décider quand augmenter ou diminuer la tension PV pour atteindre le MPP où la dérivée de la puissance est égal à zéro ( $dp_{pv}/dv_{pv} = 0$ ).

La méthode de conductance incrémentale est souvent considéré efficace pour rechercher efficacement le point de puissance maximale [47]. Cependant, l'algorithme à implémenter est souvent complexe et nécessite une grande capacité de calcul, ce qui augmente la période de contrôle du système. La puissance de sortie du champ PV peut être donnée comme:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{pv} = I_{pv} \cdot V_{pv} \\ \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \\ \frac{1}{V_{pv}} \cdot \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \end{array} \right. \quad (3.28)$$

En définissant la conductance PV et la conductance incrémentielle, les rendements,

$$\left\{ \begin{array}{l} G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \\ \Delta G = -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \end{array} \right. \quad (3.29)$$

On obtient :

$$\frac{1}{V_{pv}} * \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = G - \Delta G \quad (3.30)$$

L'équation (3.30) explique que la tension de fonctionnement est inférieure à la tension point de puissance maximale si la conductance est supérieure à la conductivité incrémentale et vice versa.

Ainsi, la tâche de cet algorithme est de suivre la tension point de fonctionnement auquel la conductance est égale à la conductance incrémentale. Par conséquent figure (3.13) [47].

- 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 la droite du PPM,
- si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ , le point de fonctionnement est sur le PPM,

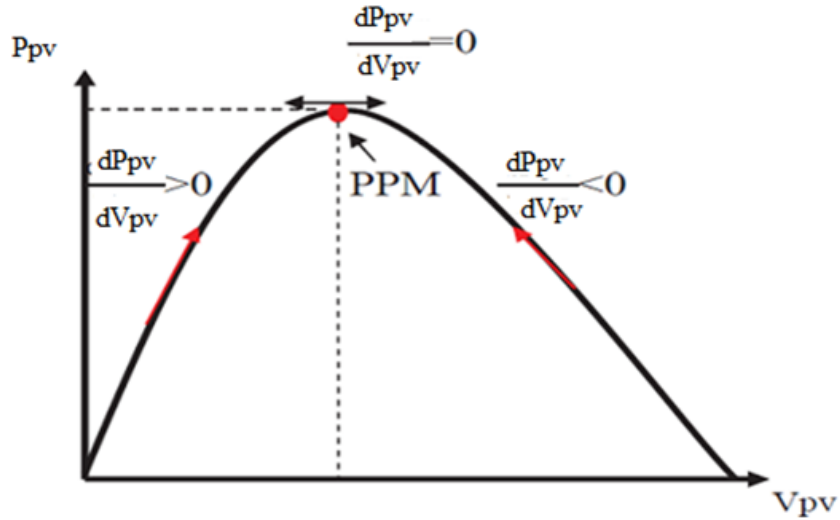


Figure 3.13: Trajectoire par Incrémentation de Conductance

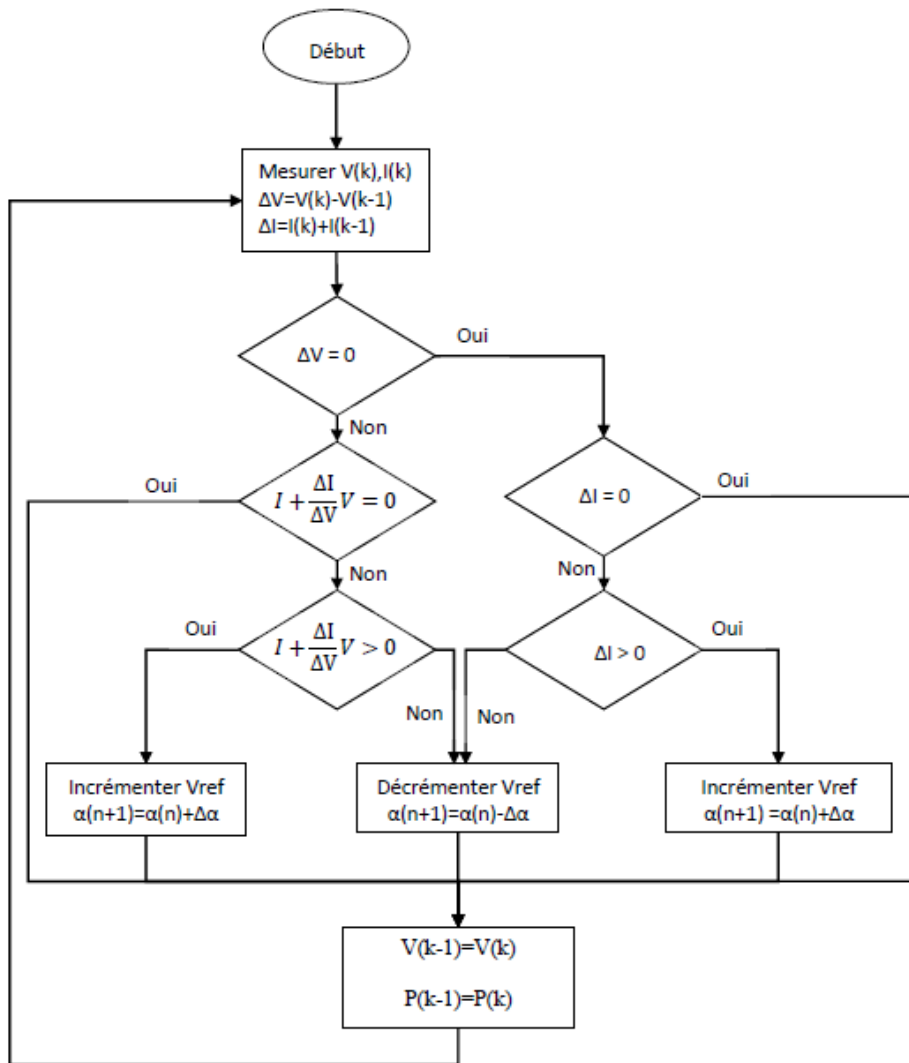


Figure 3.14: Organigramme de la méthode Incrément de Conductance.

### 3.6.3 les méthodes Modernes (méthodes de recherche globale)

#### 3.6.3.1 Méthode à base de réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont des techniques électroniques ils sont Inspiré par la structure du cerveau, Cette fonction permet d'utiliser les ANN dans la conception de systèmes adaptatifs et intelligents, car ils sont capables de résoudre des problèmes complexes.

Les modèles ANN impliquent la création massive de réseaux composés principalement d'éléments non linéaires connus sous le nom de neurones. Chaque modèle implique la formation des réseaux en parallèle pour résoudre des problèmes spécifiques [47].

Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système [39].

Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées.

les réseaux sont constituées des neurones organisé dans trois couches :

- Couche de sortie (Output layer), envoie des informations à un périphérique externe.
- Couche cachée (Hidden layer), en peut trouvé plusieurs couches cachées entre les couches.
- Couche d'entrée (Input layer), reçoit généralement des données d'une source externe.

d'entrée et de sortie. Voir la Figure 3.15

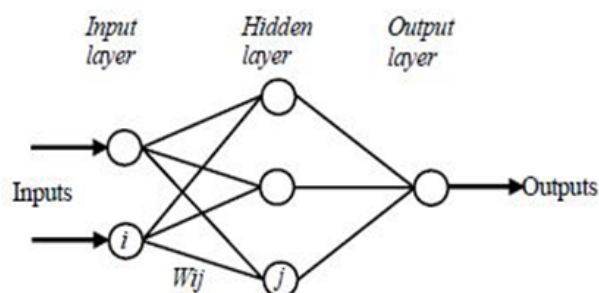


Figure 3.15: Exemple d'un réseau de neurones

Dans les systèmes photovoltaïques, les variables d'entrée peuvent être des paramètres du panneau PV tels que la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) ou le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), données atmosphériques l'ensoleillement (G) et la température (T), ou toute combinaison de ceux-ci, Voir les figures 3(16 .17).

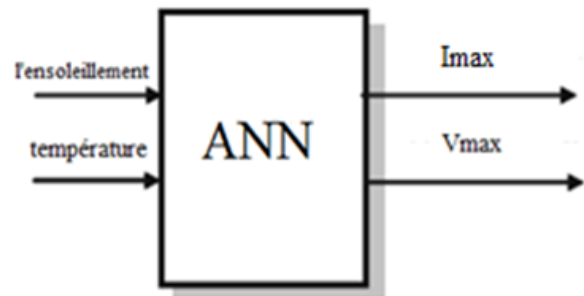


Figure 3.16: Bloc ANN diagramme avec deux entrées neurones

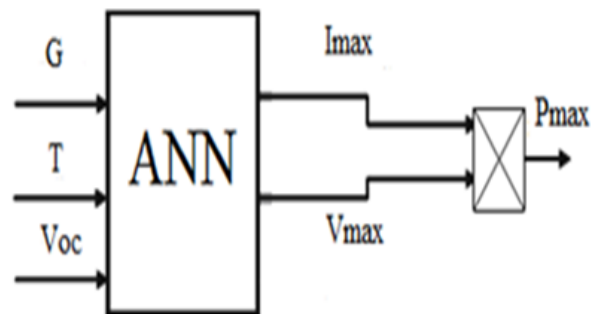


Figure 3.17: Bloc ANN diagramme avec trois entrées

### 3.6.3.2 La Commande MPPT Flou

La poursuite du point MPP par la logique floue est de plus en plus populaire grâce à robuste et relativement simple à élaborer et l'évolution des microcontrôleurs [48].

L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur  $E$  et le changement d'erreur  $\Delta E$  et une variable de sortie  $\Delta\alpha$  (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée, en générale La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont figure (3.18) [48] :

- la fuzzification.
- la lecture de la table de vérité, (inference).
- la defuzzification.



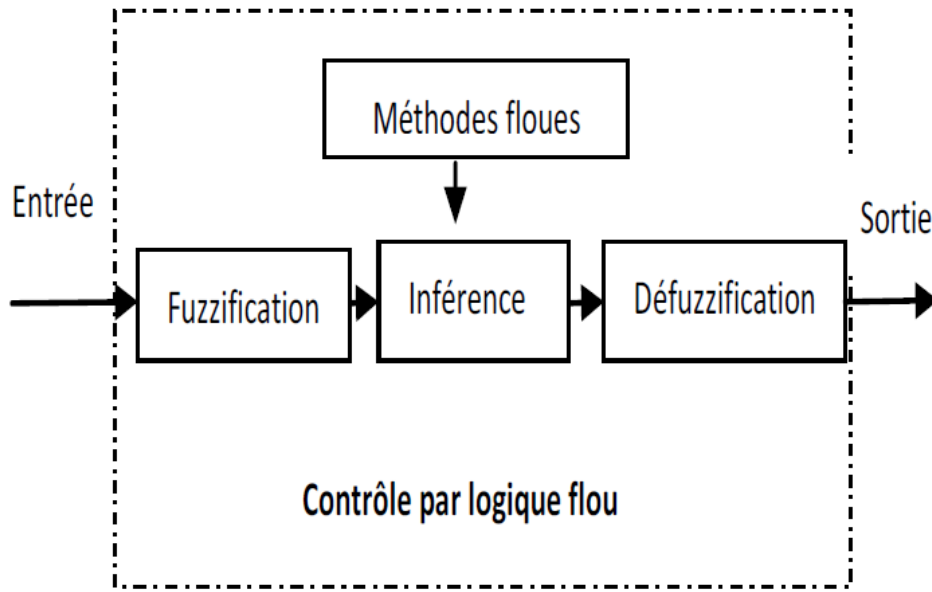


Figure 3.18: Principe de la commande à logique floue

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

- NB: Negative Big,
- NS: Negative Small,
- ZE: Zero,
- PS: Positive Small,
- PB : Positive Big,

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en figure (3.19).

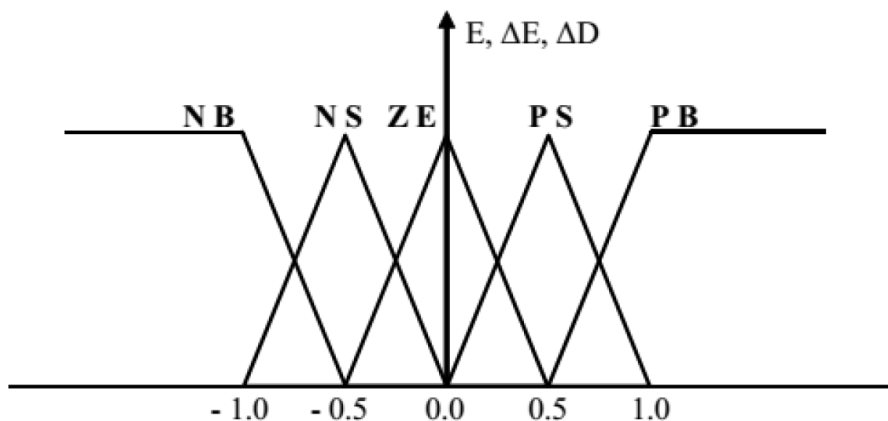


Figure 3.19: structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées  $E$  et  $\Delta E$  sont liées aux équations suivantes :

$$E(n) = \frac{p(n) - p(n-1)}{v(n) - v(n-1)} \quad (3.31)$$

$$\Delta(E) = E(n) - E(n-1) \quad (3.32)$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau I, une valeur est attribuée au paramètre de sortie  $\Delta\alpha$ .

Table 3.1: Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

|               |    |    |    |    |    |
|---------------|----|----|----|----|----|
| E/ $\Delta E$ | NB | NS | ZE | PS | PB |
| NB            | ZE | ZE | NB | NB | NB |
| SN            | ZN | ZN | SN | SN | SN |
| ZE            | SN | ZE | ZE | ZE | PS |
| PS            | PS | PS | PS | ZE | ZE |
| PB            | PB | PB | PB | ZE | ZE |

Le variable linguistique assignée à  $\Delta\alpha$ , dépend des différentes combinaisons entre E et  $\Delta E$ . Par exemple, si les variables d'entrée (E et  $\Delta E$ ), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie  $\Delta\alpha$  est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à  $\Delta\alpha$  s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie  $\Delta\alpha$ , afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [49]- [50].

### 3.6.4 Autres Méthodes de recherche globale

Ces dernières années, les chercheurs ont développé de nombreuses méthodes de recherche plus complexes très rapides et précises talque :

- La méthode (ABC) (Artificial bee colony) est une méthode optimisation inspiré par la manière dont les abeilles recherchent le nectar
- méthode de Gray wolves il est inspiré par la façon dont les loups gris chassent
- l'algorithme de fourmi –Lion inspiré par la technique de chasse des fourmis utilisé par fourmi –Lio
- L'algorithme (PSO) (Particle swarm optimization) inspiré du comportement d'organismes tels qu'une volée d'oiseaux et Poisson d'eau peu profonde. PSO est une méthode d'optimisation qui tente de manière itérative d'améliorer un candidat solution (connue sous le nom de particule) par rapport à une mesure de qualité donnée. Cette dernière méthode possède des plusieurs avantage que les présidant méthodes.

### 3.7 les Critères d'évaluation d'une commande MPPT

Pour choies un type de commande MPPT il faut prendre ces conditions suivant en considération :

- **Simplicité et Coût** Il est important de connaître le niveau de complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implémentation et des pertes liées directement au nombre De calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré.
- **Réponse dynamique** Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible.
- **Flexibilité** Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de Panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux de différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.
- **Compétitive sur une large gamme de puissance** Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM

généralisé par un module PV, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique. [36]

## 3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé brièvement les principaux types des convertisseurs continus-continus le convertisseur BUCK, le convertisseur BOOST et le convertisseur BUCK-BOOST.

Nous avons présenté le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT classique et moderne rencontrées le plus souvent dans la littérature. Tel que l'incrémentation de la conductance (IC), la méthode perturbation et observation 'P&O', la logique floue et les réseaux de neurones, puis d'autres méthodes moderne de recherche globale par exemple (PSO).

Cette dernière sera bien détaillée dans le chapitre suivant, qui présente les résultats de simulation de la commande MPPT basé sur l'algorithme PSO pour optimiser le rendement de GPV.

# L'algorithme PSO, Simulation et Discussion les résultats

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre on va expliquer l'algorithme d'optimisation des essaims de particules (PSO) et faire une simulation de notre travail pour des conditions climatiques variables et avec l'absence et la présence de commande mppt et comparez les résultats.

La fiabilité de la méthode d'optimisation utilisée est testée dans un environnement de co-simulation (MatLab-Simulink / Psim).

Cette co-simulation est utilisée pour accélérer le temps des simulations.

## 4.2 Définition de PSO

L'optimisation par essaim de particules a été introduite, en 1995, par Russel Eberhart, ingénieur en électricité, et James Kennedy, socio-psychologue. Cette méthode se base sur la collaboration des individus entre eux : Chaque particule est définie par sa position (une solution) et sa vitesse [51].

Dans l'optimisation par PSO, la vitesse de chaque particule est modifiée de manière itérative par sa meilleure position personnelle, et la meilleure position trouvée par les particules dans son voisinage. En conséquence, chaque particule recherche autour d'une région définie par sa meilleure position personnelle et la meilleure position de son voisinage. Désormais, nous utilisons  $\gamma_i$  pour désigner la vitesse de la  $i$ ème particule dans l'essaim,  $X_i$  pour désigner sa position,  $P_{ibest}$  pour désigner la meilleure position personnelle et  $g_{best}$  pour désigner la meilleure position globale trouvée par les particules dans leurs voisinages.

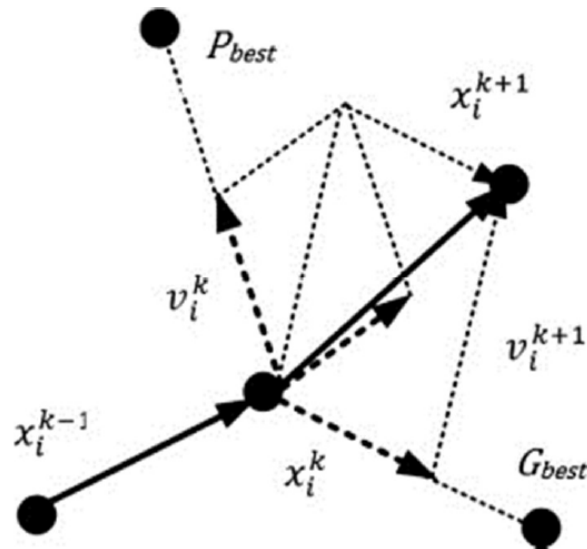


Figure 4.1: le mouvement des Particules dans PSO

La position des particules individuelles est définie par :

$$x_i^j(t+1) = x_i^j(t) + \gamma_i(t+1) \quad (4.1)$$

la vitesse de la  $i$ ème particule  $\gamma_i$  calculée par:

$$\gamma_i(t+1) = \omega \gamma_i(t) + c_1 \text{rand}(0,1) (p_{i \text{ best}}(t) - x_i(t)) + c_2 \text{rand}(0,1) (g_{\text{best}}(t) - x_i(t)) \quad (4.2)$$

Le paramètre  $\omega$  est appelé poids d'inertie et contrôle la grandeur de l'ancienne vitesse  $v$  dans le calcul de la nouvelle vitesse, alors que  $c_1$  et  $c_2$  déterminent la signification de  $P_{ibest}$  et  $g_{best}$ , respectivement.

### 4.3 Applications des algorithmes PSO Commande MPPT

Les méthodes précédemment citées présentent plusieurs inconvénients, en particulier lors de la présence de plusieurs maxima sur la caractéristique  $P(V)$  dus à l'effet de l'ombrage. La garantie de convergence, n'est assurée que pour le cas d'un éclaircissement uniforme. Pour faire face au problème d'existence de plusieurs maxima locaux, nous envisageons ici la mise en œuvre d'une commande MPPT basée sur la technique PSO.

Le système considéré figure (4.2) est une chaîne de conversion générant une tension continue à partir d'un panneau photovoltaïque vers une charge DC à travers un convertisseur DC-DC. Ce dernier, est contrôlé par un dispositif de commande numérique, le *DSP TMS320F2812* dans notre cas, dans lequel l'algorithme développé sera est implémenté.

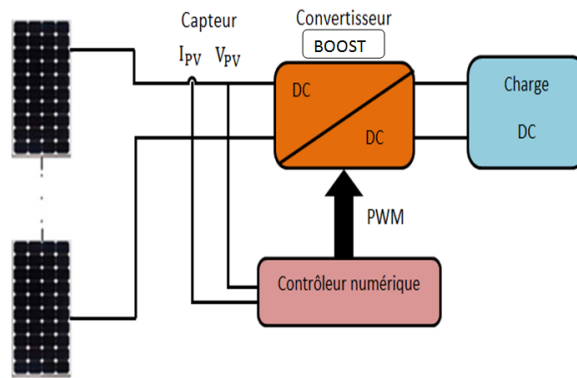


Figure 4.2: Schéma de principe du système proposé.

L'idée générale est de faire varier la charge vue par le GPV du court-circuit jusqu'au circuit ouvert en variant le rapport cyclique du signal PWM (Pulse width Modulation) commandant le convertisseur DC-DC ; autrement dit, faire un balayage par la droite de charge sur toute la caractéristique  $I - V$ .

Le convertisseur DC-DC utilisé dans notre travail, pour interfacier la tension du module photovoltaïque à la charge, est de type Boost qui est capable de fonctionner dans une large gamme de tensions de sortie et pour des charges différentes. L'algorithme de commande MPPT basée sur la technique PSO que nous avons mis en œuvre est donné par l'organigramme de la figure (4.3).

Les étapes principales de cet algorithme sont décrites comme suit :

- **Etape 1** : La position des particules est définie comme étant la valeur du rapport cyclique  $\alpha$  du convertisseur DC-DC, et la fonction coût est choisie en tant que la puissance  $p_{pv}$  générée de l'ensemble du système de production photovoltaïque.
- **Etape 2** : En phase d'initialisation du PSO, les particules peuvent être placées sur des positions fixes ou être placées dans l'espace de manière aléatoire. Fondamentalement, s'il y a des informations disponibles concernant la localisation du point de puissance maximale global PPMG dans l'espace de recherche, il est plus logique d'initialiser les particules autour de ce point. Les particules sont initialisées sur des positions fixes qui couvrent l'espace de recherche  $[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$ .  $\alpha_{max}$  et  $\alpha_{min}$  représentent le rapport cyclique maximal et le rapport cyclique minimal du signal PWM à appliquer sur le convertisseur DC-DC utilisé, respectivement.
- **Etape 3** : Pour chaque particule  $i$ , mesurer la tension  $V_{pv}$  et le courant  $I_{pv}$  du panneau photovoltaïque, ensuite évaluer la fonction coût donnée par la puissance  $P_{pv}$ , Le but de l'algorithme MPPT est de maximiser la puissance générée par le panneau photovoltaïque correspondante. Il convient de noter que, dans le but d'acquérir des échantillons corrects, l'intervalle de temps entre deux évaluations successives de particules doit être supérieur au temps de stabilisation du convertisseur de puissance.

- **Etape 4 :** Mettre à jour les meilleures données individuelles et globales. Si la valeur de la fonction coût (fitness) de la particule  $i$  est meilleure que la meilleure valeur de la fonction coût dans la mémoire  $p_{best}$ , définissez la valeur actuelle comme une nouvelle  $p_{best}$ . Ensuite, choisissez la particule avec la meilleure valeur de la fonction coût de toutes les particules comme  $g_{best}$ .
- **Etape 5 :** Mettre à jour la vitesse et la position de chaque particule. Après que toutes les particules soient évaluées, la vitesse et la position de chaque particule dans l'essaim doivent être mises à jour.

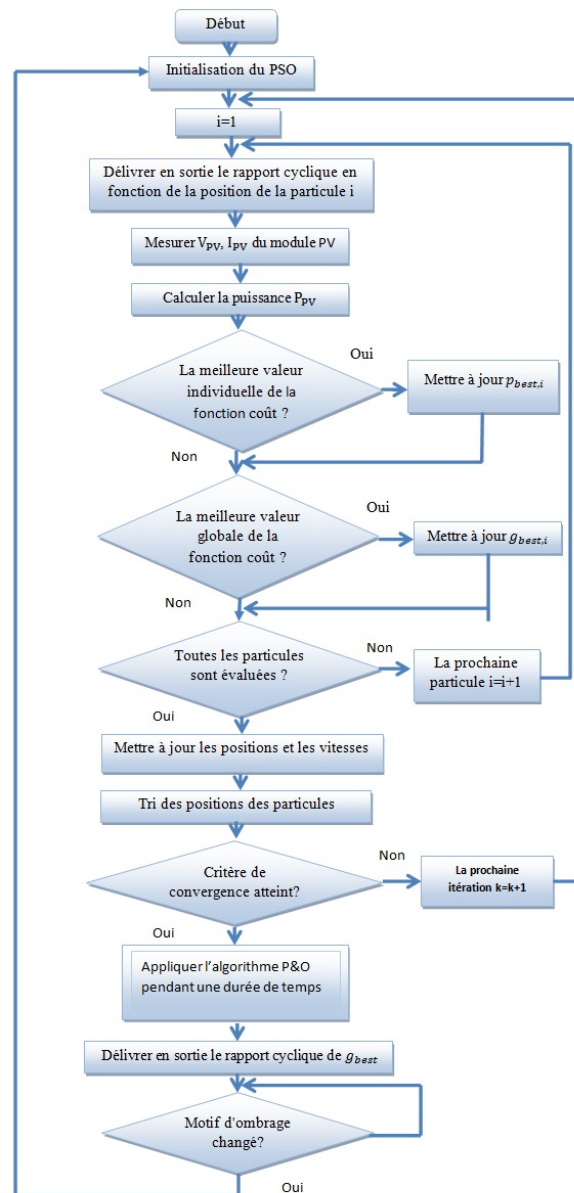


Figure 4.3: Organigramme de l'algorithme proposé

Pour réaliser le MPPT basé sur le PSO à commande directe, chaque solution candidate est définie comme la valeur de rapport cyclique  $\alpha$  du convertisseur DC-DC, de sorte que



le problème d'optimisation a un paramètre à optimiser ( $\alpha = 1$ ). Ainsi, les équations (4.1) deviennent:

$$\alpha_i^j(t+1) = \alpha_i^j(t) + \gamma_i(t+1) \quad (4.3)$$

Et l'équation (4.2) devient:

$$\gamma_i(t+1) = \omega \gamma_i(t) + c_1 \text{rand}(0,1) (p_{i \text{ best}}(t) - \alpha_i(t)) + c_2 \text{rand}(0,1) (g_{\text{best}}(t) - \alpha_i(t)) \quad (4.4)$$

## 4.4 Résultats de simulation

Dans cette partie nous avons effectué une Co-simulation à l'aide de deux logiciels :

- Le simulateur Psim pour la simulation dynamique de la partie électronique (Hacheur Boost et Panneaux solaires). Le schéma de simulation est donné par la figure (4.4).
- SimuLink/MatLab pour programmer l'algorithme de la commande MPPT. Le schéma de simulation est donné par la figure (4.5).

Où

- le bloc SimCoupler permet de faire le couplage entre les deux logiciels.
- le bloc « MatLabFunction » permet de faire appel à un fichier m-file (.m) contenant le programme de la commande MPPT à base de la technique PSO.

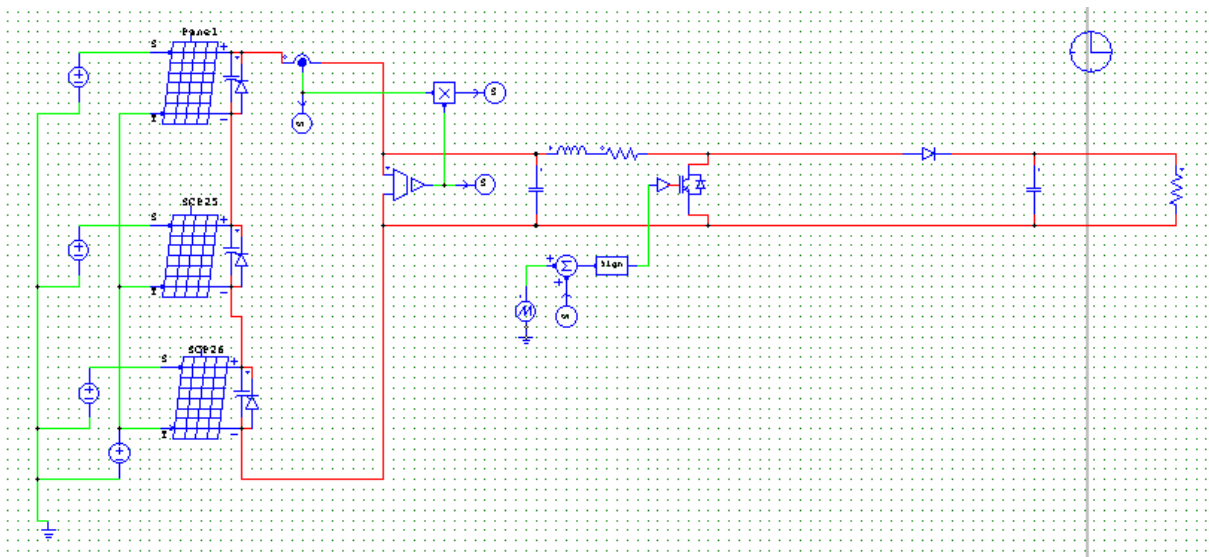


Figure 4.4: La partie électronique de la simulation à l'aide du logiciel Psim

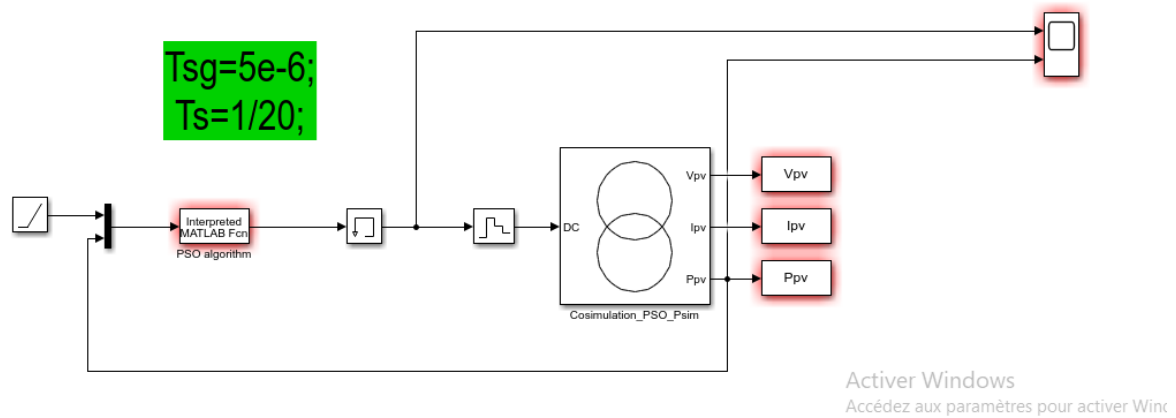


Figure 4.5: La partie commande de la simulation dans l'environnement SimuLink/MatLab

Dans les exemples de simulation suivants, nous allons faire une comparaison entre la puissance que peut délivrer le panneau solaire en statique et celle en dynamique en appliquant l'algorithme de la commande MPPT à base de la technique PSO. Pour conclure sur l'efficacité de l'algorithme considéré une comparaison est effectuée avec l'algorithme perturbé et observé (P&O).

#### 4.4.1 Eclairement uniforme de $1000W/m^2$

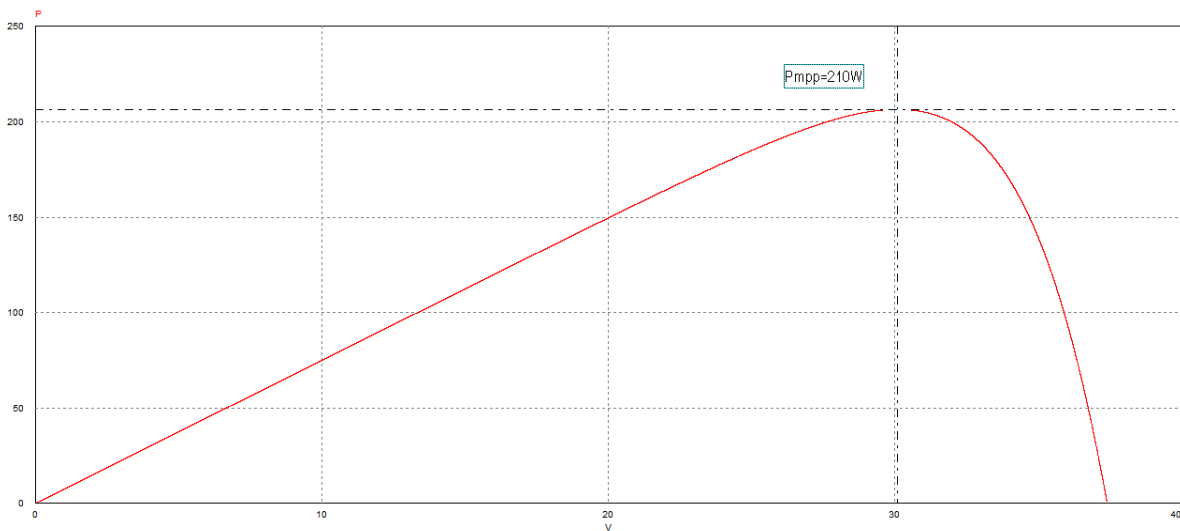


Figure 4.6: Courbe P-V avec éclairement uniforme de  $1000W/m^2$

D'après la figure (4.6), nous constatons que le panneau délivre en régime statique (en faisant une variation linéaire de la tension de 0 jusqu'à  $V_{oc}$ ) une puissance maximale de  $210W$  qui n'est autre que la puissance maximale qu'il peut délivrer.

En régime dynamique, nous avons appliqué la commande MPPT à base des PSO et

la commande MPPT basée sur l'algorithme P&O pour déterminer le point de puissance maximale. Les résultats obtenus sont donnés par les figures (4.7) et (4.8) pour l'algorithme PSO et l'algorithme P&O, respectivement. La variation du rapport cyclique est donnée par la figure (4.9) pour les deux algorithmes. Nous remarquons que, pour un éclairage uniforme, les deux algorithmes convergent vers la même valeur de puissance maximale.

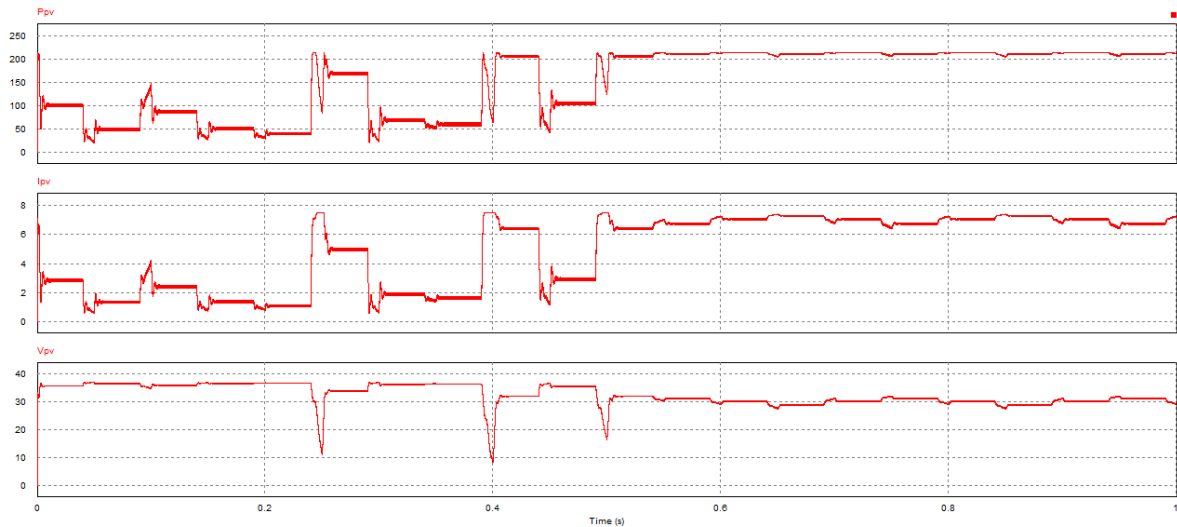


Figure 4.7: Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme PSO

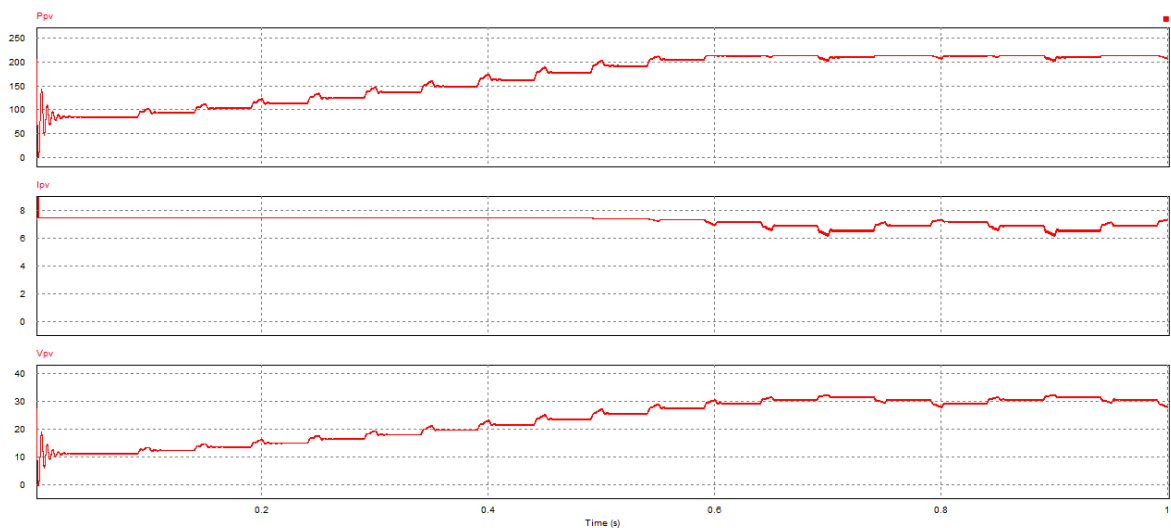


Figure 4.8: Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme P&O

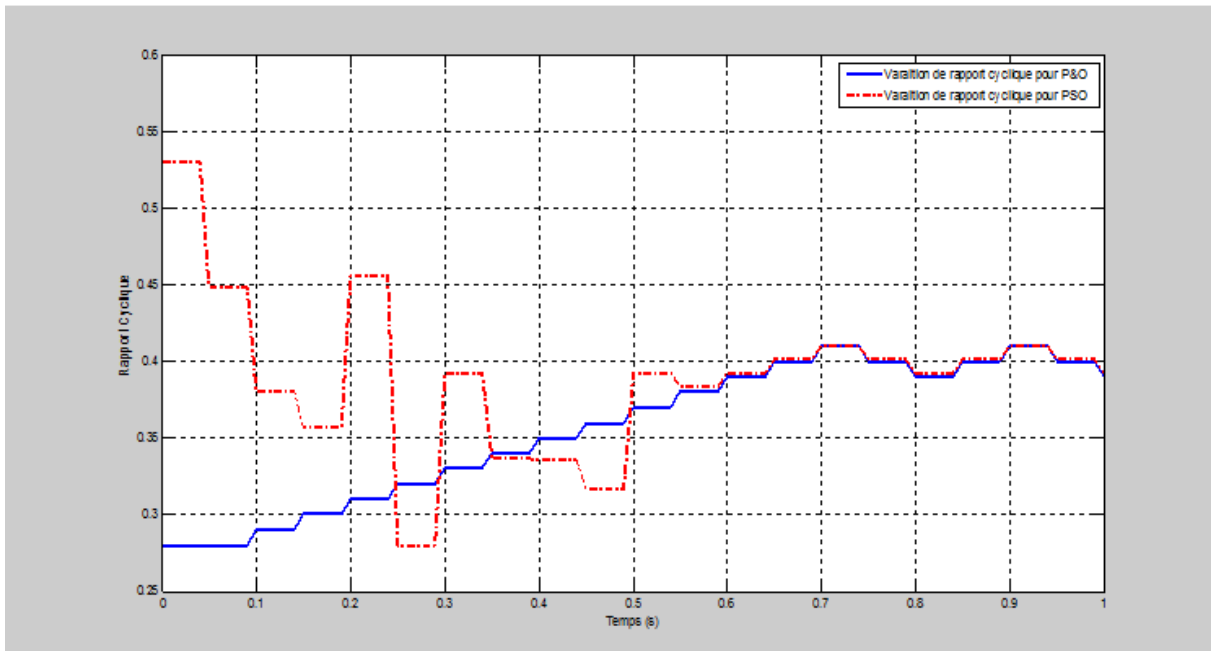


Figure 4.9: Variation du rapport cyclique calculé par l'algorithme de commande MPPT

## 4.4.2 Dans des conditions d'ombrage

Dans cette partie, nous allons provoquer quelques configurations d'ombrage en donnant des éclairagements non uniformes, puis nous comparons les résultats obtenus par les deux commandes MPPT (PSO et P&O).

### 4.4.2.1 Cas de deux maximums

En statique, comme le montre la figure (4.10), la courbe P-V présente deux maximums à cause de l'effet de la diode by-pass.

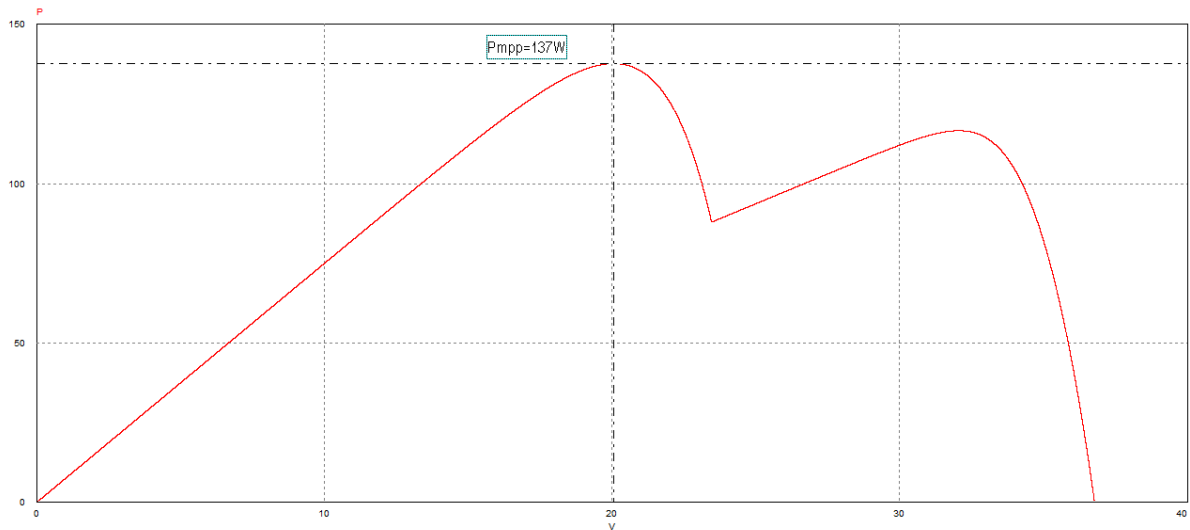


Figure 4.10: Courbe P-V avec des conditions d'ombrage (cas de deux maximums, le max global se trouve avant le max local)

En dynamique, nous obtenons les résultats donnés par les figures (4.11) et (4.12) où nous pouvons voir que les deux algorithmes de la commande MPPT (PSO et P&O) ont bien convergé vers le même optimum.

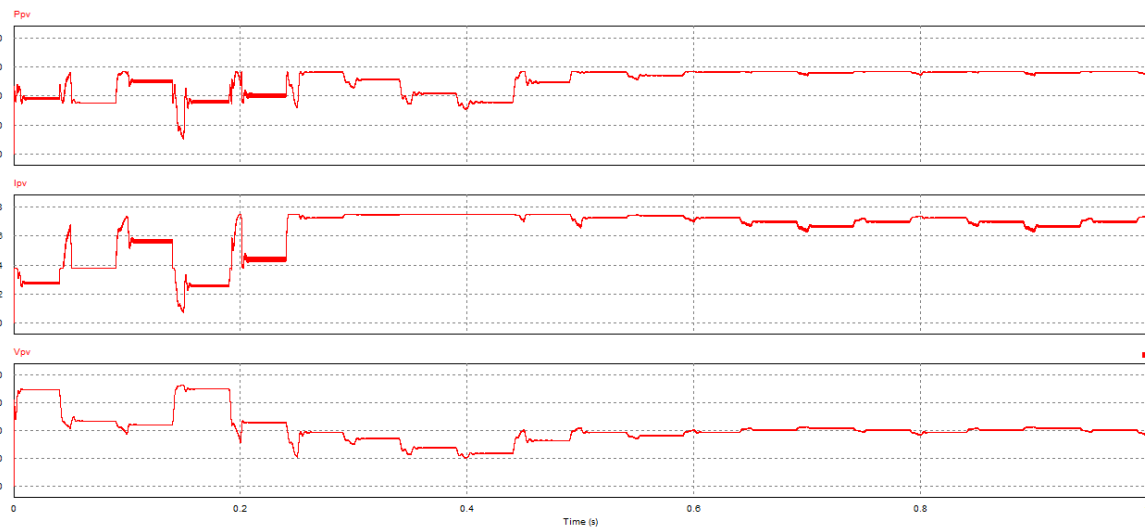


Figure 4.11: Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme PSO (sous l'ombrage)

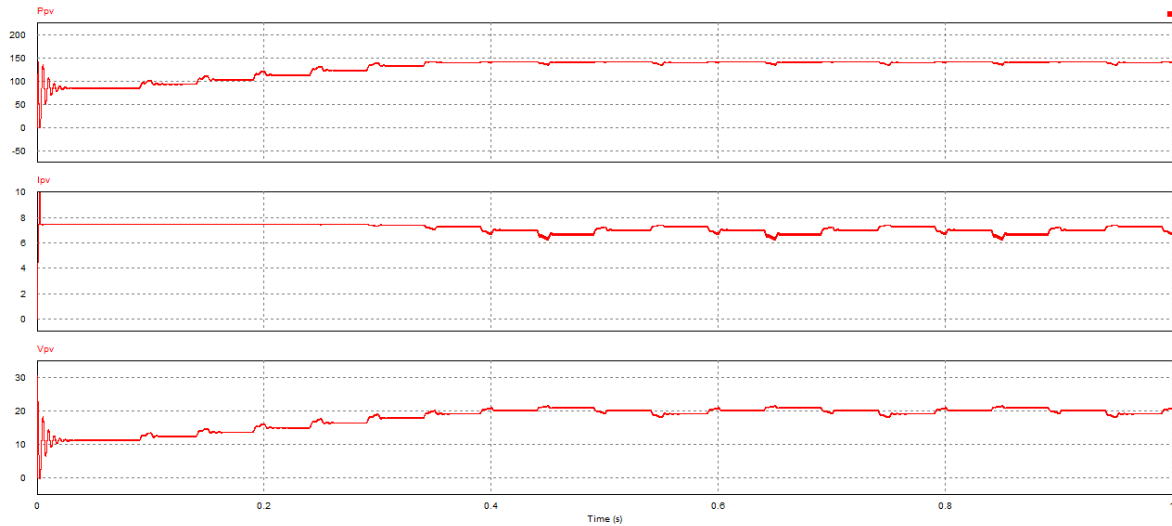


Figure 4.12: Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme P&O (sous l'ombrage)

Pour montrer l'insensibilité de l'algorithme de la commande MPPT à la position du maximum global, nous considérons la courbe P-V donnée par la figure (4.13), nous sommes toujours dans le cas de deux maximums, la différence par rapport à l'exemple précédent est la position du maximum global.

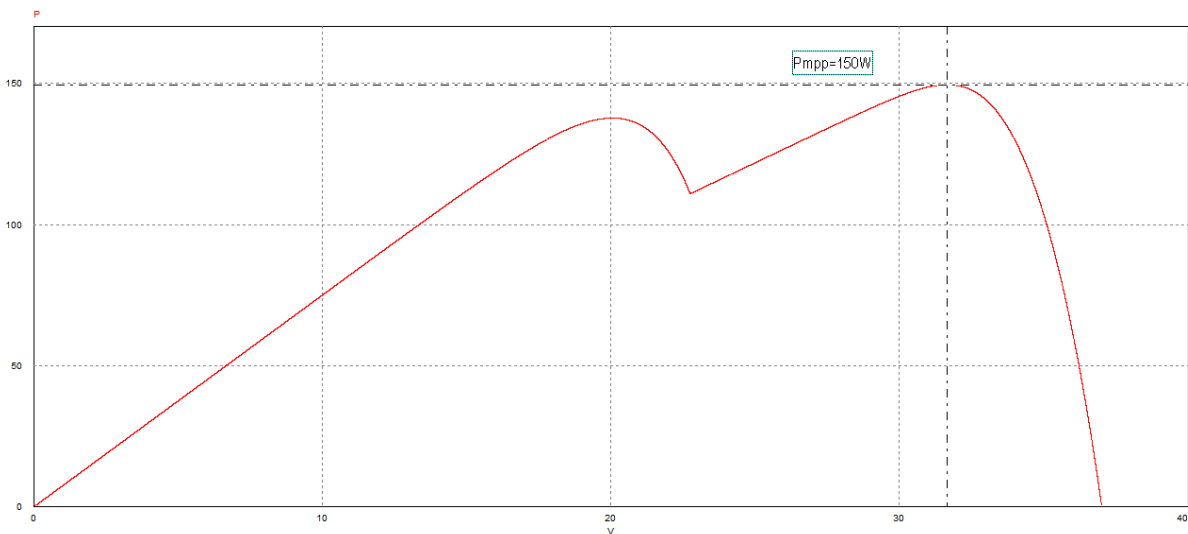


Figure 4.13: Courbe P-V avec des conditions d'ombrage (cas de deux maximums, le max global se trouve après le max local)

Les courbes de la figure (4.14) montrent qu'il y a toujours convergence vers le maximum global (150W) lorsque la commande MPPT basée sur la technique PSO est appliquée. Par contre, les courbes de la figure (4.15) montrent que l'algorithme P&O ne converge pas vers le maximum global (120W), il converge plutôt vers un maximum local. Ceci, montre clairement l'efficacité de l'algorithme de la commande MPPT basé sur la technique PSO en présence des conditions d'ombrage.

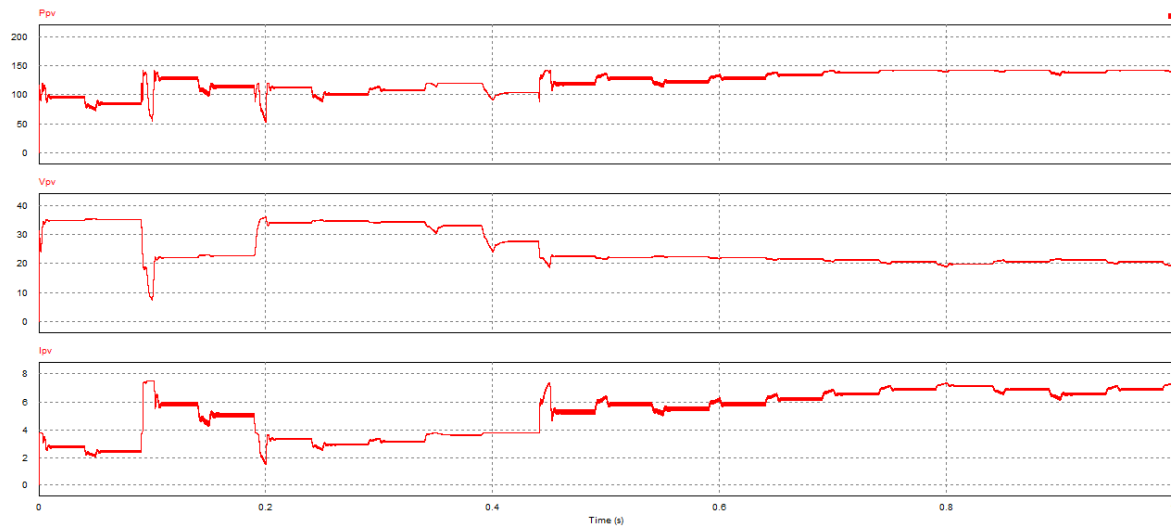


Figure 4.14: Variations de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme PSO (sous l'ombrage)

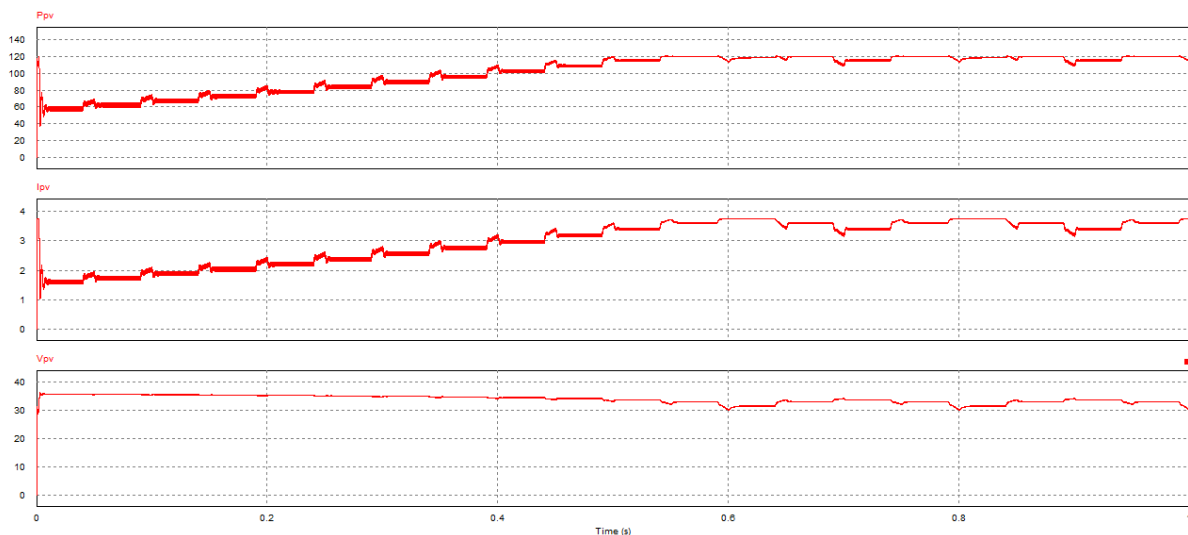


Figure 4.15: Variations de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme P&O (sous l'ombrage)

#### 4.4.2.2 Cas de trois maximums

Les résultats de simulation donnés par les figures (4.17) et (4.18) montrent la convergence de deux algorithmes de la commande MPPT, PSO et P&O respectivement.

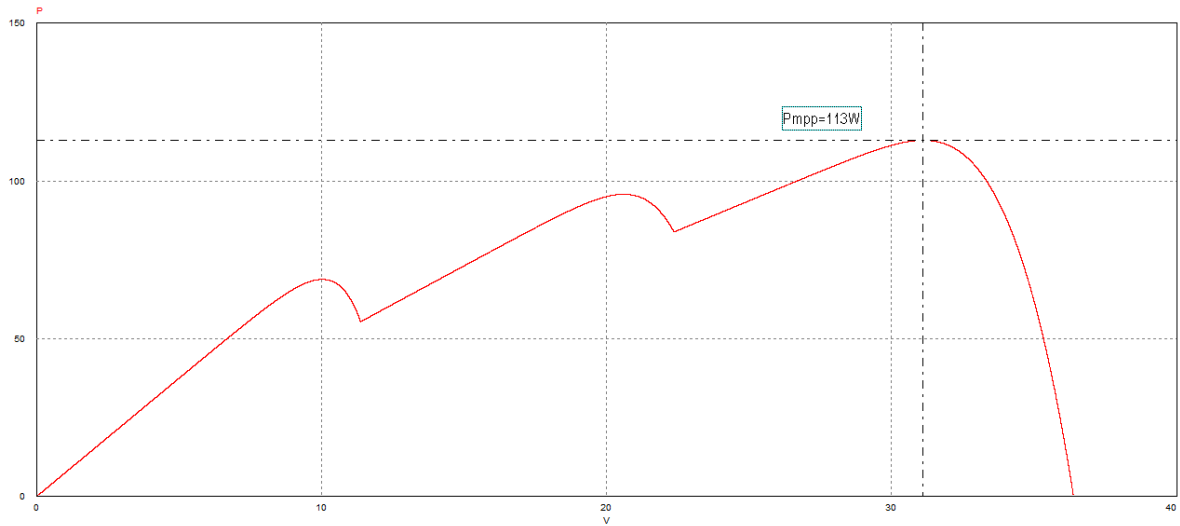


Figure 4.16: Courbe P-V avec des conditions d'ombrage (cas de trois maximums)

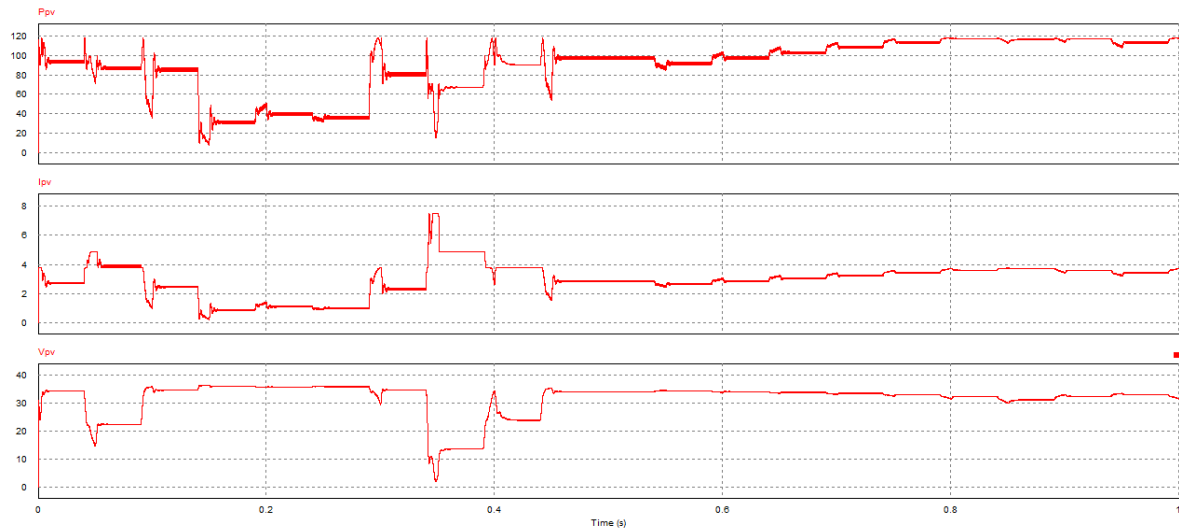


Figure 4.17: Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme PSO (sous l'ombrage, cas de 3 maximums)



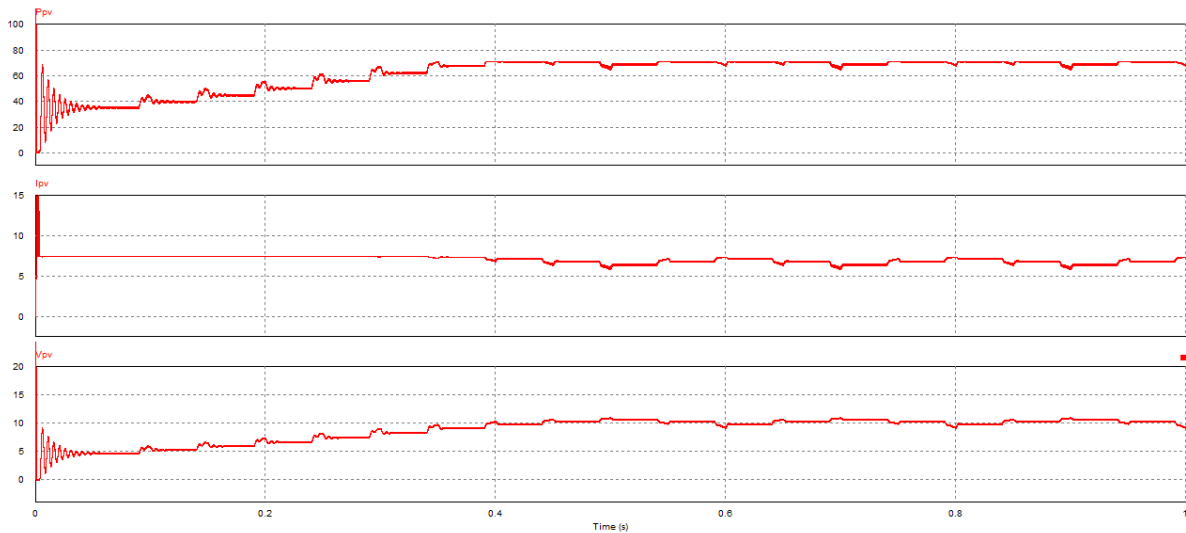


Figure 4.18: Variation de la puissance, du courant et de la tension du panneau solaire pendant le temps de simulation par l'algorithme P&O (sous l'ombrage, cas de 3 maximums)

Dans ce cas, l'algorithme de commande MPPT basée sur la technique PSO a bien convergé vers le maximum global (117W), contrairement à l'algorithme classique P&O (71W) qui n'a pas pu converger vers ce maximum

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis au point l'algorithme de la commande MPPT basé sur la technique d'optimisation par essaim de particules, un convertisseur de type Boost est utilisé pour effectuer les simulations afin montrer l'efficacité de l'algorithme considéré. Les résultats de comparaison montrent bien l'efficacité de la commande MPPT basée sur la technique PSO en présence des conditions d'ombrage où les algorithmes classiques, tel que l'algorithme P&O, ne peuvent pas donner des résultats satisfaisants.

## 4.6 Conclusion générale

Le travail accompli dans ce mémoire a été consacré à l'étude et la simulation d'un générateur photovoltaïque commandé par une méthode de poursuite du point maximum de puissance MPPT basé sur l'algorithme d'optimisation PSO.

A la fin de ce travail on peut résumer notre étude par les points suivants :

Dans la première phase, nous avons commencé par introduire le lecteur pas à pas au domaine des systèmes photovoltaïque en rappelant quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que leur type avec à la fin un aperçu de cette énergie en Algérie.

Dans la deuxième phase, nous avons attaqué la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques d'une cellule et module photovoltaïque ainsi que ses performances sous l'influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement) et l'effet des diodes by-pass.

Dans la troisième phase, nous avons présenté les trois types principaux des convertisseurs DC-DC puis nous avons détaillé le convertisseur Boost qui représente étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge dans ce travail. Le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT est aussi évoquées dans cette partie, avec le détail des différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles.

Dans la dernière phase l'algorithme PSO a été utilisé pour déterminer le point maximal de puissance du générateur PV utilisé, lorsque ce dernier est soumis à un ombrage partiel. Le PSO utilise des recherches réparties sur tout l'espace de recherche, puis il provoque toutes les particules à manifester un effet d'essaim, puis approcher progressivement le meilleur point de fonctionnement du système PV ce qui optimise sa puissance de sortie sous n'importe quelles conditions de météorologiques.

La fiabilité et la faisabilité de la stratégie d'optimisation de puissance utilisé a été vérifiée et approuvée en utilisant un environnement de co-simulation MATLAB Simulink / PSIM afin. Tel que les résultats de comparaison avec un algorithme classique de types PsO ont montré l'efficacité de la méthode PSO.

# Bibliography

- [1] Mohamed Salah Ait Cheikh. *Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*. PhD thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [2] Adouane Mabrouk. Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique. *Mémoire de magister en électricité solaire de l'école Nationale Polytechnique El Harrach, ALGER*, 2008.
- [3] Pierre Bessemoulin and Jean Oliiviéri. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. *La météorologie*, 2000.
- [4] Omar Boukli-Hacene. *Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleur gestion énergétique*. PhD thesis, 2011.
- [5] Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage du français, Jimmy Royer, and Eric J Schiller. *Le pompage photovoltaïque: Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens*. Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage du français, 1998.
- [6] Med Ayoub MEDJAOUI and Yousra LAKHDARI. *Étude expérimentale d'un système photovoltaïque alimentant un électrolyseur à membrane échangeuse de protons*. PhD thesis.
- [7] Mustapha Belarbi. *Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome*. PhD thesis, University of sciences and technology in Oran, 2015.
- [8] Alexandre Joukoff. Climatologie du rayonnement solaire. *Ciel et terre*, 107:59, 1991.
- [9] DIRECTION DE LA SANTE. Rapport d'activités 2005. 2007.
- [10] Olivier Delbard. *Dictionnaire de l'environnement et du développement durable*. 12-21, 2011.

- [11] Zolikha ZERROUKI and Rym BEREKSI REGUIG. *Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome*. PhD thesis, 2017.
- [12] Wassila BOURSALI. *Modélisation et simulation de l'influence de la résistance série sur les caractéristiques  $I(V)$   $P(V)$  d'une cellule photovoltaïque*. PhD thesis, 30-10-2017.
- [13] C Zidani, F Benyarou, and B Benyoucef. Simulation de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidentes sur un capteur plan pour la ville de tlemcen en algérie. *Rev. Energ. Ren*, 6(2), 2003.
- [14] Salaheddine Bensalem. *Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires*. PhD thesis, 2018.
- [15] Wafa BENSACI. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande mppt. *Thème de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla*, 2012.
- [16] Ibrahim BENDJAMAA. *Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque*. PhD thesis, 2012.
- [17] Stéphane Vighetti. *Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion*. PhD thesis, 2010.
- [18] R Khezzer, M Zereg, and A Khezzer. Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique  $i_v$  d'un module photovoltaïque. *Revue des énergies renouvelables*, 13(3):379–388, 2010.
- [19] L Angelino, D Baras, and L Wilvers. Chapitre 1: Quels facteurs considérer pour l'introduction des pompes à chaleur en rbc? et s'agit-il réellement d'une option plus verte? *Mélanges: Les Bruxellois et les éco-innovations autour de la maison*, page 14.
- [20] Miloud BENMEDJAHED. *Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien et son impact sur l'environnement*. PhD thesis, 2013.
- [21] Weidong Xiao and William G Dunford. A modified adaptive hill climbing mppt method for photovoltaic power systems. In *2004 IEEE 35th annual power electronics specialists conference (IEEE Cat. No. 04CH37551)*, volume 3, pages 1957–1963. Ieee, 2004.
- [22] Said Bentouba, Aek Slimani, and Med Seghir Boucherit. Le pompage photovoltaïque: un outil de développement des régions du sud d'algérie.

- [23] B Chikh-Bled, I Sari-Ali, and B Benyoucef. Méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïque. *Revue internationale d'héliotechnique*, (41):25–30, 2010.
- [24] Abderrahmane Hamidat. Le solaire thermique en algérie: Histoire et perspectives. *Bulletin des Energies renouvelables*, (22), 2012.
- [25] Adil Marouf. Création d'une entreprise d'installation des panneaux solaires.
- [26] Malika Madani. "réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces". *Mémoire de Magister à l'Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen*, 2006.
- [27] Ahmed HAKOUMI, Abdeldjalil BENAMAR, Touhami GHITAOUI, et al. *Commande MPPT et contrôle d'un systemephotovoltaïque 3KW par la logique floue*. PhD thesis, Université Ahmed Draïa-Adrar, 2019.
- [28] A Ould Mohamed Yahya, A Ould Mahmoud, and I Youm. Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque. *Revue des Energies Renouvelables*, 11(3):473–483, 2008.
- [29] Med Nadjib-Charaf Eddine MECHALIKH-HAMADA. *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau*. PhD thesis.
- [30] BORNİ Abdelhalim. Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire. 2017.
- [31] B Mamri and M Zaidi. contribution de systèeme photovoltaïque avec pompage. *Mémoire d'ingénieur en électronique, Université de Constantine*, 2006.
- [32] Alain Ricaud. Photopiles solaires, presses polytechniques et universitaires romandes. *Lausanne, Suisse*, 1997.
- [33] Halouma Benis. Contribution à la modélisation du problème de« hot spot» dans les modules solaire photovoltaïque occultés. 2008.
- [34] Angel Cid Pastor. *Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques*. PhD thesis, 2006.
- [35] M Moulay-Amar and M Loghouini. Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque. *Mémoire d'ingéniorat, université de Ouargla, Algérie*, 2005.
- [36] Cedric Cabal. *Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovotaïque*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.

- [37] Fateh Ferrah. Etude et simulation d'un étage mppt pour un système à énergie renouvelable. 2013.
- [38] Damien Guilbert. Dimensionnement des composants magnétiques d'un convertisseur dc/dc boost entrelacé tolérant aux défauts pour des applications véhicule électrique à pile à combustible. 2014.
- [39] Bogdan M Wilamowski and Xiangli Li. Fuzzy system based maximum power point tracking for pv system. In *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02*, volume 4, pages 3280–3284. IEEE, 2002.
- [40] TOUAMA Tariq and HAFIDI Nouh. *Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque*. PhD thesis, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.
- [41] Jordana Bratt. *Grid connected PV inverters: modeling and simulation*. PhD thesis, Engineering, 1911.
- [42] BENADEL Faiza. *Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV*. PhD thesis, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2016.
- [43] Djamila Rekioua and Ernest Matagne. *Optimization of photovoltaic power systems: modelization, simulation and control*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [44] Mohamed Amarouyache. Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque. 2014.
- [45] Akihiro Oi. Design and simulation of photovoltaic water pumping system. *California Polytechnic State University*, 2005.
- [46] Tae-Yeop Kim, Ho-Gyun Ahn, Seung Kyu Park, and Youn-Kyun Lee. A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation. In *ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No. 01TH8570)*, volume 2, pages 1011–1014. IEEE, 2001.
- [47] Hanen Abbes, Hafedh Abid, Kais Loukil, Ahmad Toumi, and Mohamed Abid. Etude comparative de cinq algorithmes de commande mppt pour un système photovoltaïque. *Revue des Energies Renouvelables*, 17(3):435–445, 2014.
- [48] Reda Merahi and Rachid Chenni. *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques*. PhD thesis, 2018.

- [49] Chung-Yuen Won, Duk-Heon Kim, Sei-Chan Kim, Won-Sam Kim, and Hack-Sung Kim. A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller. In *Proceedings of 1994 Power Electronics Specialist Conference-PESC'94*, volume 1, pages 396–403. IEEE, 1994.
- [50] Mummadi Veerachary, Tomonobu Senjyu, and Katsumi Uezato. Feedforward maximum power point tracking of pv systems using fuzzy controller. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 38(3):969–981, 2002.
- [51] Christian Blum and Daniel Merkle. Swarm intelligence. *Swarm Intelligence in Optimization*; Blum, C., Merkle, D., Eds, pages 43–85, 2008.