

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire BOUSSOUF Abdelhafid -Mila
Institut des Sciences et Technologie
Département de Génie Mécanique et Électromécanique



N° Ref :.....

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER
Spécialité : Électromécanique

Maximum power point trackers (MPPT) pour un
système PV par des méthodes classiques et des
méthodes intelligentes.

Réalisé par :
- GHERRAZ FERIEL
- MEDJDOUB RIM

Soutenu devant le jury :

Dr. K. Himour
Dr. S. Dib
Dr. S. Bouchekouf

Président
Examinatrice
Encadreur

Année universitaire : 2023/2024

Dédicace

Le voyage n'a été ni court ni ne devrait être le rêve bientôt ni la route était encombrée d'installations, mais je l'ai fait.

Je dédie mon diplôme à celui dont je porte fièrement le nom à celui dont je récolte les épines.

Ma façon d'ouvrir la voie à la science à mon père. Après le crédit de Dieu, ce dans quoi je suis appartient à mon père, un homme qui n'a pas reçu même une fraction de ce que nous avons reçu, et un homme qui a cherché tout au long de sa vie à être meilleur que lui.

J'ai la main invisible qui a enlevé mes épines, et qui a enduré chaque moment de douleur Je l'ai traversé et elle m'a soutenu à mon faible et comique, "Sweet Mom."

Pour ma famille

Pour mes frères et camarades des années, et pour tous ceux qui ont été utiles et de bonne foi de cette façon sont reconnaissants.

Pour vous tous, je n'aurais pas prié si ce n'était pour vous à distance de Dieu.

RIM

Avant tout nous remercions tout d'abord Allah de nous avoir donné le courage, la force, la santé, et la patience pour pouvoir accomplir ce travail.

Nous remercions notre encadreur pour ses précieux conseils, son aide et ses orientations.

Notre remerciements vont aussi aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui ont été toujours à mes côtés pour leur générosité et leurs sacrifices.

Et me donner le courage pour terminer mes études.

À tout ma famille.

A mon amie Ahlam

FERIEL

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-puissant de nous avoir donné le souffle de vie, le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et c'est grâce à lui que ce travail a pu être réalisé

Nos vifs et sincères remerciements à notre encadreur **Mme. S. BOUCHEKOUF**, vous nous avez bien guidés dans ce travail de recherche, en nous donnant inlassablement beaucoup de votre temps.

Aux membres du jury, vous nous faites un grand honneur en acceptant de juger ce modeste travail, nous vous en remercions et vous témoignons notre profonde et respectueuse gratitude



Listes des abréviations

| | |
|-----------------|---|
| AsGa | Arséniure de gallium |
| CdTe | tellure cadmiéenne |
| PV | Photovoltaïque |
| DC | Direct current (courant continue) |
| AC | Alternative current (courant alternatif) |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
| GMPPT | Les méthodes Global Maximum Power Point Tracking |
| PPM | Recherche du Point de Puissance |
| MPP | Point de fonctionnement à Puissance Maximale |
| P&O | L'algorithme Perturbation et Observation |
| PSO | L'algorithme d'optimisation d'essaim des particules |
| GWO | L'algorithme d'Optimisation de Loup gris |
| INC | La méthode Incrément des conductances |
| α | Le rapport cyclique du convertisseur |
| R | La charge |
| L | l'inductance |
| D | Diode |
| Tr(S) | l'interrupteur |
| GPV | Générateur Photovoltaïque |
| VPPM | La tension au point de puissance maximale |
| IPPM | Le courant au point de puissance maximale |
| PPPM | Puissance au point de puissance maximale |
| CS | convertisseur statique |
| V_{co} | La tension en circuit ouvert |
| I _{cc} | courant de court- circuit |

| | |
|------------|---|
| CSA | l'algorithme de recherche de coucou |
| FA | l'algorithme de luciole clignotante |
| EA | algorithmes évolutifs |
| P_{best} | La meilleure position personnelle de la particule |
| G_{best} | La meilleure position des particules dans l'ensemble population |
| ω | le poids d'inertie. |
| $c1, c2$ | Coefficient d'accélération |
| $r1, r2$ | nombres positifs aléatoires entre 0 et 1. |
| d_i | Rapport cyclique |
| V_i | La tension d'entrée du convertisseur |
| I_i | Le courant d'entrée du convertisseur |
| P_{pv} | La puissance du module PV |
| I_{pv} | Le courant du module PV |
| k | le nombre d'itérations |

Sommaire

| | |
|----------------------------|---|
| Dédicace | |
| Remerciements | |
| Listes des abréviations | |
| Sommaire | |
| Liste des figures | |
| Listes des tableaux | |
| Introduction Générale..... | 1 |

Chapitre I : Énergie et systèmes Photovoltaïques

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction | 4 |
| I.2. Les types d'énergies renouvelables | 4 |
| I.3. Le rayonnement solaire | 5 |
| I.3.1. Le rayonnement direct | 5 |
| I.3.2. Le rayonnement diffusé | 5 |
| I.3.3. Le rayonnement solaire réfléchi (L'albédo)..... | 5 |
| I.3.4. Le rayonnement global | 6 |
| I.4. Les types d'énergie solaire | 6 |
| I.4.1. L'énergie solaire thermique | 6 |
| I.4.2. L'énergie solaire thermodynamique : | 6 |
| I.4.3. L'énergie solaire photovoltaïque | 7 |
| I.4.3.1. L'effet photovoltaïque | 7 |
| I.5. La cellule photovoltaïque | 7 |
| I.5.1. Structure d'une cellule photovoltaïque..... | 8 |
| I.5.2. Principe de fonctionnement | 9 |
| I.5.3. Différents types de cellules..... | 9 |
| I.5.3.1. Le silicium monocristallin | 10 |
| I.5.3.2. Le silicium poly cristallin | 10 |
| I.5.3.3. Le silicium amorphe | 10 |
| I.5.4. Comparaison des différentes technologies | 11 |
| I.6. Module photovoltaïque | 12 |

| | |
|--|----|
| I.6.1. Rôle du module solaire PV | 12 |
| I.7. Les panneaux solaires photovoltaïques | 12 |
| I.7.1. Association en série | 13 |
| I.7.2. Association en parallèle | 13 |
| I.7.3. Association série-parallèle | 13 |
| I.8. Le système photovoltaïque | 14 |
| I.8.1. Systèmes PV isolé (autonome) | 15 |
| I.8.2. Systèmes PV connectés au réseau | 16 |
| I.8.3. Système PV hybride | 16 |
| I.9. Composantes de système PV | 17 |
| I.9.1. Le générateur | 17 |
| I.9.2. Le système de conversion | 18 |
| I.9.2.1. Le convertisseur DC– DC | 18 |
| I.9.2.2. Le convertisseur DC– AC | 18 |
| I.9.3. Le système de stockage | 19 |
| I.9.3.1. Les batteries | 19 |
| I.9.4. Le système de câblage et raccordement | 19 |
| I.9.4.1. Les câbles | 19 |
| I.9.4.2. Les boîtes de raccordements | 20 |
| I.9.5. Le système de régulation | 20 |
| I.9.5.1. Le régulateur | 20 |
| I.9.5.2. Les caractéristiques de régulateur | 21 |
| I.9.5.3. Principe de fonctionnement de régulateur | 21 |
| I.10. Les types de régulateur | 22 |
| I.10.1. Type de régulateur PWM | 22 |
| I.10.2. Type de régulateur MPPT | 22 |
| I.11. Les avantages et les inconvénients du système PV | 23 |
| I.12. Conclusion | 24 |
| | |
| Chapitre II : Modélisation de la commande MPPT par les méthodes classiques et intelligentes | |
| II.1. Introduction | 26 |

| | |
|--|----|
| II.2. Système Photovoltaïque..... | 26 |
| II.3. Principe conversion photovoltaïque..... | 27 |
| II.4. Convertisseur DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire..... | 27 |
| II.4.1. Choix du convertisseur DC-DC | 27 |
| II.4.2. Convertisseur élévateur (Boost) :..... | 28 |
| II.4.2.1. Principe de fonctionnement | 28 |
| II.5. Étage d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et une charge | 31 |
| II.6. La commande de la puissance maximale(MPPT)..... | 31 |
| II.6.1. Principe de la commande MPPT | 32 |
| II.6.2. Critères de sélection d'une commande MPPT | 33 |
| II.7. Classification des Commandes MPPT :..... | 34 |
| II.7.1. les méthodes conventionnelles | 34 |
| II.7.2. Les Méthodes non conventionnels (intelligentes)..... | 35 |
| II.8. Méthode de Perturbation et Observation (P&O) | 36 |
| II.8.1. Les avantages et les inconvénients | 39 |
| II.9. La méthode d'optimisation d'essaim des particules (PSO) | 39 |
| II.9.1. Commande MPPT d'un system PV par PSO | 40 |
| II.9.2. Les avantages et les inconvénients de PSO..... | 41 |
| II.10. L'algorithme d'optimisation du loup gris (Grey Wolf Optimization GWO) | 42 |
| II.10.1. Inspiration..... | 42 |
| II.10.2. Etapes de la chasse | 43 |
| II.10.3. Modélisation mathématique : | 43 |
| II.10.4. Implémentation du MPPT basé sur GWO:..... | 46 |
| II.10.5. Les avantages et les inconvénients de GWO..... | 47 |
| II.11. Conclusion | 48 |

Chapitre III : Simulation et Résultats

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction | 50 |
| III.2. L'outil MATLAB/Simulink | 50 |
| III.3. Le Système Photovoltaïque | 51 |
| III.3.1. Caractéristiques de Générateur Photovoltaïque | 51 |
| III.3.2. Caractéristiques du GPV avec l'hacheur Boost et la commande MPPT | 53 |

| | |
|--|----|
| III.4. Simulation des résultats | 54 |
| III.4.1. Simulation avec la méthode P&O | 54 |
| III.4.2. Simulation avec la méthode PSO | 56 |
| III.4.3. Simulation avec la méthode GWO | 57 |
| III.4.4. Comparaison des trois méthodes P&O, PSO et GWO | 59 |
| III.5. Etudes des trois méthodes pour des conditions climatiques variables | 59 |
| III.5.1. Simulation avec la commande P&O | 60 |
| III.5.2. Simulation avec la méthode PSO | 62 |
| III.5.3. Simulation avec la commande GWO | 64 |
| III.6. Etudes des méthodes MPPT pour des conditions d'ombrage partiel | 66 |
| III.6.1. Ombrage Partiel du générateur PV | 66 |
| III.6.2. Comparaison des techniques MPPT | 71 |
| III.6.3. Interprétation des résultats | 72 |
| III.7. Conclusion | 73 |
| Conclusion générale | 75 |
| BIBLIOGRAPHIE | 78 |
| RESUME | 84 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I-1 : Les types d'énergies renouvelables. | 4 |
| Figure I-2 : Composants du rayonnement solaire. | 6 |
| Figure I-3 : L'effet Photovoltaïque..... | 7 |
| Figure I-4 : Une cellule photovoltaïque | 8 |
| Figure I-5 : Synoptique d'une cellule solaire | 9 |
| Figure I-6 : Principe fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. | 9 |
| Figure I-7 : Cellule monocristallin..... | 10 |
| Figure I-8 : Cellules monocristallin et multicristallin..... | 10 |
| Figure I-9 : Les cellules en silicium amorphe | 11 |
| Figure I-10 : Composition d'un module solaire photovoltaïque | 12 |
| Figure I-11 : Association de N modules solaires en série | 13 |
| Figure I-12 : Association des modules solaires en parallèle..... | 13 |
| Figure I-13 : Association mixte des modules solaires | 14 |
| Figure I-14 : L'angle et l'orientation des panneaux | 14 |
| Figure I-15 : Système photovoltaïque plus détaillé | 15 |
| Figure I-16 : Installation photovoltaïque autonome..... | 15 |
| Figure I-17 : Schéma d'une installation photovoltaïque connecte au réseau..... | 16 |
| Figure I-18 : Installation photovoltaïque hybride autonome | 17 |
| Figure I-19 : Configuration du système hybride à bus continu | 17 |
| Figure I-20 : La cellule au champ photovoltaïque | 17 |
| Figure I-21 : Exemple d'un panneau solaire..... | 18 |
| Figure I-22 : a :Symbole d'un convertisseur DC-DC. | 18 |
| Figure I-23 : b : Convertisseur DC/DC. | 18 |
| Figure I-24 : Convertisseur DC/AC | 19 |
| Figure I-25 : Exemple d'une batterie | 19 |

| | |
|---|----|
| Figure I-26 : Exemple des câbles | 20 |
| Figure I-27 : Boite de raccordement. | 20 |
| Figure I-28 : Schéma de position de régulateur. | 21 |
| Figure I-29 : Type de régulateur PWM | 22 |
| Figure II-1 : Schéma synoptique du système photovoltaïque..... | 27 |
| Figure II-2 : Schéma de principe d'un convertisseur survolteur (Boost) | 28 |
| Figure II-3 : Signal de commande de l'interrupteur Tr | 30 |
| Figure II-4 : Chronogrammes du convertisseur élévateur (Boost) | 30 |
| Figure II-5 : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge..... | 31 |
| Figure II-6 : La Commande MPPT dans le système PV..... | 32 |
| Figure II-7 : Diagramme en circuit d'un système photovoltaïque..... | 32 |
| Figure II-8 : Principe de la commande MPPT | 33 |
| Figure II-9 : Variation de l'efficacité des méthodes MPPT direct en fonction de coût.[63]... 35 | |
| Figure II-10 : Signe de dP/dV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance | 37 |
| Figure II-11 : Organigramme de la méthode P&O | 38 |
| Figure II-12 : Schéma de converge vers le PPM par P&O | 38 |
| Figure II-13 : L'Organigramme de L'algorithme MPPT/PSO..... | 41 |
| Figure II-14 : Hiérarchie sociale des loups gris | 43 |
| Figure II-15 : Variation des position des loups gris par rapport la proie | 44 |
| Figure II-16 : Alpha, bêta, delta et oméga dans GWO. | 45 |
| Figure II-17 : L'organigramme de l'algorithme GWO | 47 |
| Figure III-1 : Bibliothèque SIMULINK. | 51 |
| Figure III-2 : Les courbes caractéristiques P(V) et I(V) de GPV dans les conditions standards (1000 W/m ² et 25 °C). | 52 |
| Figure III-3 : Les courbes caractéristiques P(V) et I(V) de GPV avec variation de température..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Figure III-4 : Les courbes caractéristiques P(V) et I(V) GPV avec variation d'éclairement. | 53 |
| Figure III-5 : Schéma bloc Simulink du système global. | 53 |
| Figure III-6 : Schéma bloc Simulink de la technique P&O..... | 54 |
| Figure III-7 : Caractéristiques d'entrée pour la méthode P&O. | 54 |
| Figure III-8 : Caractéristiques de charge par la méthode P&O. | 55 |
| Figure III-9 : Schéma bloc Simulink de la technique PSO..... | 56 |
| Figure III-10 : Caractéristiques d'entrée pour la méthode PSO. | 56 |
| Figure III-11 : Caractéristiques de charge par la méthode PSO | 57 |
| Figure III-12 : Schéma bloc Simulink de la technique GWO | 57 |
| Figure III-13 : Caractéristiques d'entrée pour la méthode GWO | 58 |
| Figure III-14 : Caractéristiques de charge par la méthode GWO | 58 |
| Figure III-15 : Comparaison des résultats de simulation des trois méthodes. | 59 |
| Figure III-16 : Variation de la température(b) et de l'éclairement (a)..... | 60 |
| Figure III-17 : Résultats de la simulation de la méthode P&O avec variation de l'éclairement | 60 |
| Figure III-18 : Résultats de la simulation de la méthode P&O avec variation de la température..... | 61 |
| Figure III-19 : Résultats de la simulation de la méthode PSO avec variation de l'éclairement. | 62 |
| Figure III-20 : Résultats de la simulation de la méthode PSO avec variation de la température..... | 63 |
| Figure III-21 : Résultats de la simulation de la méthode GWO avec variation de l'éclairement..... | 64 |
| Figure III-22 : Résultats de la simulation de la méthode GWO avec variation de la température..... | 65 |
| Figure III-23 : Schéma Sumilink d'un panneau sous ombrage partiel. | 67 |
| Figure III-24 : La courbe caractéristique I(V) ,P(V) dans le cas d'un ombrage partiel. | 67 |
| Figure III-25 : Caractéristiques d'entrée pour la méthode P&O. | 68 |

| | |
|--|----|
| Figure III-26 : Résultats de la simulation par la méthode P&O. | 68 |
| Figure III-27 : Caractéristiques d'entrée pour la méthode PSO. | 69 |
| Figure III-28 : Résultats de la simulation de la méthode PSO | 69 |
| Figure III-29 : Caractéristiques d'entrée pour la méthode GWO. | 70 |
| Figure III-30 : Résultats de la simulation de la méthode GWO. | 71 |

Listes des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I-1 : Quelques valeurs d'albédo | 5 |
| Tableau I-2 : Comparaison des différentes technologies de la cellule. | 11 |
| Tableau I-3 : Avantages et inconvénients du système PV | 23 |
| Tableau III-1 : Les Paramètres Electriques sous conditions standards..... | 51 |
| Tableau III-2 : Comparaison des techniques MPPT..... | 71 |

Introduction Générale

Introduction Générale

L'énergie solaire est la fraction extraite par des cellules photosensibles de l'énergie électromagnétique, qui provient du soleil sous forme de rayonnement. C'est une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir, grâce à l'effet photovoltaïque, le rayonnement électromagnétique en électricité. Ce processus de conversion est à la fois accessible, rentable et non polluant à l'environnement. On parle alors d'énergie propre. Le monde d'aujourd'hui voit le développement rapide de l'industrie, ceci nous convertit à être plus dépendant de l'énergie. L'industrie des cellules solaires fait actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser des panneaux avec le meilleur rapport rendement/prix.

Selon les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques et de leur association, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des méthodes dit techniques de Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT). Dans la plupart des systèmes de conversion des énergies PV, il existe un algorithme particulier nommé « maximum power point Tracking ». Cette technique, comme son nom l'indique, permet de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir. La puissance recherchée dépend généralement du changement de conditions climatiques telles que le rayonnement solaire et la température. Par conséquent, la technique MPPT, destinée à contrôler le rapport cyclique du convertisseur DC-DC de type Boost, est nécessaire pour le fonctionnement optimal du système PV dans différentes conditions d'exploitation [1].

C'est dans ce contexte général que vient s'inscrire notre projet de fin d'étude qui porte sur la comparaison par simulation entre trois techniques (classiques et modernes) de suivi du point de puissance maximale, appliquées pour optimiser le fonctionnement des systèmes solaires photovoltaïques. Plusieurs techniques de commande "Poursuite de Point de Puissance Maximale" ou "Maximum Power Point Tracker (MPPT)" ont été étudiées et simulées sous environnement MATLAB/Simulink. .

Le mémoire présenté est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente un état de l'art de système photovoltaïque. On démarre de rayonnement solaire et la cellule solaire jusqu'au système photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation d'un système PV, en commençant par le générateur PV puis le convertisseur hacheur survolteur. Ensuite, nous allons présenter les trois techniques MPPT, les plus populaire pour la poursuite de point de fonctionnement a puissance maximale, qui sont:

La méthode classique la plus utilisée P&O (Perturbation et Observation), les méthodes intelligentes métaheuristiques ; la PSO (Particle Swarm Optimization) et la GWO (Grey Wolf Optimization).

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter l'influence des conditions météorologiques (la température et l'éclairement) sur le GPV ainsi que l'effet de l'ombrage partiel, et appliquer les trois stratégies de commande MPPT dans un système PV. Les résultats de simulations vont nous permettre de faire une comparaison entre les différentes méthodes étudiées.

Le travail se terminera par une conclusion générale.

Chapitre I :
Énergie et systèmes
Photovoltaïques

I.1. Introduction

L'énergie solaire représente une alternative aux énergies fossiles habituelles, est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet que peu de CO₂. Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermodynamiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité ou en chaleur.

L'énergie solaire photovoltaïque consiste à convertir directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle utilise des modules ou panneaux photovoltaïques, composés de cellules solaires. Dans ce chapitre nous allons faire une présentation sur l'énergie solaire photovoltaïque et son intérêt. On démarre de la cellule jusqu'au système photovoltaïque.

I.2. Les types d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables proviennent de sources naturelles inépuisables et propres telles que le soleil, le vent, la marée, les cours d'eau, la chaleur géothermique et la biomasse. Contrairement aux énergies fossiles comme le pétrole, le gaz et le charbon, elles représentent l'avenir énergétique en raison de leur durabilité. Souvent appelées « énergies propres » ou « énergies vertes », elles s'alignent parfaitement avec la transition énergétique en raison de leur faible impact en termes de déchets et d'émissions polluantes.[1]

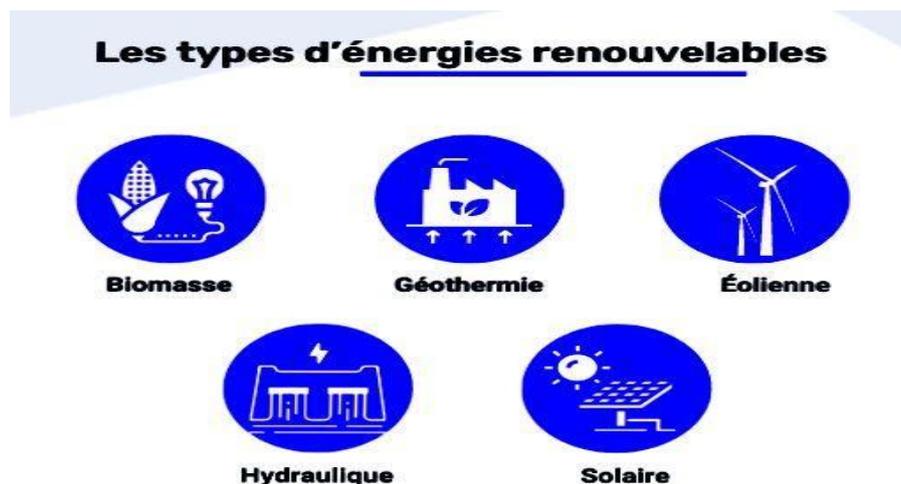


Figure I-1 : Les types d'énergies renouvelables.[2]

I.3. Le rayonnement solaire

L'énergie qui parvient jusqu'au sol est inférieure à 1354 w/m^2 (la constante solaire) en raison de l'absorption d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (environ 15%) et de sa réémission dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit également une partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Ainsi, le rayonnement global au niveau du sol est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. L'énergie reçue par une surface dépend de divers facteurs tels que la saison, l'altitude, les conditions météorologiques, le relief, la pollution, l'orientation de la surface, etc. Au niveau du sol, on distingue plusieurs composantes [3] :

I.3.1. Le rayonnement direct

Il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. C'est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus [4].

I.3.2. Le rayonnement diffusé

C'est dû à l'absorption et à la diffusion de la lumière par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols. Ainsi, par ciel serein, il constitue 20% de l'énergie globale. Par ciel couvert, il correspond à la totalité de l'énergie reçue au sol [4].

I.3.3. Le rayonnement solaire réfléchi (L'albédo)

C'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, etc....) [5].

Tableau I-1 : Quelques valeurs d'albédo [4].

| Surface de sol | L'albédo |
|--------------------|-------------|
| Surface | 0.01 a 0.1 |
| Forêt | 0.05 a 0.2 |
| Sol cultivé | 0.07 a 0.4 |
| Pierre et rochers | 0.15 a 0.25 |
| Champs et prairies | 0.1 a 0.3 |

| | |
|----------------|------------|
| Sol nul | 0.15 0.4 |
| Neige ancienne | 0.5 a 0.7 |
| Neige fraîche | 0.8 a 0.95 |

I.3.4. Le rayonnement global

Sur une surface horizontale : Il s'agit de la totalité du rayonnement solaire provenant du soleil qui atteint une surface horizontale sur la planète Terre. Ceci inclut donc la composante verticale du rayonnement solaire direct ainsi que le rayonnement solaire diffus.[4]

Sur une surface inclinée : Le rayonnement global sur une surface inclinée correspond à la somme des rayonnements direct, diffus et réfléchi.

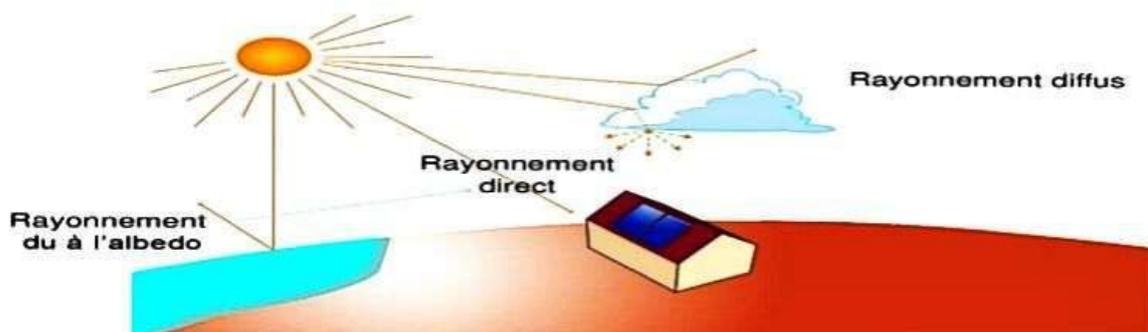


Figure I-2 : Composants du rayonnement solaire.

I.4. Les types d'énergie solaire

I.4.1. L'énergie solaire thermique

Utiliser le rayonnement solaire infrarouge du soleil pour générer de la chaleur en chauffant de l'eau, de l'air ou un autre fluide. Cela implique de capturer les calories à l'aide de surfaces absorbant la chaleur, telles que des plaques métalliques peintes en noir.[5]

I.4.2. L'énergie solaire thermodynamique :

Il s'agit de vastes centrales équipées de concentrateurs de rayons solaires, appelés miroirs, pour chauffer un fluide à haute température afin de produire de la vapeur par échange thermique, puis d'utiliser une turbine à vapeur pour produire de l'électricité.[5]

I.4.3. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque tire parti du soleil comme source de lumière. Cette énergie est captée et convertie en électricité à l'aide de panneaux solaires installés sur les façades ou les toits des bâtiments. Ce processus de conversion est connu sous le nom d'effet photovoltaïque.[6][7]

I.4.3.1. L'effet photovoltaïque

Par définition, le mot « photovoltaïque » est dérivé du grec « photo », signifiant « lumière » et « voltaïque », qui tire son origine du physicien italien Alessandro Volta (1754 – 1827). Le nom signifie littéralement photovoltaïque en raison de sa grande contribution à la découverte de l'électricité et plus tard du photovoltaïque [8].

L'effet photovoltaïque est un processus qui génère une tension ou un courant électrique dans une cellule photovoltaïque lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil . C'est cet effet qui rend les panneaux solaires utiles, car c'est la manière dont les cellules du panneau convertissent la lumière du soleil en énergie électrique. L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839.[9]

L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. [10]

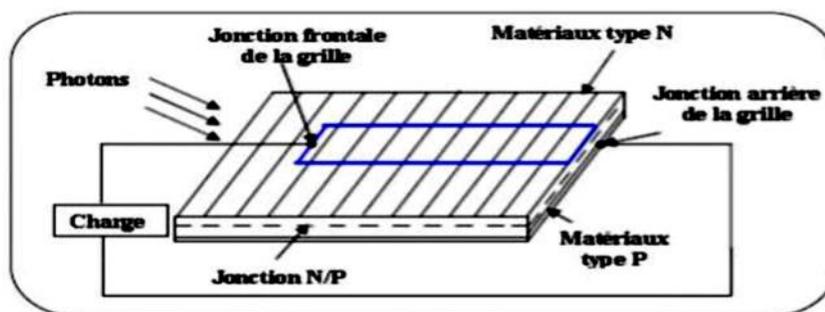


Figure I-3 : L'effet Photovoltaïque [11]

I.5. La cellule photovoltaïque

C'est la seule méthode actuellement connue pour convertir directement la lumière en électricité. Les cellules photovoltaïques constituent les composants de base des panneaux solaires photovoltaïques. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui fournit une tension d'environ 0,5 à 0,6 V (voir Figure I.4).[12]

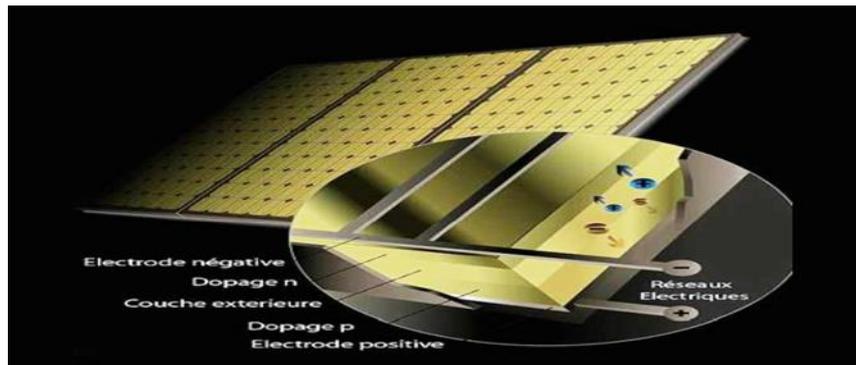


Figure I-4 : Une cellule photovoltaïque

I.5.1. Structure d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants photovoltaïques qui convertissent directement la lumière solaire en énergie électrique. Ils sont fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre celles des conducteurs et des isolants. Une cellule solaire sera obtenue en formant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). Près de la jonction, un champ électrique se produit en raison d'un déséquilibre de charge. Cela aidera à expulser les électrons qui ont été séparés par l'énergie des photons incidents (particules lumineuses). En effet, une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches minces, comme le montre la figure (I.6) :

- Une couche « antireflet » sur la face avant, dont le but est de favoriser la pénétration du plus grand nombre de photons possible dans la surface et de réduire les pertes par réflexion.
- La grille conductrice menant "collecte d'électrons" doit également être reliée au silicium et être insensible à la corrosion.
- Couche dopée N avec porteurs de charges libres négatifs (électrons).
- Couche dopée P avec porteurs de charges positifs (trous).
- Surface de contact métallique conductrice (collecte les électrons) avec une bonne conductivité électrique et une bonne adhésion au silicium. [13]

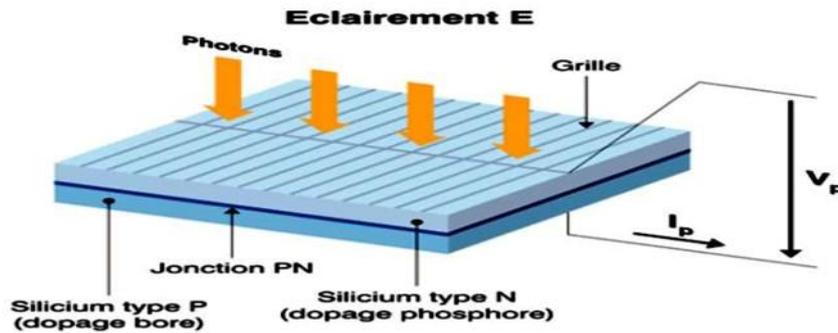


Figure I-5 : Synoptique d'une cellule solaire [14]

I.5.2. Principe de fonctionnement

Son fonctionnement peut être résumé de la manière suivante :

Les photons d'énergie ($E_{ph} = h\nu$) qui pénètrent dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire. Lorsque cette énergie est adéquate, elle peut entraîner le passage des électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur, ce qui entraîne la formation de paires « électron-trou ». Un champ électrique maintient les électrons (charges N) et les trous (charges P) séparés, créant ainsi une barrière de potentiel.[15]

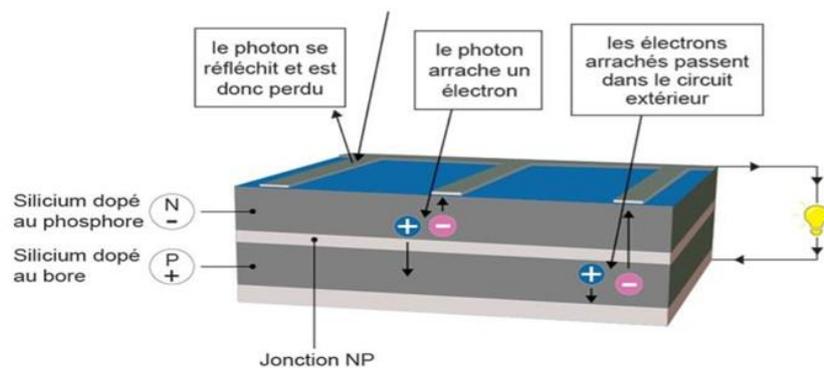


Figure I-6 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.[16]

I.5.3. Différents types de cellules

Dans la majorité des situations, le matériau principal est le silicium. Les photopiles seront plus ou moins performantes en fonction du procédé de fabrication, qu'elles soient amorphes, polycristallines ou monocristallines. D'autres matériaux peuvent être employés : Arséniure de gallium (AsGa), tellure cadmiennne (CdTe) Plusieurs technologies des cellules solaires sont en train d'être développées en cours.

Les cellules du silicium peuvent être classées en trois catégories [13] :

I.5.3.1. Le silicium monocristallin

Le concept de "cristalin" signifie que tous les atomes présents dans le matériau PV actif sont inclus dans une structure cristalline simple, sans aucune perturbation dans les dispositions ordonnées des atomes [17-18].



Figure I-7 : Cellule monocristallin

I.5.3.2. Le silicium poly cristallin

De nos jours, le silicium poly cristallin (Poly cristallin) est la technologie la plus couramment employée, représentant près de la moitié du marché. On obtient ces cellules en coulant des cristaux de silicium, ce qui leur confère une structure hétérogène.[18]

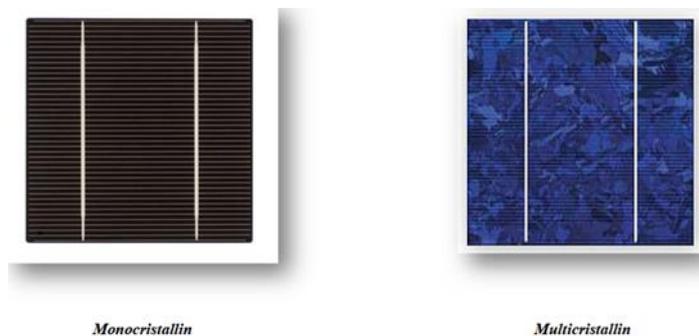


Figure I-8 : Cellules monocristallin et multicristallin.

I.5.3.3. Le silicium amorphe

Partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est requise, les cellules amorphes sont employées, comme pour alimenter des montres, des calculatrices ou des luminaires de secours. Elles ont un coefficient d'absorption élevé, ce qui permet de très faibles épaisseurs, d'environ un micron.[19]

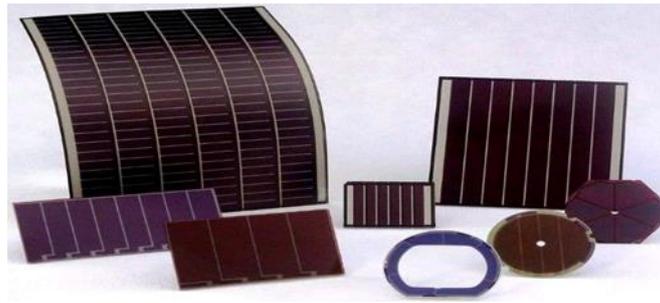


Figure I-9 : Les cellules en silicium amorphe[20]

I.5.4. Comparaison des différentes technologies

Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque à base de silicium :

Tableau I-2 : Comparaison des différentes technologies de la cellule.[4]

| Technologies | Silicium Monocristallin | Silicium Polycristallin | Silicium Amorphe |
|----------------|---|---|--|
| Rendement | 14-17% | 12-15% | 6-10% |
| Avantages | Bon rendement Pour une cellule | Bon rendement Pour un module | Facile à Fabriquer |
| Inconvénients | Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication | Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication | Rendement faible Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication |
| Durée de vie | 35 ans | 35 ans | <10ans |
| Puissance | 100 à 150We/m ² 7 M ² /kWc | 100Wc/m ² 8M ² /kWc | 50Wc/m ² 16 M ² /kWc |
| Part de marché | 43% | 47% | 10% |

I.6. Module photovoltaïque

L'élément le plus important d'un système photovoltaïque est la cellule, élément de base de l'unité qui collecte la lumière du soleil et les modules qui rassemblent un grand nombre de cellules.[21]

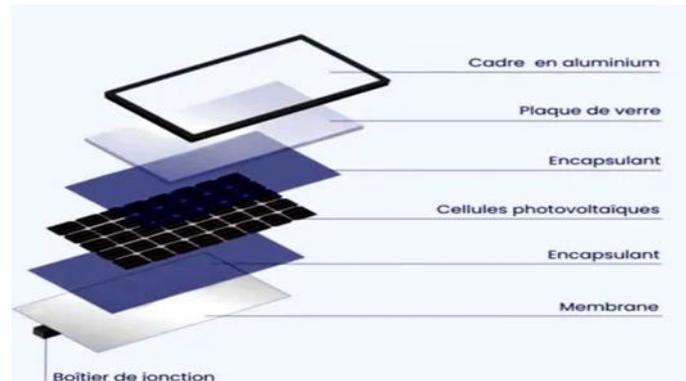


Figure I-10 : Composition d'un module solaire photovoltaïque [16]

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique et support.

I.6.1. Rôle du module solaire PV

Le module solaire PV est l'élément du système solaire PV qui produit de l'électricité (courant continu) lorsqu'il est exposé aux rayons du soleil. La quantité d'électricité que le module peut produire dépend des facteurs suivants :

- La disponibilité des rayons de soleil (directs, diffus, réfléchis, nuit, etc) ;
- L'orientation du module (direction Nord-Sud ou non)
- L'inclinaison du module (angle par rapport à l'horizontal)
- Le lieu d'exposition du module solaire PV[22]

I.7. Les panneaux solaires photovoltaïques

Le panneau comporte plusieurs modules PV interconnectés en série ou en parallèle ou série-parallèle, afin d'augmenter la force. Pour la même température avec un éclairage homogène, l'enchaînement de cellules photovoltaïques en série est une augmentation de la tension, ainsi que la tension de sortie est la somme de la tension de chaque cellule. Au contraire, le courant électrique augmente, avec mise en parallèle.[23]

I.7.1. Association en série

La cellule individuelle, composante essentielle d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, généralement de 0,5 W avec une tension inférieure à un volt. Afin d'augmenter la production de puissance, les cellules sont fusionnées afin de créer un module (ou panneau). [24] Les cellules associées en série produisent une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

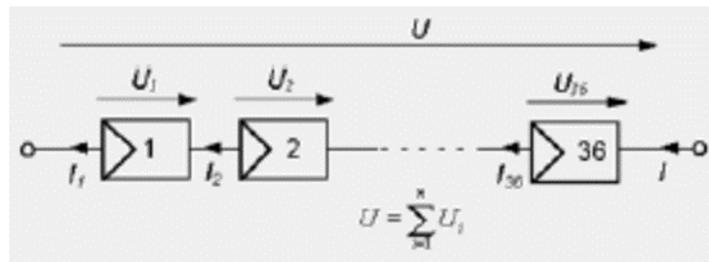


Figure I-11 : Association de N modules solaires en série [24]

I.7.2. Association en parallèle

En ajoutant des modules similaires en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente en fonction du nombre de modules en parallèle dans la branche.[24]

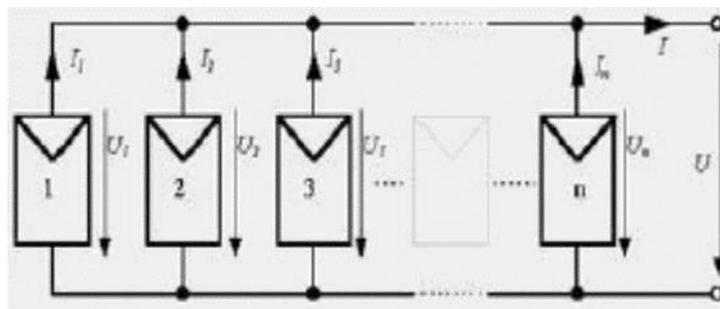


Figure I-12 : Association des modules solaires en parallèle [24]

I.7.3. Association série-parallèle

pour obtenir une satisfaction en termes de courant et de tension, il est nécessaire d'utiliser un ensemble mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle.[24]

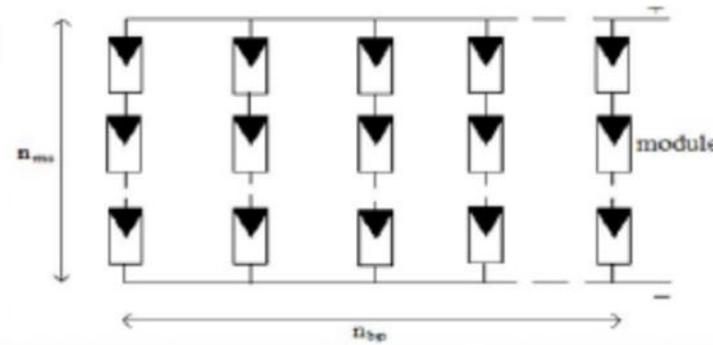


Figure I-13 : Association mixte des modules solaires [24]

En réalité, le panneau solaire est idéalement orienté vers le sud, ce qui signifie que le soleil sera à sa hauteur (la position la plus élevée dans le ciel) au milieu de la journée en raison de la rotation de la Terre et de notre rotation autour du soleil. Dans ce cas, l'angle de 30° correspond à la latitude de l'endroit.[25]

| INCLINAISON | | 0° | 30° | 60° | 90° |
|-------------|--|------|-------|------|------|
| ORIENTATION | | | | | |
| EST | | 93 % | 90 % | 78 % | 55 % |
| SUD-EST | | 93 % | 96 % | 88 % | 66 % |
| SUD | | 93 % | 100 % | 91 % | 68 % |
| SUD-OUEST | | 93 % | 96 % | 88 % | 66 % |
| OUEST | | 93 % | 90 % | 78 % | 55 % |

Figure I-14 : L'angle et l'orientation des panneaux[26]

I.8. Le système photovoltaïque

En plus de l'élément principal, le générateur photovoltaïque, qui représente plus de 50% du coût total de la chaîne, le système PV comprend également des éléments secondaires tels que le système de stockage et l'étage d'adaptation de puissance. Fréquemment, le dispositif d'entreposage inclut une ou plusieurs batteries rechargeables. Les batteries sont un élément extrêmement onéreux et doivent être sélectionnés avec précaution. Il s'agit d'un convertisseur statique DC/DC ou DC/AC pour l'étage d'adaptation. Les batteries ont une durée de vie de 8 à 10 ans, tandis que les modules PV ont une durée de vie de 20 à 30 ans.[27]

Les systèmes PV sont classés en trois grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée. On distingue trois types de systèmes PV :

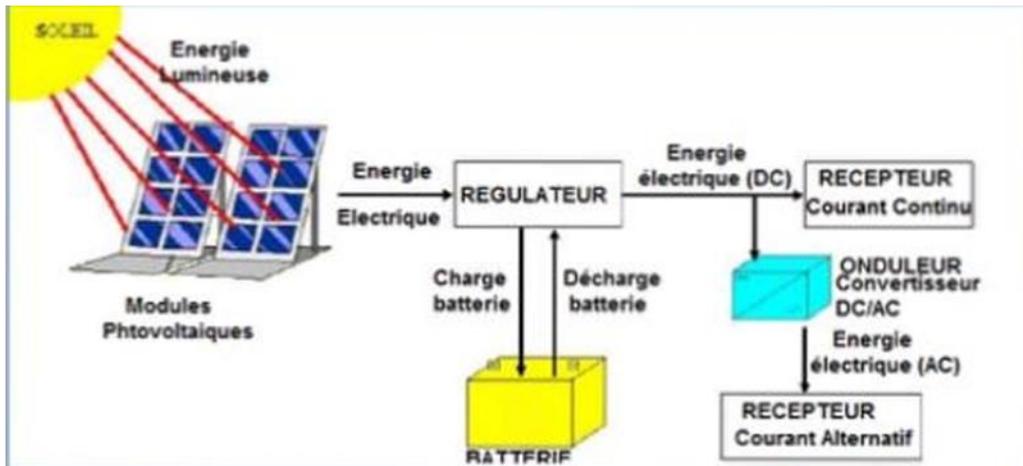


Figure I-15 : Système photovoltaïque plus détaillé

I.8.1. Systèmes PV isolé (autonome)

Les systèmes autonomes jouent le rôle d'assurer l'alimentation d'un ou de plusieurs consommateurs dans une zone éloignée du réseau électrique. Comme cela est illustré dans la Figure I.23, un système autonome de panneaux solaires est composé d'un système de stockage qui est associé aux générateurs solaires pour garantir l'alimentation à tout moment et pendant plusieurs jours, même en cas d'interruption de la production, ainsi que de convertisseurs statiques pour l'étage d'adaptation entre le générateur solaire et les charges [28]. On distingue deux types :

- Les systèmes au fil du soleil.
- Les systèmes avec stockage.

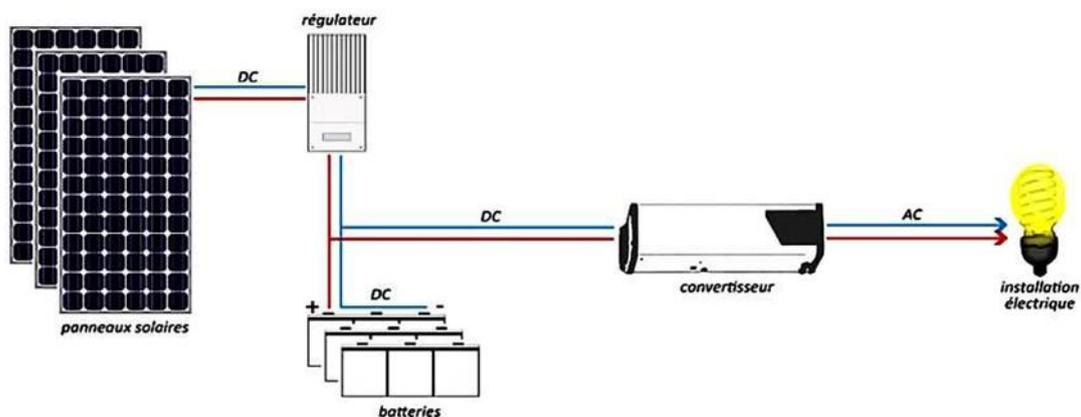


Figure I-16 : Installation photovoltaïque autonome [29]

I.8.2. Systèmes PV connectés au réseau

Systèmes photovoltaïques reliés au réseau Un système comme celui-ci est installé sur un site connecté au réseau, habituellement sur des logements ou des entreprises qui désirent utiliser une énergie renouvelable et qui bénéficient d'un ensoleillement suffisant, comme illustré dans la figure (I.16). L'avantage majeur de cette solution réside dans l'absence de batterie. L'énergie n'est plus stockée, elle est directement injectée dans le réseau local ou national. Et cela sans limite de quantité, ce qui signifie que toute l'énergie est récupérée. Un compteur tourne dans une direction pour la consommation, tandis qu'un autre tourne dans une autre direction pour la production. Cependant, il est nécessaire de transformer le courant continu des panneaux en courant alternatif en utilisant un onduleur, qui doit être approuvé par la compagnie d'électricité qui fournira ce courant. Puisque il doit se conformer à des normes concernant sa qualité

"sinusoïdale".[30].

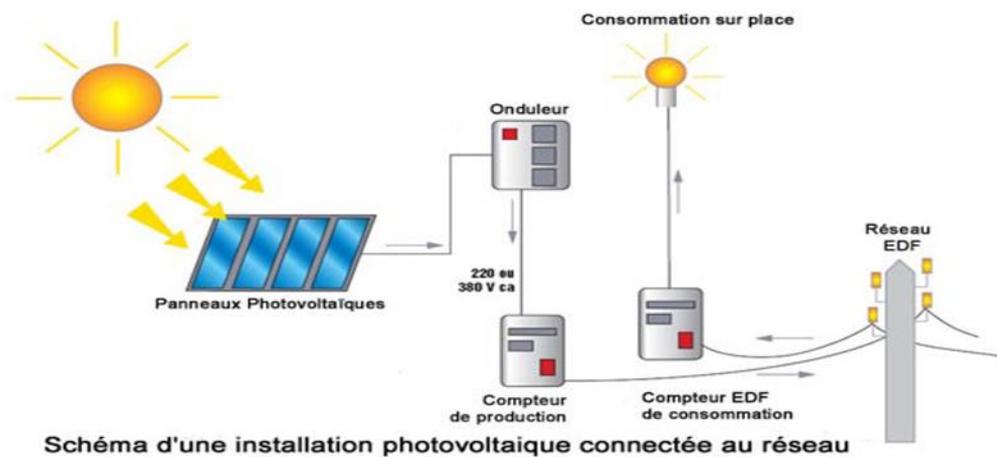


Figure I-17 : Schéma d'une installation photovoltaïque connecte au réseau

I.8.3. Système PV hybride

Les systèmes hybrides se constituent d'un générateur photovoltaïque associé à une ou plusieurs sources d'énergie renouvelable ou à un groupe électrogène, ou aux deux simultanément. En cas de décharge, ces systèmes peuvent également avoir des batteries qui peuvent être rechargées par l'autre source [31].

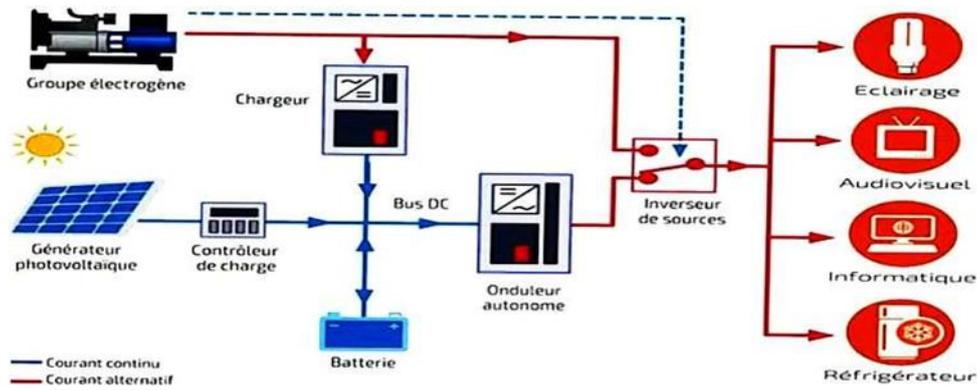


Figure I-18 : Installation photovoltaïque hybride autonome [29]

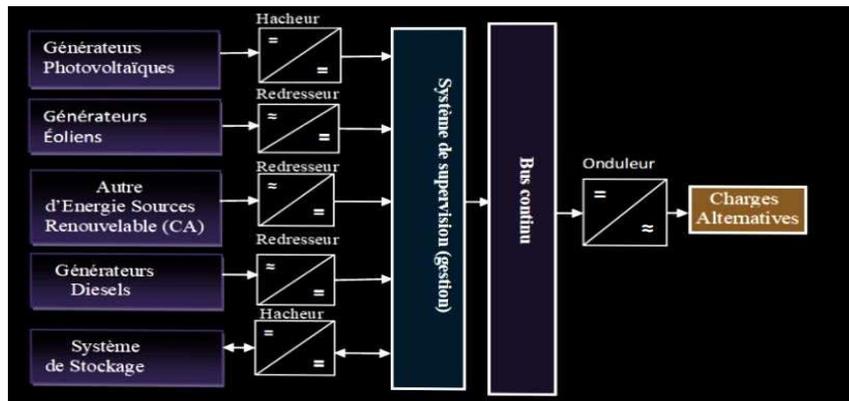


Figure I-19 : Configuration du système hybride à bus continu [23]

I.9. Composants de système PV

I.9.1. Le générateur

C'est le champ photovoltaïque[16]

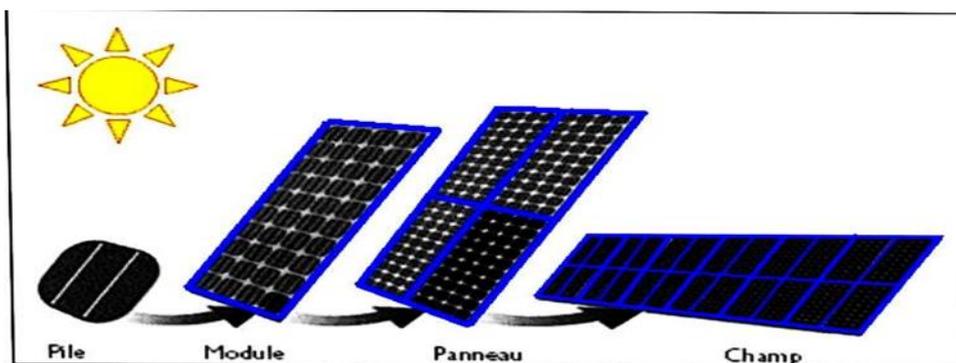


Figure I-20 : La cellule au champ photovoltaïque

Le panneau solaire est constitué de différents modules photovoltaïques qui sont connectés en série et/ou en parallèle pour générer la puissance nécessaire. Les modules sont

fixés sur une structure métallique qui assure la résistance au champ solaire en ayant une orientation et un angle d'inclinaison précis.



Figure I-21 : Exemple d'un panneau solaire.

I.9.2. Le système de conversion

Les convertisseurs sont des dispositifs utilisés pour convertir la tension continue produite par les panneaux ou les batteries en une tension alternative pour les récepteurs qui fonctionnent soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative. [32]

En général, les convertisseurs sont placés soit entre le photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu, convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (dans ce cas, ils seront identifiés comme des onduleurs ou des convertisseurs continus alternatifs). [33]

I.9.2.1. Le convertisseur DC– DC

Est un dispositif utilisé pour fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe [34].

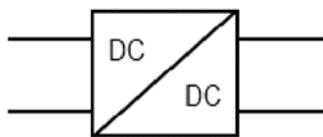


Figure I-22 : a :Symbole d'un convertisseur DC-DC. [35]



Figure I-23 : b : Convertisseur DC/DC.[36]

I.9.2.2. Le convertisseur DC– AC

Le convertisseur DC– AC (l'onduleur), est un dispositif permet de convertir une énergie électrique de type continue en alternatif. Pour alimenter des appareils qui fonctionnent en

courant alternatif, le convertisseur doit être interposé entre la batterie et ces appareils. Les convertisseurs les plus utilisés transforment le courant continu issu de la batterie en courant alternatif 220 V/50 Hz ou 380 V/50 Hz [37].



Figure I-24 : Convertisseur DC/AC [38]

I.9.3. Le système de stockage

Le stockage de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques est généralement assuré par des batteries et cela pour ses différents avantages. La batterie est le principal élément dans un système photovoltaïque, par où transite l'énergie électrique fournie par le générateur [39]

I.9.3.1. Les batteries

Les batteries sont considérées comme des générateurs "réversibles", ce qui signifie qu'elles peuvent stocker de l'énergie électrique sous forme chimique et la restituer à tout moment sur demande grâce à la capacité de transformation réversible. À la différence des cellules photovoltaïques, où il n'y a qu'un transport d'électron qui ne provoque aucune "usure", les accumulateurs électrochimiques incluent un transfert de matière de l'électrolyte vers les électrodes, ce qui entraîne une "usure" inévitable qui restreint leur durée de vie.[25]



Figure I-25 : Exemple d'une batterie [25].

I.9.4. Le système de câblage et raccordement

I.9.4.1. Les câbles

Les câbles de toute installation solaire photovoltaïque permettent le transfert de l'électricité du panneau à la batterie, puis aux charges. En règle générale, les câbles conseillés

pour le côté cc sont fabriqués en cuivre souple, car il offre le meilleur rapport prix / conductivité. De plus, sa caractéristique multibrin permet d'assurer des connexions de qualité optimale, ce qui permet de réduire les pertes d'énergie en cas de chute de tension. [13]



Figure I-26 : Exemple des câbles

I.9.4.2. Les boîtes de raccordements

Les boîtes de jonction, situées le plus près possible du champ solaire, permet un parallélisme avec les chaînes photoélectriques et ont la capacité de casser et de couper (intersection) en plus de la protection contre les surtensions (inhibiteur de surintensité). Facultativement, la boîte de jonction peut contenir des fusibles sur chaque chaîne de module PV.[25]



Figure I-27 : Boite de raccordement.

I.9.5. Le système de régulation

I.9.5.1. Le régulateur

Le régulateur de charge a pour principale fonction de contrôler l'état de la batterie. Différentes valeurs limites existent, chacune correspondant à un type de protection spécifique : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, etc. De leur côté, les régulateurs de nouvelle génération sont de plus en plus sophistiqués et offrent des fonctionnalités plus nombreuses et de plus en plus avancées. [40].

I.9.5.2. Les caractéristiques de régulateur

Il existe de nombreux régulateurs de charge disponible sur le marché qui ont des caractéristiques différentes [41] :

-L'affichage de l'état de charge de la batterie : certains régulateurs ne fournissent pas cette information ; d'autres la fournissent sous forme de LED, d'autres sur un écran digital.

-La compensation thermique : elle permet d'affiner les seuils de travail du régulateur de charge et améliore la durée de vie de la batterie.

Les seuils de coupures ajustables : sur certains régulateurs, les seuils de coupure sont réglables soit par des petits interrupteurs (dip-switch), soit par des potentiomètres, soit par un réglage avec l'afficheur LCD ou à l'aide d'une commande à distance.

-Data logging : certains régulateurs de charge enregistrent les données du système. Ces données sont ensuite lisibles sur le régulateur ou sur ordinateur ; cela permet de visualiser une erreur ou alarme sur le système solaire.

I.9.5.3. Principe de fonctionnement de régulateur

Le champ solaire est connecté à l'entrée du régulateur et la batterie à sa sortie. Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de régulation, le régulateur fait fonctionner le générateur photovoltaïque à puissance maximale P_{mpp} et transfère cette puissance à la sortie.[25]

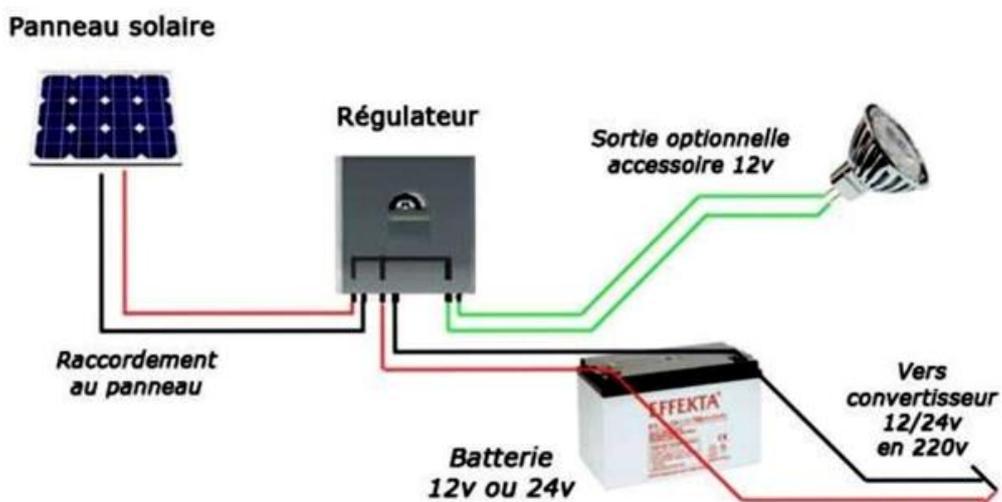


Figure I-28 : Schéma de position de régulateur.

I.10. Les types de régulateur

I.10.1. Type de régulateur PWM

Certains régulateurs réalisent une commande PWM, le rapport cyclique variant selon l'énergie à fournir à la batterie afin de réaliser une charge à tension constante. Celui-ci est un peu plus subtil que le « tout ou rien » : Les régulateurs solaires traditionnels intégrant la technologie PWM relient les panneaux solaires au banc de batteries. Dans cette utilisation directe, la tension de sortie des panneaux est réduite à la tension nominale des batteries.[25]



Figure I-29 : Type de régulateur PWM

I.10.2. Type de régulateur MPPT

Ce régulateur est actuellement la meilleure solution. Il contient un microprocesseur et un convertisseur statique qui permet de tirer toute l'énergie du module photovoltaïque malgré les variations de production de ces générateurs. L'idée est d'introduire un étage intermédiaire entre le module PV et la batterie qui sera constitué par le convertisseur DC-DC.

Le fonctionnement est le suivant : Les régulateurs MPPT traquent la tension V_{mp} des modules. Ils balayent une plage de tension en entrée pour déterminer constamment à quel point se trouve la puissance maximale délivrée par les modules. Le régulateur MPPT prélève la puissance à cette tension V_{mp} et la renvoie vers les batteries sous une tension plus basse, ce qui a pour effet d'augmenter le courant de charge. La puissance est égale au produit de la tension et du courant, ainsi, si la tension est réduite, le courant augmente nécessairement pour maintenir le ratio entrée/sortie égal. Pour un rendement de 100% : Puissance d'Entrée = puissance de Sortie [40]. Une fois la tension de la batterie arrive à sa tension maximale, le système switch vers une commande à tension constante, et à un courant de charge décroissant jusqu'à arriver à la pleine charge.



Figure I.30 :Type de régulateur MPPT.

I.11. Les avantages et les inconvénients du système PV

Tableau I-3 : Avantages et inconvénients du système PV[16].

| Avantages | Inconvénients |
|-----------------------------------|--|
| -Technologie sûre et sans risque. | -Le rendement des cellules PV reste assez faible. |
| -Énergie propre, non- polluante. | -Le coût d'investissement est relativement élevé. |
| -Pas de combustion | -Il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit |
| -Des systèmes fiables et Stables. | |

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents éléments qui interviennent dans la constitution d'un système photovoltaïque. Nous avons abordé la cellule photovoltaïque ainsi que le module photovoltaïque, on a décrit également les différents éléments secondaires comme le système de stockage ainsi que l'étage d'adaptation et la régulation de la puissance. Souvent, le système de régulation de type MPPT est actuellement la meilleure solution. Il contient un microprocesseur et un convertisseur statique qui permet de tirer toute l'énergie du module photovoltaïque malgré les variations de production de ces générateurs. Le prochain chapitre est un focus sur ce type de contrôleur de puissance.

Chapitre II :
Modélisation de la
commande MPPT par les
méthodes classiques et
intelligentes

II.1. Introduction

Les lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans que ces points soient connus à l'avance, ou à quel moment ils ont été modifiés. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est appelé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT).

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation par le hacheur Boost entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance, La variation n'est pas linéaire et la puissance générée par le générateur photovoltaïque est à peine prévisible. Lorsque le panneau solaire est couplé directement à la charge, il ne fonctionner au point de puissance maximale (MPP) à moins que la charge ne soit correctement adaptée au système photovoltaïque, mais cette adéquation ne durera pas en raison de la variation des conditions environnementales.

Dans ce chapitre, en premier lieu nous donnerons une présentation sur le convertisseur Boost pour l'étage d'adaptation puis allons faire un focus sur la technique MPPT ; principe de fonctionnement, les critères de sélections d'une commande MPPT et la classification des différentes méthodes et algorithmes MPPT. Par la suite, nous allons céder le passage pour la modélisation et l'implantation des trois méthodes destinées pour notre travail. La méthode classique la plus utilisée P&O (Perturbation et Observation), les méthodes intelligentes métaheuristiques; la PSO (Particle Swarm Optimization) et la GWO (Grey Wolf Optimization).

II.2. Système Photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué de quatre (04) blocs comme le montre la figure II.1. Le premier bloc représente la source d'énergie (panneau photovoltaïque), la deuxième bloc est un convertisseur statique DC-DC, le troisième bloc représente la charge et le quatrième bloc représente le système de commande (MPPT). Le rôle principal du convertisseur statique est de fonctionner comme une adaptation d'impédance de sorte que le panneau délivre le maximum d'énergie.[42]

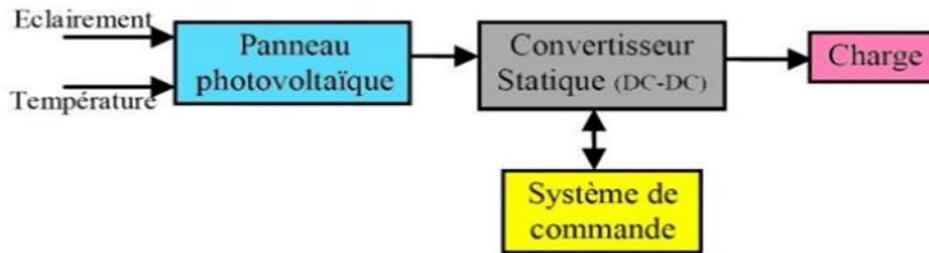


Figure II-1 : Schéma synoptique du système photovoltaïque.

II.3. Principe conversion photovoltaïque

Les générateurs photovoltaïques sont les principaux composants des systèmes photovoltaïques. Cependant, pour des applications pratiques, d'autres éléments sont nécessaires, par exemple pour le stockage d'énergie, pour réguler la circulation du flux d'énergie ou pour alimenter les réseaux AC. Ces composants supplémentaires représentent une partie importante du coût, provoquent la réduction du rendement et influencent considérablement le comportement et les performances de tout le système .[43]

II.4. Convertisseur DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire

Les hacheurs sont des convertisseurs DC-DC utilisés pour contrôler la puissance dans les circuits fonctionnant en DC avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Un hacheur se compose de condensateur, d'inductance et de commutateur. Dans un monde idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est pourquoi nos hacheurs ont un bon rendement. Les convertisseurs DC-DC Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante.[44][45] Les trois configurations de base sont :

- Convertisseur dévolteur (ou Buck)
- Convertisseur survolteur (ou boost)
- Convertisseur dévolteur- survolteur (Buck-boost).[46]

II.4.1. Choix du convertisseur DC-DC

Le générateur PV fournit une tension faible que nous devant adapter à la tension nominale de la charge, ce qui sera réalisé par l'hacheur boost. Ceci est la condition sur le choix du convertisseur. De plus, il est important de maintenir un rendement élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants

électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Un convertisseur élévateur est le mieux adapté à ce type de conversion, car il a une structure simple, et un gain en tension plus élevé que les autres pour un rapport cyclique donné. Pour cette raison nous allons utiliser dans notre système un hacheur élévateur (Boost).[47]

II.4.2. Convertisseur élévateur (Boost) :

Le schéma de la figure (FigureII.2) représente le circuit Boost. Il est couramment employé dans les systèmes alimentés par batterie nécessitant des tensions d'alimentation élevées.

Celui-ci est un convertisseur élévateur ou survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [44]. Ce hacheur commande le débit d'un générateur de courant dont le courant i est toujours positif, dans un récepteur de tension dont la tension u ne peut devenir négative.[48]

Dans ce cas, le convertisseur est utilisé pour réduire le nombre de composants nécessaires pour atteindre la tension requise.

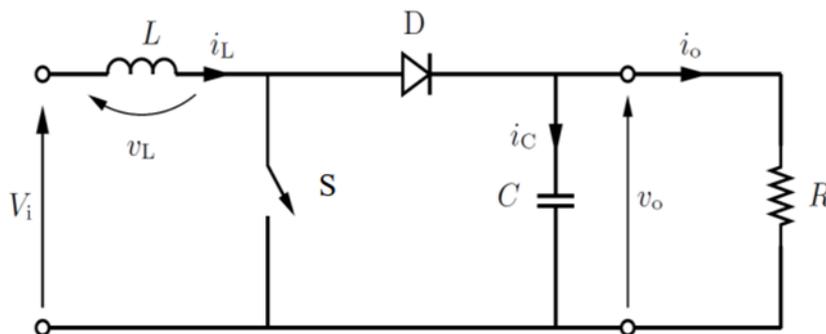


Figure II-2 : Schéma de principe d'un convertisseur survolteur (Boost) [49]

II.4.2.1. Principe de fonctionnement

Le schéma de principe de fonctionnement d'un hacheur boost est donné par la figure ci-dessus. Cette structure est composée principalement d'une inductance L et de deux interrupteurs Tr et D . Selon l'état de ces deux interrupteurs, on peut distinguer deux phases de conduction du courant :

La phase active : lorsque l'interrupteur Tr est fermé et l'interrupteur D est ouvert. Durant cette séquence, le courant qui traverse l'inductance L va augmenter linéairement et une énergie WL est stockée dans L . Le condensateur C fournit de l'énergie à la charge R .

Pendant que l'interrupteur est fermé, la tension sur l'inductance

$$V_L = V_i \dots\dots\dots (II.5)$$

et le courant augmente avec une pente égale à

$$V_i/L$$

La phase de roue libre : lorsque l'interrupteur Tr est ouvert, l'interrupteur D est fermé. Durant cette séquence, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est restituée au condensateur et à la charge R . Lors de cette phase, le fait que l'inductance L soit en série avec la source de tension d'entrée permet d'obtenir un montage survolteur.

La figure I.3 présente l'allure du signal de commande appliqué à l'interrupteur $Tr(S)$. C'est un signal rectangulaire de fréquence f dont la durée est à l'état haut (durée de conduction de l'interrupteur Tr , notée T_{ON}) est ajustée par le paramètre α . Ce paramètre, appelé rapport cyclique, est défini comme étant le rapport entre la durée de conduction de l'interrupteur Tr , et la période de découpage T de celui-ci est :

$$\alpha = T_{ON} / T \quad (II.1)$$

On a :

$$T = T_{ON} + T_{OFF} \quad (II.2)$$

où

T_{OFF} : correspond à la durée de blocage de l'interrupteur

r $Tr(S)$: La durée de conduction

T_{ON} : est compris entre 0 et T donc, le rapport cyclique est compris entre 0 et 1.

On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur Tr en fonction de α et T :

- Lorsque l'interrupteur Tr est fermé ; Durée de conduction :

$$T_{ON} = \alpha T \quad (II.3)$$

- Lorsque l'interrupteur Tr est ouvert ; Durée de blocage :

$$T_{off}=(1-\alpha) \tag{II.4}$$

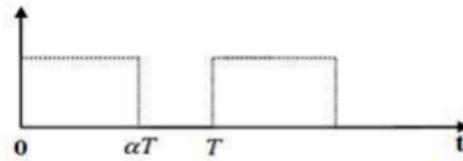


Figure II-3 : Signal de commande de l'interrupteur Tr

Pendant que l'interrupteur est ouvert, la tension sur l'inductance

$$V_L=V_i-V_0 \tag{II.5}$$

et le courant diminue avec une pente

$$[(V_e-V_s)/L]<0 \tag{II.6}$$

La tension moyenne sur l'inductance étant nulle en régime permanent :

$$\alpha V_e+(1-\alpha)(V_e-V_s)=0 \tag{II.7}$$

Soit

$$V_s=[1/(1-\alpha)] V_e \tag{II.8}$$

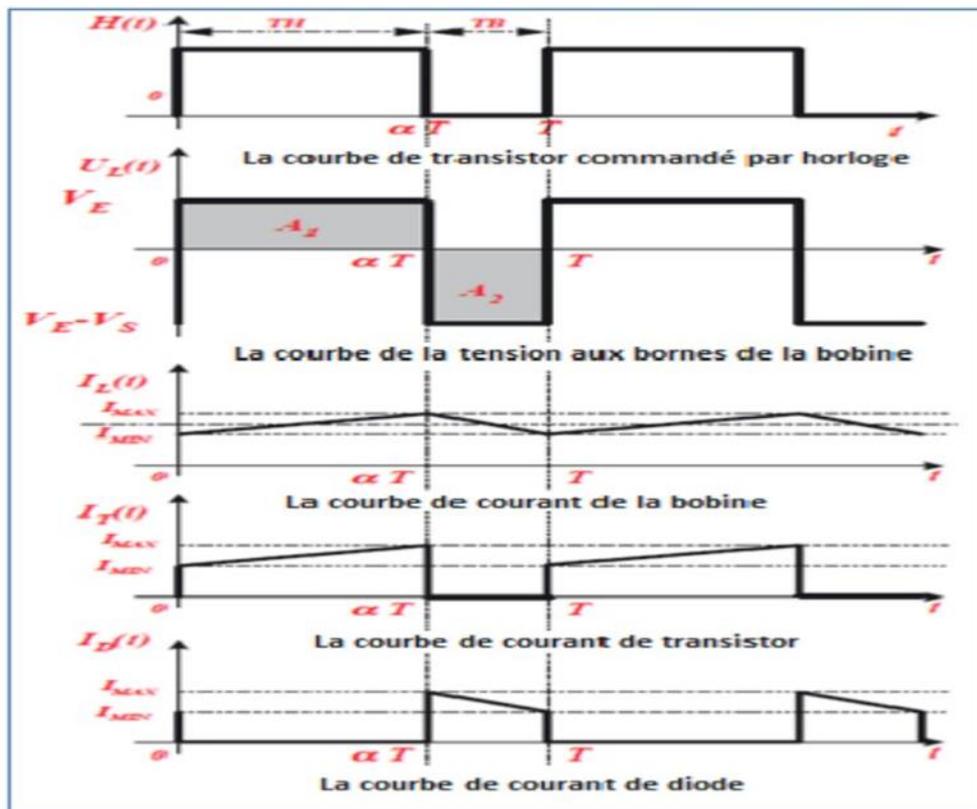


Figure II-4 : Chronogrammes du convertisseur élévateur (Boost) [50].

II.5. Étage d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et une charge

Phase d'adaptation entre le générateur PV et la charge Le GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires pour le PMM, qui dépendent entre autres du niveau de lumière et de la température des cellules. De plus, selon les caractéristiques de la charge de fonctionnement du GPV, on peut constater qu'il existe un écart très important entre la puissance potentielle du générateur et la puissance réellement transmise à la charge en mode connexion directe . Afin d'extraire à tout moment la puissance maximale disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique traditionnellement utilisée consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge, comme le montre la figure (II.5).

Cet étage fait office d'interface entre les deux éléments en assurant que la puissance maximale délivrée par le générateur soit transmise en contrôlant l'action pour qu'elle soit la plus proche possible de la P_{max} disponible..[51]



Figure II-5 : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

II.6. La commande de la puissance maximale(MPPT)

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour la commande de l'hacheur [52]. Cette technique a été développée depuis 1968, elle est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Quelles que soient la charge et les conditions atmosphériques (température et ensoleillement). Le principe de cette commande est basé sur la variation du point de fonctionnement en modifiant le rapport cyclique pour atteindre la valeur optimale. [53].

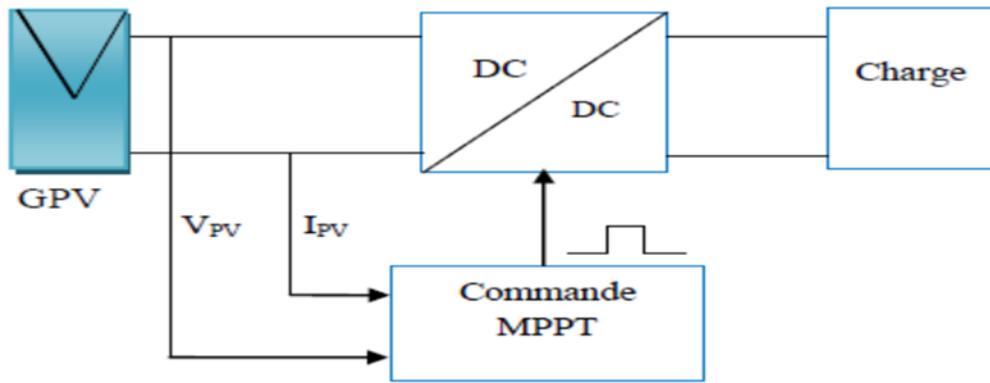


Figure II-6 : La Commande MPPT dans le système PV

II.6.1. Principe de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM) [54]. La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [55] [56]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure (II.7)"

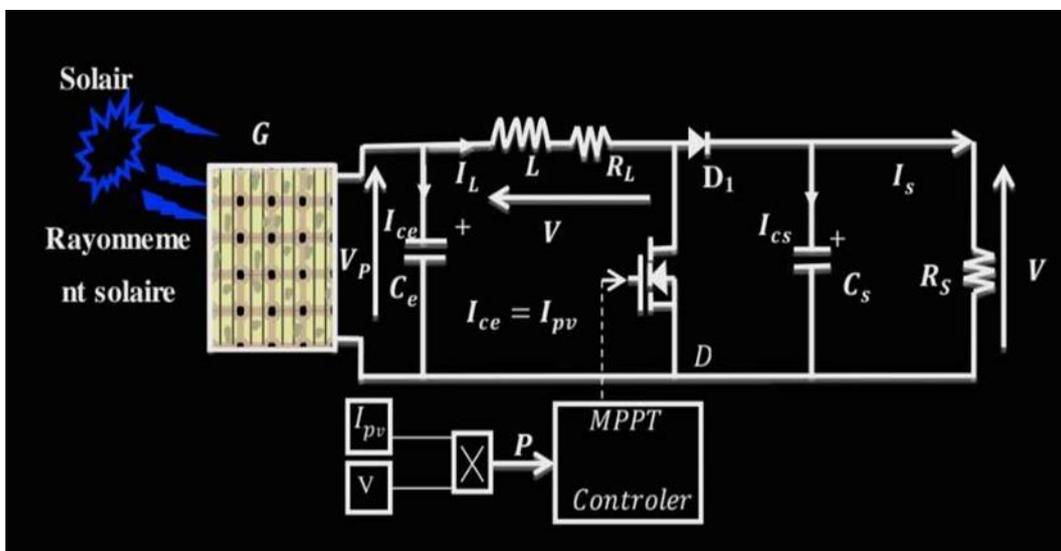


Figure II-7 : Diagramme en circuit d'un système photovoltaïque (PV-Boost-MPPT).

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

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 [55][57][56].

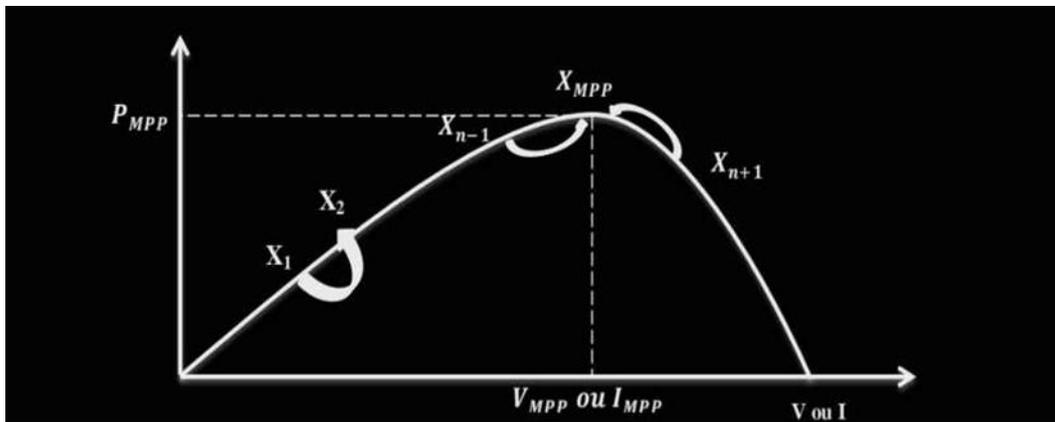


Figure II-8 : Principe de la commande MPPT

II.6.2. Critères de sélection d'une commande MPPT

Compte tenu des nombreuses approches existante Pour poursuivre le MPP, Il n'est pas facile de décider quelle approche choisir. Par conséquent, les critères Suivants doivent être. Pris en compte Lors de la sélection d'une méthode MPPT.

- Mise en œuvre Facilité de mise En ouvre: Est un facteur important pour décider quelle Technique Un MPPT Utiliser. Certaines techniques sont faciles à mettre en œuvre et ne nécessitent aucun réglage ni calibrage sur le terrain. D'autres techniques sont plus complexes et leur étalonnage variant en fonction de la localisation du site et des conditions climatiques.

Capteurs : Le nombre de capteurs requises. Pour mettre en œuvre le MPPT affecte Également le processus de prise de décision. Afin de suivre la puissance maximale. Il est nécessaire. Le Tracker connaissait l'entrée PV (irradiances et Température) Et la sortie PV(Tension et courant) quatre capteurs sont donc nécessaire. Cependant, Certains MPPT utilisent Une technologie permettant de réduire le nombre de capteurs.

- **Efficacité** : L'efficacité du tracker est associée à la précision de poursuite des MPP en un minimum de temps. Certaines méthodes MPPT oscillent autour du MPP en raison de ses techniques d'essai pour rechercher la puissance maximale, ce qui diminue l'efficacité de l'ensemble du système PV.

- **Coût** : Le coût d'un dispositif de poursuite dépend des caractéristiques du système, de son coût matériel, de la complexité de la programmation requise et du nombre de capteurs. Habituellement, le coût des systèmes analogiques est moins cher que les systèmes numériques et ceux qui sont basés sur un microprocesseur ou sur FPGA.
- **Application** : Lors de l'étude des méthodes de poursuite, l'accent est mis souvent sur le contrôle de poursuite lui-même et oublie l'effet de la maximisation de la puissance sur le matériel environnemental dans lequel le PV est connecté. Habituellement, un système PV comprend des batteries dans lesquelles les spécifications de charge et de décharge doivent être prises en compte. Ainsi, le type de batteries, les techniques de charge et les cycles, doivent être pris en compte dans le choix de la technique MPPT.[58][59]

II.7. Classification des Commandes MPPT :

La littérature propose plusieurs algorithmes MPPT qui peuvent être divisés en deux principalement catégories, les algorithmes conventionnels et non conventionnels [60].

II.7.1. Les méthodes conventionnelles

Les méthodes conventionnelles sont divisées en deux types :

- **Méthodes indirectes** :

Dans les méthodes indirectes, les bases de données regroupant les valeurs physiques du panneau PV sont généralement utilisées pour générer les signaux de contrôle dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement). Ces méthodes, utilisées uniquement pour les systèmes PV sont la méthode de tension en circuit ouvert (**V_{co}**), la méthode du courant de court-circuit (**I_{cc}**). [61][62]

- **Méthodes directes** :

Les valeurs instantanées de la tension ou du courant de sortie PV sont généralement utilisées pour générer les signaux de commande et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du PV. 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. [61].[62]

Comme la conductance incrémentale (Inc.C), l'escalade (HC) et la plus utilisé perturber et observer (PandO) . L'escalade (HC) est basée sur la perturbation du cycle de service

du convertisseur de puissance connecté. La conductance incrémentale (Inc.C) est calculée à l'aide de la dérivée de la puissance du système PV en respectant sa tension qui doit être égale à zéro au MPP ; cependant, il serait positif à gauche du MPP et négatif à droite. Le P&O, généralement similaire dans son concept à la méthode HC, c'est une technique itérative pour le MPPT ; il mesure les caractéristiques photovoltaïques et perturbe ensuite le point de fonctionnement respectif de l'installation photovoltaïque afin de répondre à la direction du changement. [60].

La figure (II.9) nous montre l'efficacité des différentes méthodes directes, d'après cette figure on remarque que pour les méthodes:

Cv : le coût de son application est simple et que les efficacités sont peu nombreuses.

INC : le coût de son application est très élevé et que son efficacité est élevée.

P&O : le coût de son application est moyen, en même temps son efficacité est très élevée.

On tire de ces résultats que la méthode P&O est le plus couramment utilisée.

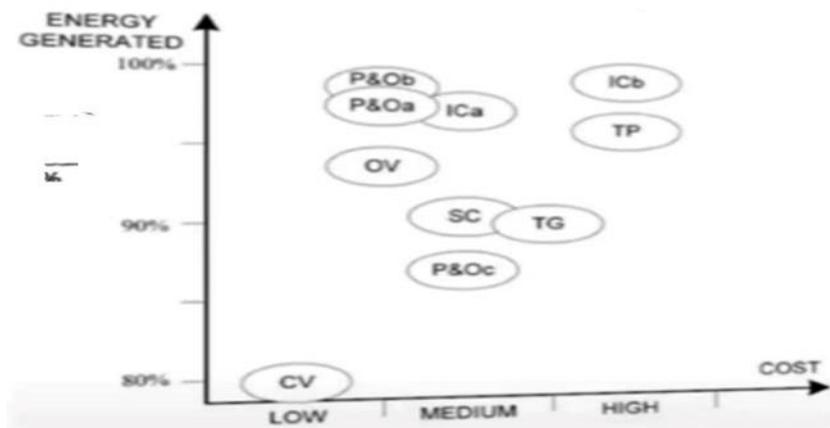


Figure II-9 : Variation de l'efficacité des méthodes MPPT direct en fonction de coût.[63]

II.7.2. Les Méthodes non conventionnels (intelligentes)

Ces méthodes englobent, les méthodes basées sur l'intelligence artificielle et les méthodes intelligentes bio-inspirées.

- **Les méthodes MPPT basées sur l'intelligence artificielle (IA)**

Ces dernières années des techniques de commandes plus robustes ont été associées à la commande MPPT telle que la logique floue, réseaux de neurones et les systèmes neuro-flous.[61][62]

En général, toutes les techniques MPPT basées sur l'IA présentent une vitesse de convergence rapide, moins d'oscillations en régime permanent et un rendement élevé, par rapport aux techniques MPPT conventionnelles. Cependant, les techniques MPPT basées sur l'IA nécessitent beaucoup de calculs et sont coûteuses à mettre en œuvre.

- **Les méthodes MPPT basées sur l'inspiration biologique (méta-heuristique)**

Les algorithmes dits non conventionnels ont pris de plus en plus d'importance en raison de leur capacité à gérer la courbe photovoltaïque multi-pics, la convergence plus rapide et la garantie de la convergence vers le pic global. Les systèmes de colonies de fourmis (ACS), l'algorithme de luciole clignotante (FA), l'algorithme de recherche de coucou (CSA), la méthode d'optimisation de l'essaim de particules (PSO) et la méthode d'optimisation du loup gris (GWO) sont quelques-uns des algorithmes évolutifs (EA) populaires et récents. Parmi ces techniques, la méthode PSO a la structure la plus simple et la plus facile à mettre en œuvre [60].

Dans cette partie, on présentera l'aspect théorique de quelques méthodes (conventionnels et non conventionnels) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont :

- Méthode de perturbation et observation (P&O)
- Méthode de la Particle Swarm par le PSO.
- Méthode d'optimisation du loup gris (Grey Wolf Optimization GWO)

II.8. Méthode de Perturbation et Observation (P&O)

L'algorithme d'observation de perturbation et de suivi PPM est le plus couramment utilisé, nous mesurons la tension (V) et le courant (I), puis calculons la puissance (P).

Cette dernière, représentée sur la figure II.10, peut être implémentée de manière entièrement numérique [64].

Nous décrivons le fonctionnement de l'algorithme MPPT. Le signe de la dérivée puissance nous permet d'exécuter cet algorithme.

Nous décrivons le fonctionnement de l'algorithme MPPT. Le signe de la dérivée de puissance nous permet d'exécuter cet algorithme.

► Si la dérivée est positive $dP/dv > 0$; l'augmentation du rapport cyclique α , indique que nous nous approchons du PPM.

► Si la dérivée est négative $dP/dv < 0$;

la diminution du rapport cyclique α , indique que nous nous dépassons du PPM.

► Si la dérivée est nulle $dP/dv = 0$;

ceci indique que c'est la PPM.

A partir du signe de la dérivée de puissance nous pouvons déterminer le sens recherche du point de puissance maximal (défini par le paramètre alpha) à l'aide de ce que nous notons dans la figure ci-dessus :

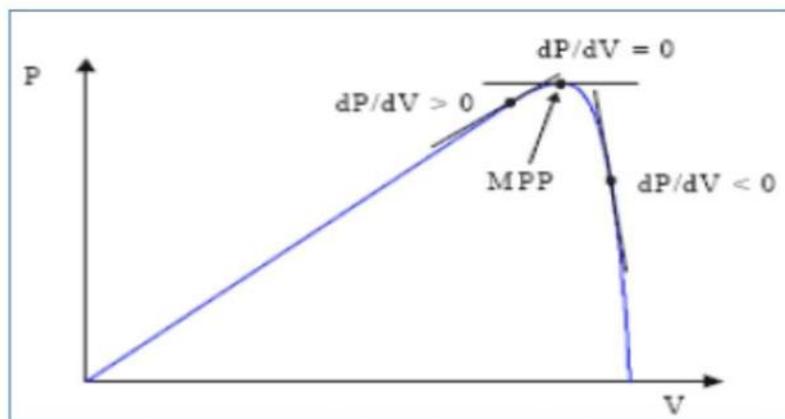


Figure II-10 : Signe de dP/dV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance[64]

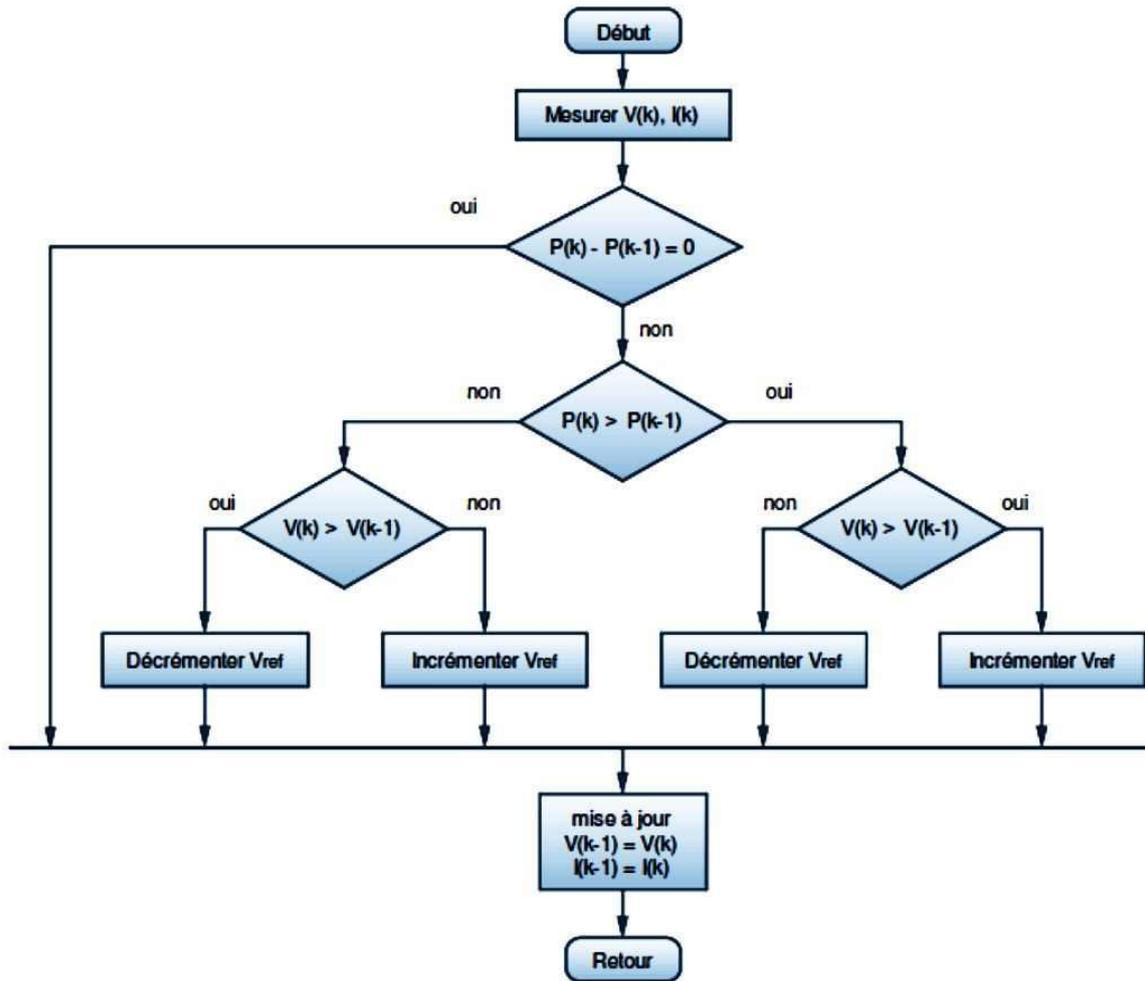


Figure II-11 : Organigramme de la méthode P&O [64]

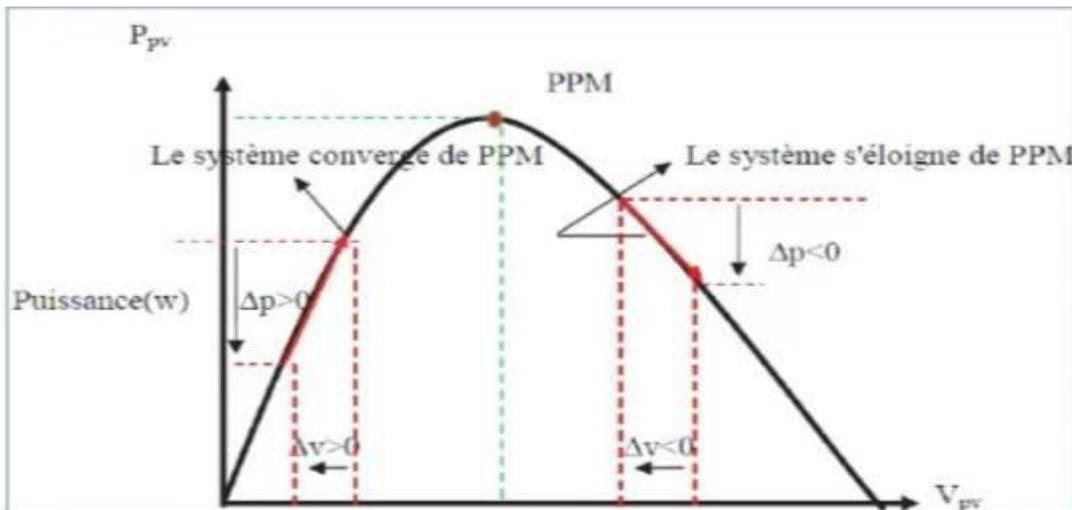


Figure II-12 : Schéma de convergence vers le PPM par P&O [64].

En général, deux capteurs sont nécessaires pour mesurer à la fois la tension et le courant, à partir desquels la puissance est calculée. Cependant, il est parfois possible d'estimer le courant

en se basant uniquement sur la tension mesurée, ce qui élimine alors le besoin d'un capteur de courant.

Une variante de l'algorithme P&O utilise uniquement deux mesures : le courant et la tension en sortie du convertisseur. L'objectif est de maximiser la puissance en sortie, en conservant le même principe de fonctionnement avec quelques ajustements.

Malgré des résultats prometteurs en simulation avec un convertisseur idéal, il n'a pas été prouvé en pratique que le point de puissance maximale (MPP) est atteint. Dans la mise en œuvre de la méthode P&O, l'utilisation d'un microprocesseur est préférable, bien que des circuits analogiques puissent également être utilisés.[65]

II.8.1. Les avantages et les inconvénients

Les avantages

- Structure de régulation simple
- Nombre des paramètres mesures réduit

Les inconvénients

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [66]

II.9. La méthode d'optimisation d'essaim des particules (PSO)

En 1995, James Kennedy et Russell Eberhart [67] ont développé l'algorithme d'optimisation d'essaim de particules (Particle swarm optimization (PSO)), qui inspiré sur le comportement social des animaux, tels que les poissons et les oiseaux.

PSO en tant que méthode méta-heuristique est utilisée pour optimiser une fonction difficile à exprimer analytiquement. L'algorithme PSO maintient un groupe d'individus (appelés particules), où chaque particule représente une solution candidate. Les particules suivent un comportement simple : elles imitent le succès des particules voisines et leurs propres succès obtenus. La position d'une particule est donc influencée par la meilleure particule d'un voisinage P_{best} ainsi que par la meilleure solution trouvée par toutes les particules de l'ensemble de la population G_{best} . La position des particules x_i est ajustée en utilisant :

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \tag{II.9}$$

où la composante de vitesse v_i^{k+1} représente la taille du pas.

La vitesse est calculée par :

$$v_i^{k+1} = \omega \cdot v_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{besti} - X_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G_{best} - X_i^k) \quad (II.10)$$

où : ω : le poids d'inertie.

c_1, c_2 : les coefficients d'accélération.

r_1, r_2 : des nombres positifs aléatoires entre 0 et 1.

P_{besti} : la meilleure position personnelle de la particule i

G_{best} : la meilleure position des particules dans l'ensemble population

II.9.1. Commande MPPT d'un system PV par PSO

Afin d'implémenter la méthode PSO dans l'algorithme MPPT, les rapports cycliques d_i avec une population composée de N individus sont définis :

$$x_i^k = d_i^k = [d_1, d_2, \dots, d_N] \quad (II.11)$$

La fonction objective est définie comme :

$$P(d_i^k) > P(d_i^{k-1}) \quad (II.12)$$

La méthode contient les étapes suivantes :

1. Sélection des valeurs des paramètres :

Les valeurs des paramètres requis dans le PSO, y compris la taille de la population et le poids d'inertie sont sélectionnées.[66]

2. Initialisation :

Les particules PSO sont généralement initialisées au hasard dans l'espace de recherche. Mais pour l'algorithme MPPT l'initialisation peut se faire pour des points fixes.

3. Mettre à jour le meilleur rapport cyclique individuel et global :

Pour chaque rapport cyclique d_i , la puissance de sortie PV correspondante $P(d_i^k)$ est calculée en multipliant la tension mesurée (V_i) par le courant (I_i). Puis, l'algorithme vérifie si cette valeur de rapport cyclique se traduit par une meilleure valeur de fitness individuelle (par rapport à l'ancien P_{besti}). Dans ce cas, la meilleure position personnelle (P_{besti}), ainsi que la meilleure valeur de fitness individuelle correspondante p_{besti} , sont mises à jour ; sinon, p_{besti} conserve sa valeur actuelle. Le meilleur cycle de service global, d_{best} , est déterminé en comparant les valeurs de fitness de la population réelle avec la meilleure puissance PV global obtenue G_{best} .

4. **Mettre à jour la vitesse et la position de chaque particule** : Après le processus d'évaluation, la vitesse et la position de chaque particule dans l'essaim sont mises à jour. Les nouveaux cycles d'utilisation sont ensuite calculés pour chaque itération par les équations (II.9) et (II.10)

L'organigramme de l'algorithme PSO est présenté dans la Figure II.13

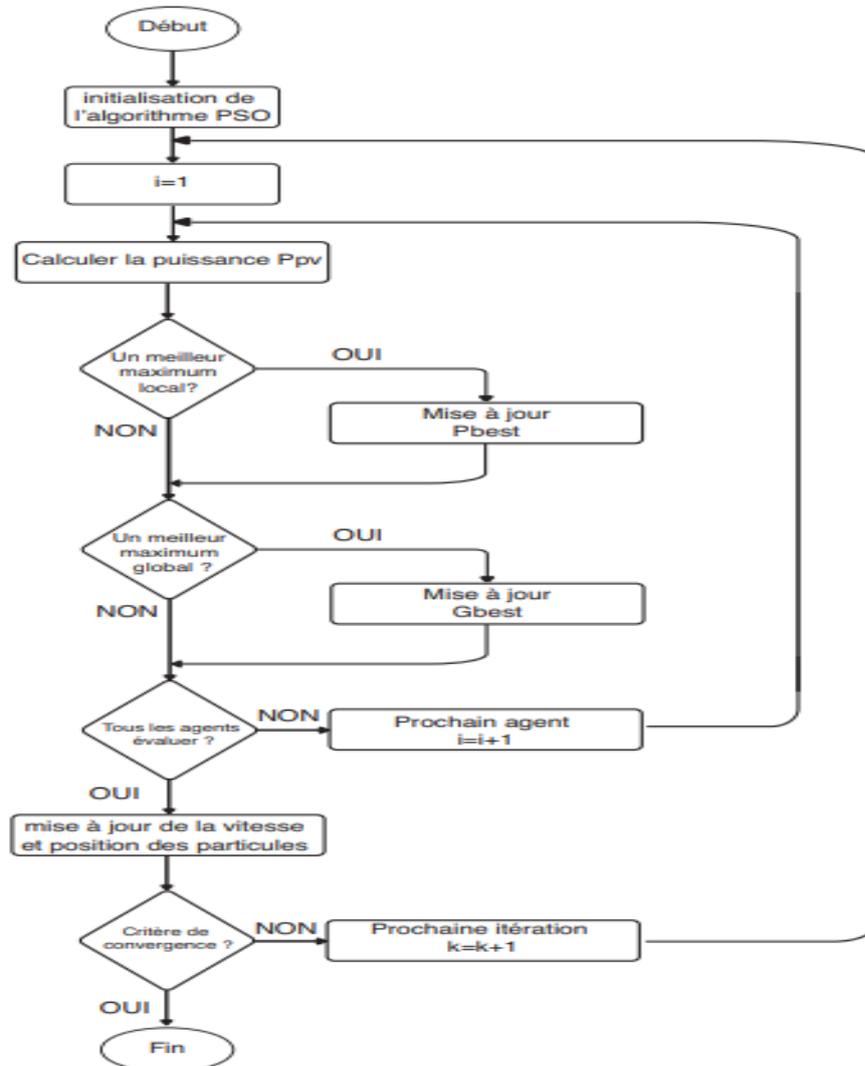


Figure II-13 : L'Organigramme de L'algorithme MPPT/PSO.

II.9.2. Les avantages et les inconvénients de PSO

Les avantages:

- Elle présente l'avantage d'être efficace sur une vaste gamme des problèmes.
- Facile à programmer dans n'importe quel langage de programmation.
- Simple à implémenter, adapté.

- Efficace sur un espace de recherche continu.

Les inconvénients:

- Explosion du système (si une particule utilise une vitesse très grande elle peut sortir de l'espace de recherche).[68]
- L'initialisation aléatoire des positions, peut conduire l'algorithme à stagner dans un optimum local.
- Influencé par la topologie de voisinage choisie.
- Manque de diversité par rapport aux algorithmes évolutionnaires.

II.10. L'algorithme d'optimisation du loup gris (Grey Wolf Optimization GWO)

II.10.1. Inspiration

GWO est un algorithme basé sur un essaim inspiré par l'intelligence sociale du leadership et des stratégies de chasse du loup gris. Généralement, le loup gris a quatre meutes (Alpha, Beta, Delta et Omega). Dans chaque meute de loups gris, il existe une hiérarchie sociale commune qui dicte le pouvoir et la domination (voir figure II.14). Dans la stratégie hiérarchique du loup gris, le loup le plus puissant est alpha et mène toute la meute dans les processus de chasse, de migration et d'alimentation. En cas d'absence de loup alpha de la meute, le loup le plus fort des loups de meute bêta prend la tête de la meute. La puissance et la domination des deux autres meutes delta et oméga sont inférieures à alpha et bêta comme on peut le voir sur la figure 3. Cette intelligence sociale est la principale inspiration de l'algorithme GWO. Une autre inspiration est l'approche de la chasse aux loups gris. Lorsqu'ils chassent leurs proies, les loups gris suivent un ensemble d'étapes efficaces : encercler et attaquer. Cela leur permet de chasser de grosses proies.[69]

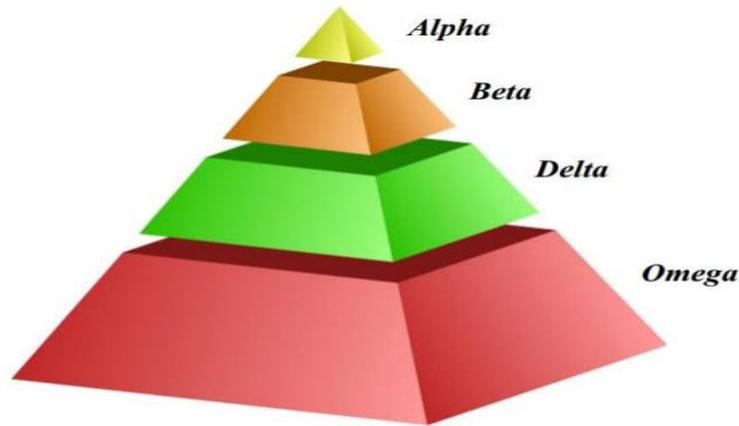


Figure II-14 : Hiérarchie sociale des loups gris

II.10.2. Etapes de la chasse

En plus de leur hiérarchisation sociale des loups, la chasse en groupe est un autre comportement social intéressant des loups gris. Les principales phases de la chasse au loup gris sont les suivantes :

- Suivre et s’approcher de la proie.
- Poursuivre, encercler et harceler la proie jusqu’à ce qu’elle cesse de bouger.
- Attaque de la proie.

II.10.3. Modélisation mathématique :

• Encerclement

En tant que phase d’encerclement, la première étape du processus de chasse pour chasser et encercler. Mathématiquement, dans cette phase, pour un espace indimensionnel, GWO considère deux loups (points) et met à jour leur position du premier en fonction de celle du second. Basé sur l’équation (II.13) :

$$\overrightarrow{X}(t + 1) = \overrightarrow{Xp}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \tag{II.13}$$

Où $X(t+1)$ représente la prochaine position du loup, $X(t)$ représente la position actuelle, A est une matrice de coefficients et D est un vecteur qui dépend de la position de la proie (Xp) et est calculé comme indiqué dans l’équation (II.14).

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \overrightarrow{Xp}(t) - \overrightarrow{X}(t)| \tag{II.14}$$

Où C peut être calculé par l’équation (II.15).

$$\vec{C} = 2 \cdot r \cdot \vec{z} \tag{II.15}$$

Où est un vecteur généré aléatoirement $\in [0,1]$. En utilisant ces deux équations, une solution est capable de se déplacer autour d'une autre solution. Notez que les équations utilisent des vecteurs, donc cela s'applique à n'importe quel nombre de dimensions. Un exemple de positions possibles d'un loup gris par rapport à une proie est illustré à la figure II.15.

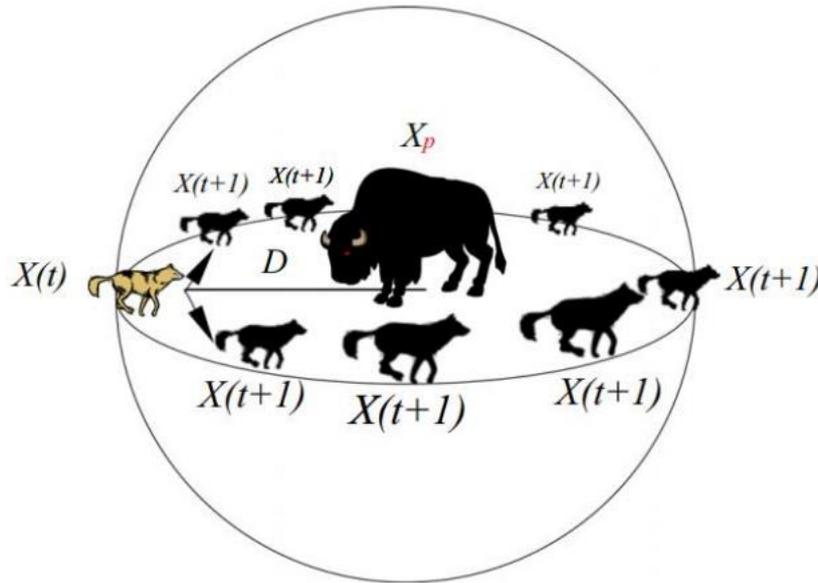


Figure II-15 : Variation des position des loups gris par rapport la proie

Notez que les composantes aléatoires des équations ci-dessus simulent différentes tailles de pas et vitesses de déplacement des loups gris. Les équations pour définir leurs valeurs sont les suivantes :

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{r1} \cdot \vec{a} - \vec{a} \quad (\text{II.16})$$

Où \vec{a} est un vecteur où ses valeurs sont linéairement diminuées de 2 à 0 au cours de l'exécution. $\vec{r1}$ est un vecteur généré aléatoirement à partir de l'intervalle $[0,1]$. L'équation pour mettre à jour le paramètre \vec{a} est la suivante

$$a = 2 - t \left(\frac{2}{T} \right) \quad (\text{II.17})$$

Où t indique l'itération actuelle et T est le nombre maximal d'itérations.

- **Phase d'attaque (chasse)**

Avec les équations présentées ci-dessus, un loup peut se déplacer vers n'importe quel point d'une hypersphère autour de la proie. Cependant, cela ne suffit pas à simuler l'intelligence sociale des loups gris. Il a été discuté plus haut que la hiérarchie sociale joue un rôle clé dans la chasse et la survie d'une meute. Pour simuler la hiérarchie sociale, les trois meilleures solutions sont considérées comme alpha, bêta et delta. Bien que dans la nature, il puisse y avoir

plus d'un loup dans chaque catégorie, on considère qu'il n'y a qu'une seule solution appartenant à chaque classe dans GWO par souci de simplicité.

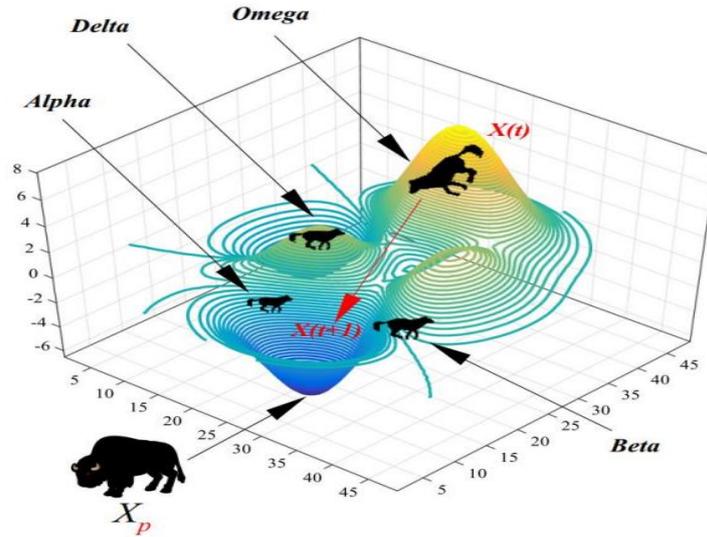


Figure II-16 : Alpha, bêta, delta et oméga dans GWO.

Les concepts d'alpha, bêta, delta et d'oméga sont illustrés à la figure II.16. Notez que l'objectif est de trouver le minimum dans ce paysage de recherche. On peut voir sur cette figure que alpha est la solution la plus proche du minimum, suivi de bêta et delta. Le reste des solutions est considéré comme des loups oméga. Il n'y a qu'un seul loup oméga dans la figure II.16, mais il peut y en avoir plus. Dans GWO, on suppose que alpha, bêta et delta sont toujours les trois meilleures solutions obtenues jusqu'à présent. L'optimum global des problèmes d'optimisation est inconnu, il a donc été supposé que alpha, bêta et delta ont une bonne idée de leur emplacement, ce qui est raisonnable car ce sont les meilleures solutions dans toute la population. Par conséquent, les autres loups devraient être obligés de mettre à jour leurs positions comme suit [69]:

$$\vec{X} = \left(\frac{1}{3}\right)\vec{X}_1 + \left(\frac{1}{3}\right)\vec{X}_2 + \left(\frac{1}{3}\right)\vec{X}_3 \quad (\text{II.18})$$

Où X_1, X_2 et X_3 sont calculés avec l'équation (II.19) (II.20) (II.21)

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha(t) + \vec{A} \cdot \vec{D}_\alpha \quad (\text{II.19})$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta(t) + \vec{A} \cdot \vec{D}_\beta \quad (\text{II.20})$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta(t) + \vec{A} \cdot \vec{D}_\delta \quad (\text{II.21})$$

Où D_α, D_β et D_δ peut être calculé par l'équation :

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}(t)| \quad (\text{II.22})$$

$$\overrightarrow{D}_\beta = |\overrightarrow{C}_2 \cdot \overrightarrow{X}_\beta(t) - \overrightarrow{X}(t)| \quad (\text{II.23})$$

$$\overrightarrow{D}_\delta = |\overrightarrow{C}_3 \cdot \overrightarrow{X}_\delta(t) - \overrightarrow{X}(t)| \quad (\text{II.24})$$

II.10.4. Implémentation du MPPT basé sur GWO:

Pour implémenter le MPPT basé sur GWO, le rapport cyclique d est défini comme un loup gris. Par conséquent, l'équation (II.19) peut être modifiée comme suit :

$$d_i(k+1) = d_i(k) - A \cdot D \quad (\text{II.25})$$

Ainsi, la fonction de fitness de l'algorithme GWO est formulée comme :

$$P(d_i^{k+1}) > P(d_i^k) \quad (\text{II.22})$$

Où :

P : la puissance.

d : le rapport cyclique.

i : le nombre de loups gris actuels.

k : le nombre d'itérations.

L'organigramme de l'algorithme GWO est présenté dans la Figure II.17

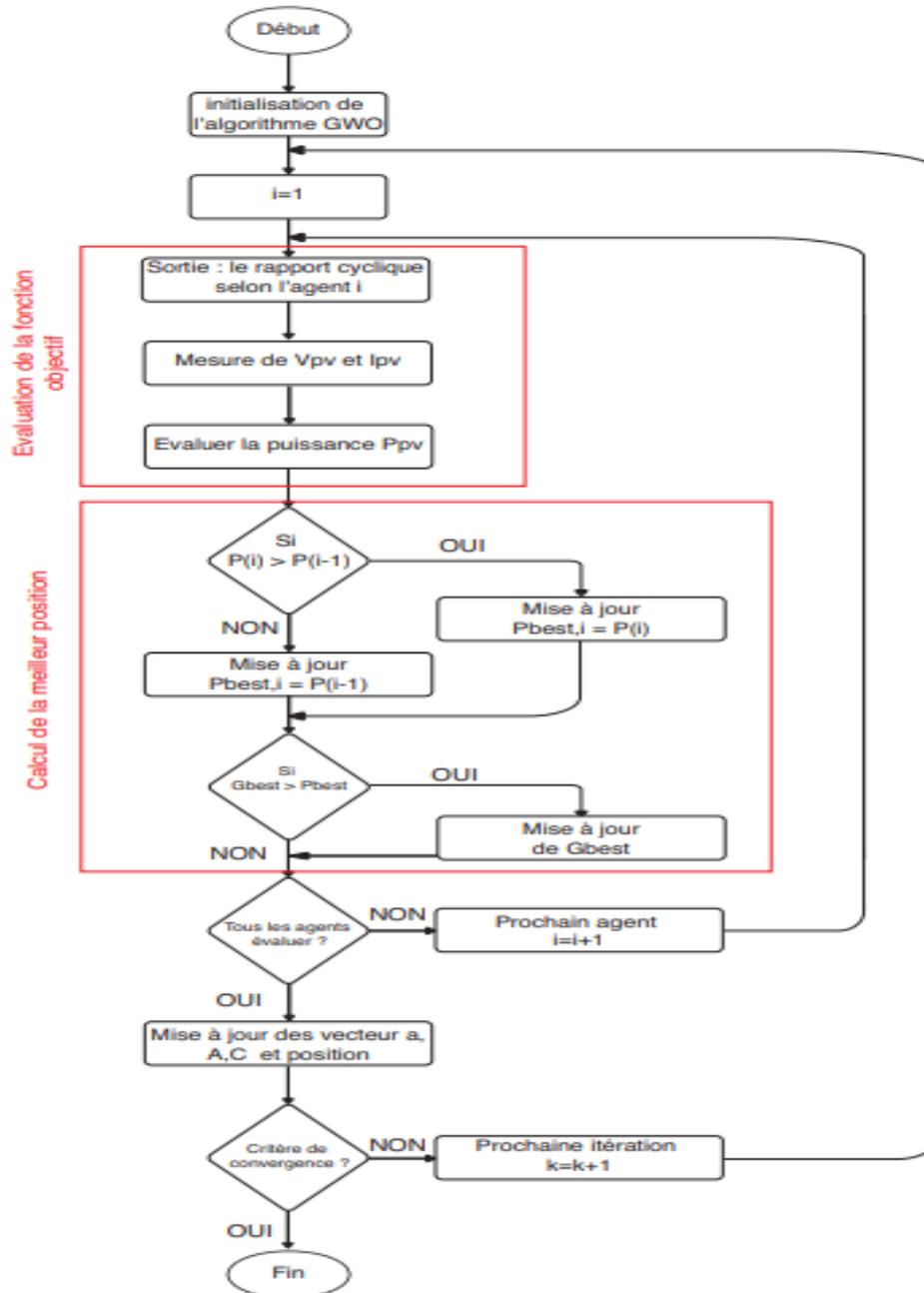


Figure II-17 : L'organigramme de l'algorithme GWO

II.10.5. Les avantages et les inconvénients de GWO

Avantages:

- **Implémentation simple:** L'algorithme GWO est facile à mettre en œuvre, ce qui le rend accessible même aux débutants.
- **Convergence rapide:** Il converge rapidement vers des solutions optimales, ce qui est essentiel pour résoudre des problèmes d'optimisation.

- **Résultats supérieurs:** Le GWO offre des résultats de convergence supérieurs, ce qui en fait un choix efficace dans divers domaines.

Inconvénients:

- **Manque de diversité:** Comme tout algorithme, le GWO peut parfois manquer de diversité dans ses solutions, ce qui peut entraîner une convergence prématurée vers un minimum local.
- **Sensibilité aux paramètres:** La performance du GWO dépend des paramètres choisis, et leur réglage peut être délicat.
- **Limitations de la méthode:** Comme tout algorithme, le GWO a ses limites et ne convient pas à tous les types de problèmes

II.11. Conclusion

Pour résoudre le problème d'optimisation MPPT, de nombreux algorithmes ont été proposées dans la littérature. Ces méthodes réagissent différemment selon les situations, chacune a ses propres avantages et inconvénients et varie en termes de complexité, d'efficacité, de coût, de vitesse de convergence, de mise en œuvre matérielle etc.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étude et la modélisation des méthodes MPPT choisi pour notre travail et qui ont destiné pour la commande du système photovoltaïque constitué d'un GPV, d'un convertisseur Boost, d'une charge et le contrôleur MPPT. Nous avons étudié l'étage d'adaptation (une interface d'électronique de puissance) entre le système PV et la charge. Ensuite nous avons abordé les trois techniques les plus populaire pour la poursuite de point de fonctionnement a puissance maximale ; allant de la méthode conventionnelle la plus utilisée P&O aux méthodes bio-inspirées ; la Méthode de la Particle Swarm par le PSO et la méthode d'optimisation du loup gris (Grey Wolf Optimization GWO).

Dans le prochain chapitre nous effectuerons la simulation et la comparaison des méthodes MPPT proposées.

Chapitre III :

Simulation et Résultats

III.1. Introduction

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. Ce chapitre décrit les résultats de simulation par logiciel MATLAB/SIMULINK d'un système constitué d'un GPV avec hacheur Boost adapté par la commande MPPT. Donc on arrive dans ce chapitre à simuler les trois méthodes pour la recherche du Point de Puissance Maximum ; La méthode classique P&O et les méthodes intelligentes métaheuristiques, la PSO et la GWO, qui ont modélisé dans le chapitre 2.

III.2. L'outil MATLAB/Simulink

L'outil Matlab/Simulink, MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble:

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal :

Le DSP Workshop. SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.[70]

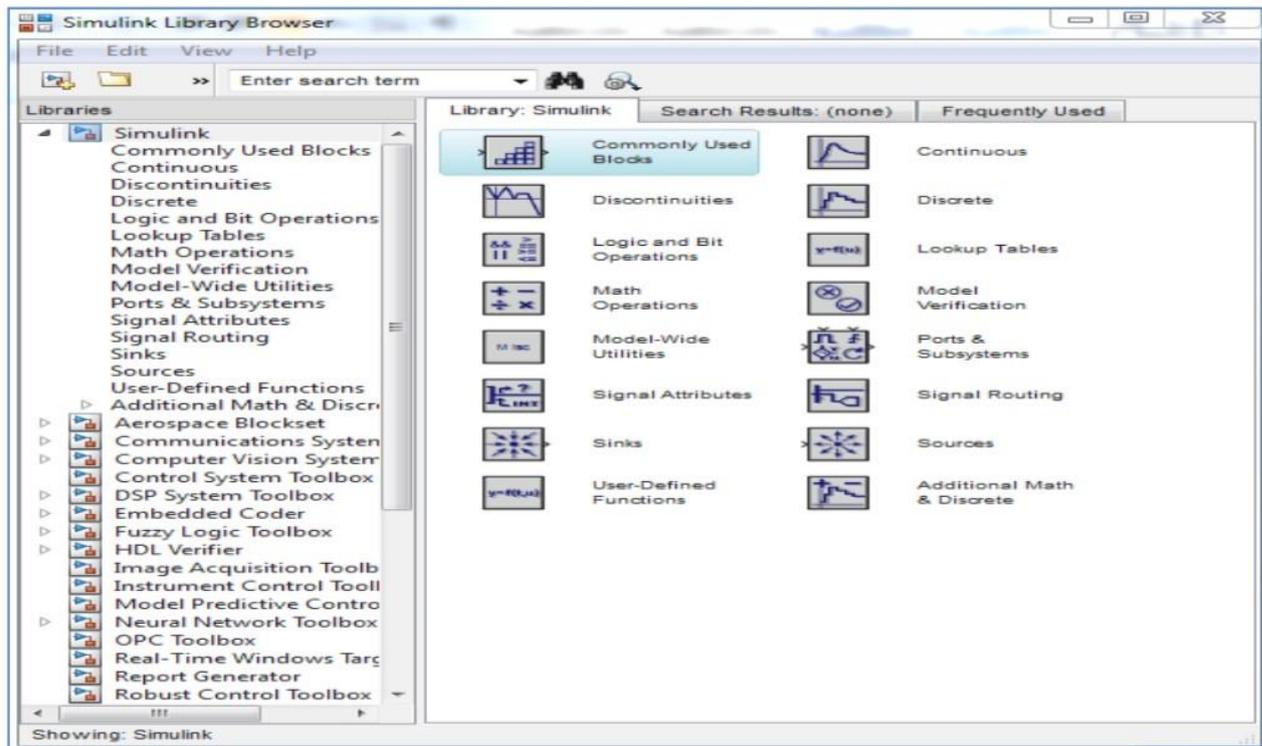


Figure III-1 : Bibliothèque SIMULINK.

III.3. Le Système Photovoltaïque

III.3.1. Caractéristiques de Générateur Photovoltaïque

Le panneau PV utilisé dans cette étude est un ensemble de modules PV, de type **Solar World Industries GmbH Sunmodule Plus SW 245mono**, connectés en série et en parallèle. Chaque module contient 60 cellules PV connectées en série. Les tableau III.1 indique les caractéristiques du module utilisé dans cette étude.

Tableau III-1 : Les Paramètres Electriques du GPV sous conditions standards.

| Paramètres Electrique sous conditions standards de test | SolarWorld Industries GmbH Sunmodule Plus SW 245mono |
|---|--|
| Puissance maximale Pmax (W) | 245.168 |
| La tension du point de puissance maximum - Vmpp (V) | 30.8 |
| Le courant du point de puissance maximum - Impp (A) | 7.96 |
| La tension du circuit ouvert - Vco (V) | 37.7 |
| Courant du court circuit - Isc (A) | 8.25 |

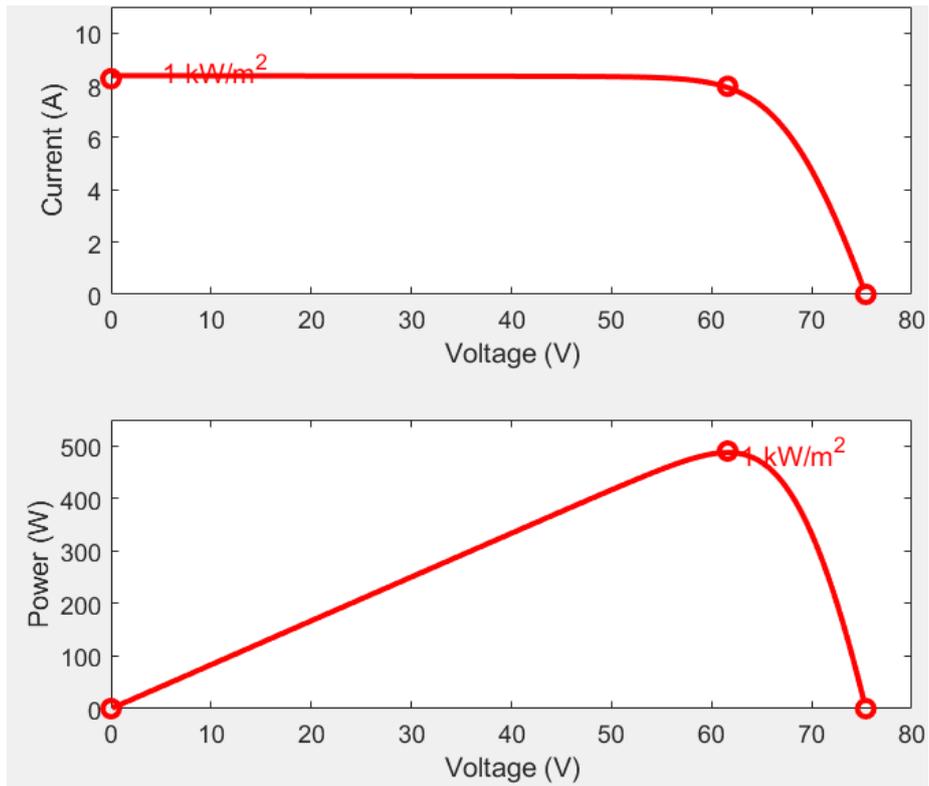


Figure III-2 : Les courbes caractéristiques P(V) et I(V) de GPV dans les conditions standards (1000 W/m² et 25 °C).

Les figures III.3 et III.4 représentent les caractéristiques lors de la variation de température et l'éclairement de GPV.

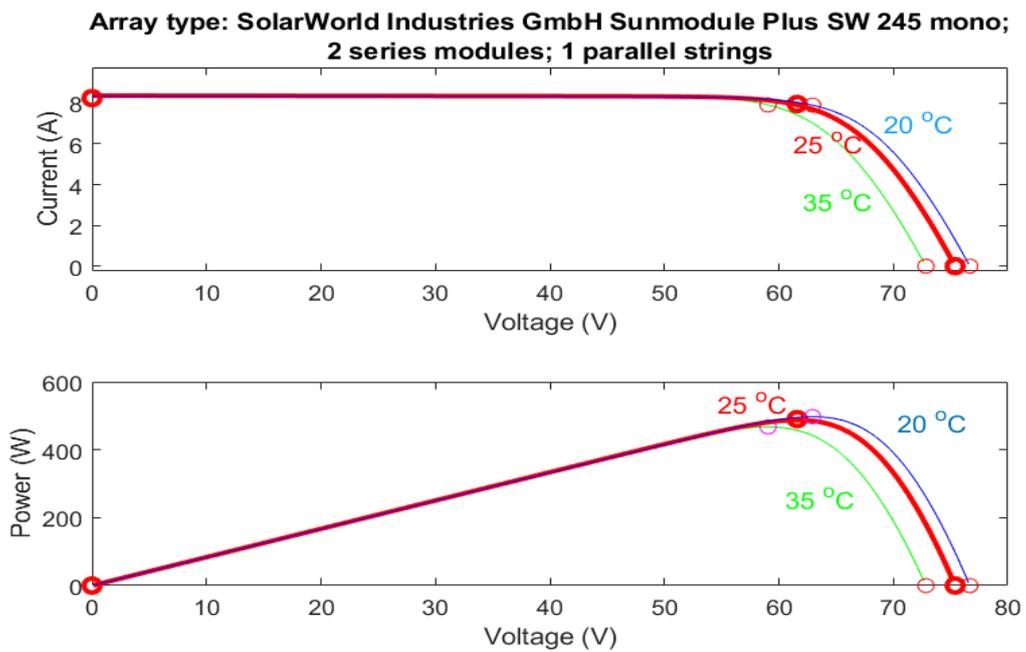


Figure III-3 : Les courbes caractéristiques P(V) et I(V) de GPV avec variation de température.

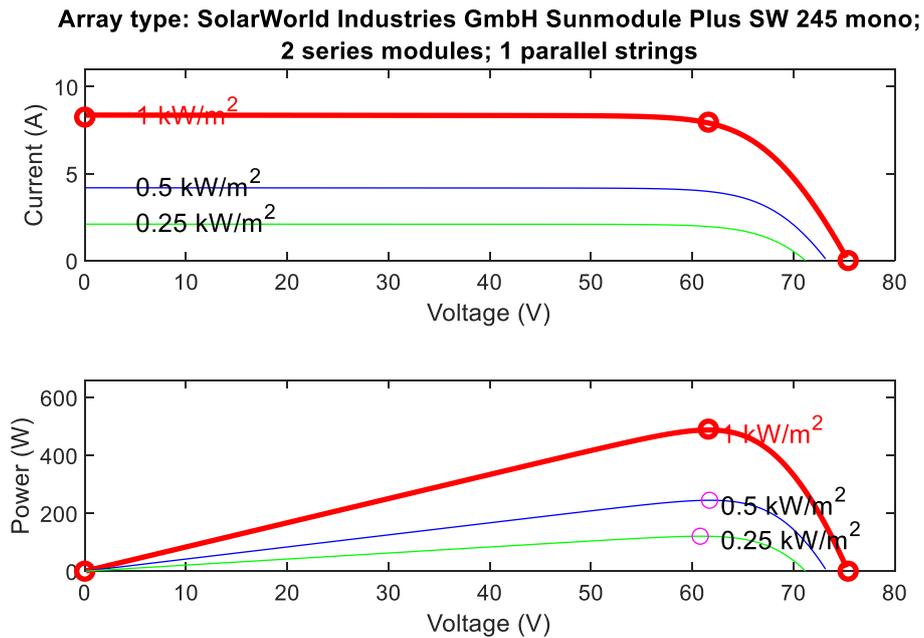


Figure III-4 : Les courbes caractéristiques P(V) et I(V) GPV avec variation d'éclairement.

III.3.2. Caractéristiques du GPV avec l'hacheur Boost et la commande MPPT

Pour une évaluation des performances du système photovoltaïque menu de la commande MPPT, nous allons simuler le fonctionnement de l'ensemble (GPV, hacheur, charge et MPPT), pour les paramètres suivants: , $C_1=0.003F, C_2=0.002F, R=50\Omega, L=0.01H$.

Nous avons procédé à la simulation du système ci-dessous figure (III.5), sous les conditions standard (température $25^\circ C$ et un éclairement $1000 W/m^2$). Notre choix a été de prendre V_{pv} et I_{pv} du GPV comme entrées du bloc de la commande et le rapport cyclique α comme sortie.

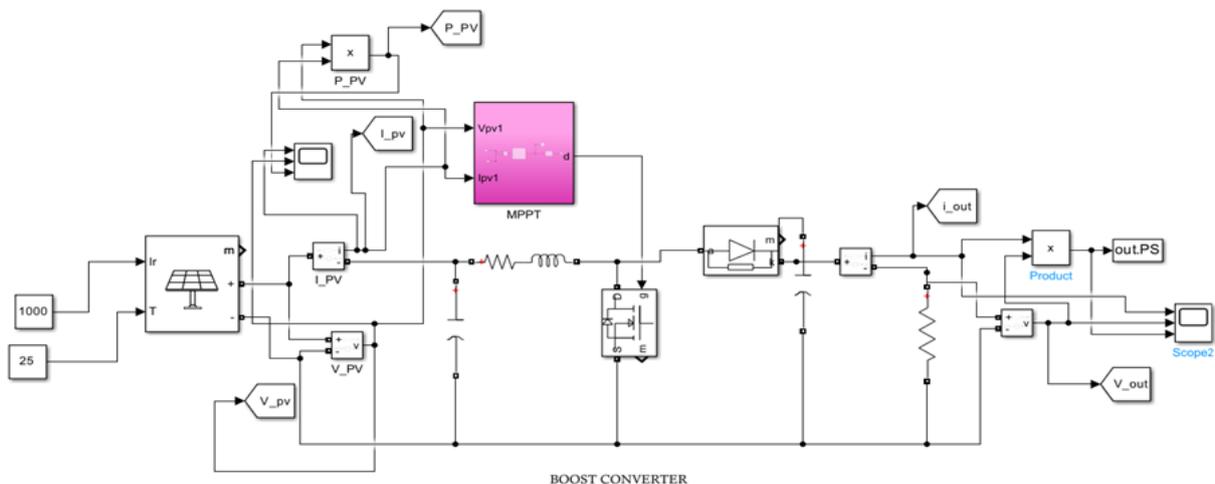


Figure III-5 : Schéma bloc Simulink du système global.

III.4. Simulation des résultats

III.4.1. Simulation avec la méthode P&O

Le schéma bloc Simulink de système utilisant la technique P&O est illustré sur la Figure III.6.

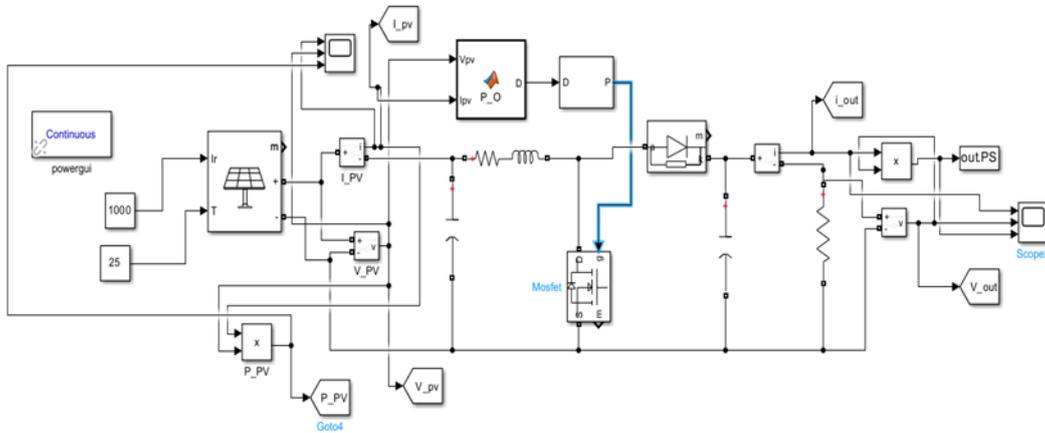


Figure III-6 : Schéma bloc Simulink de la technique P&O.

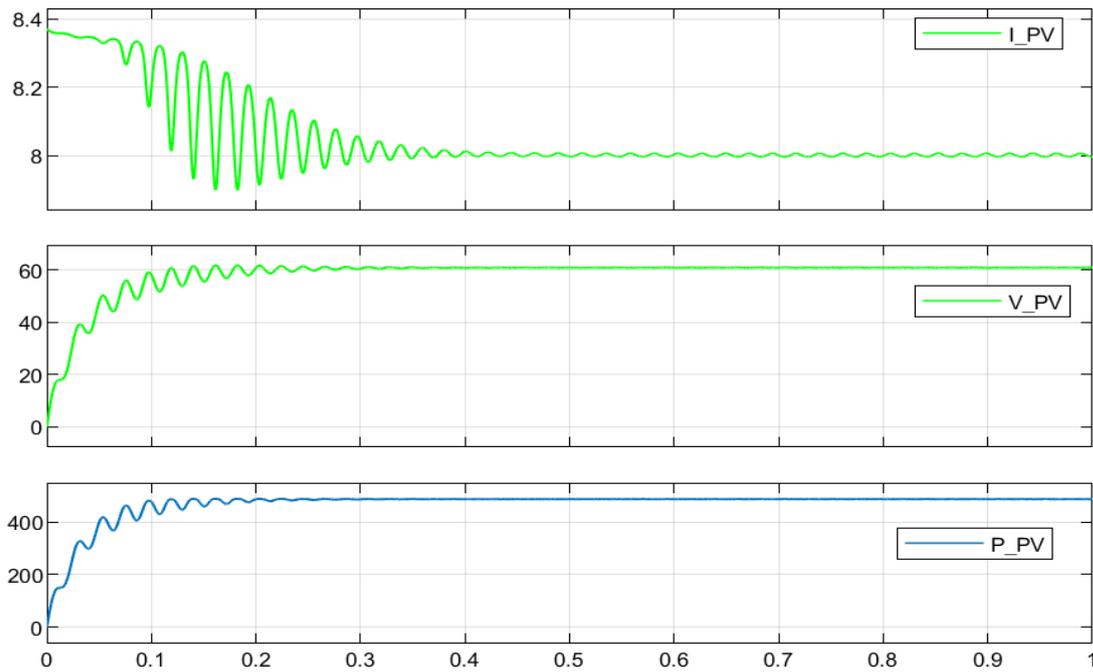


Figure III-7 : Caractéristiques d'entrée pour la méthode P&O.

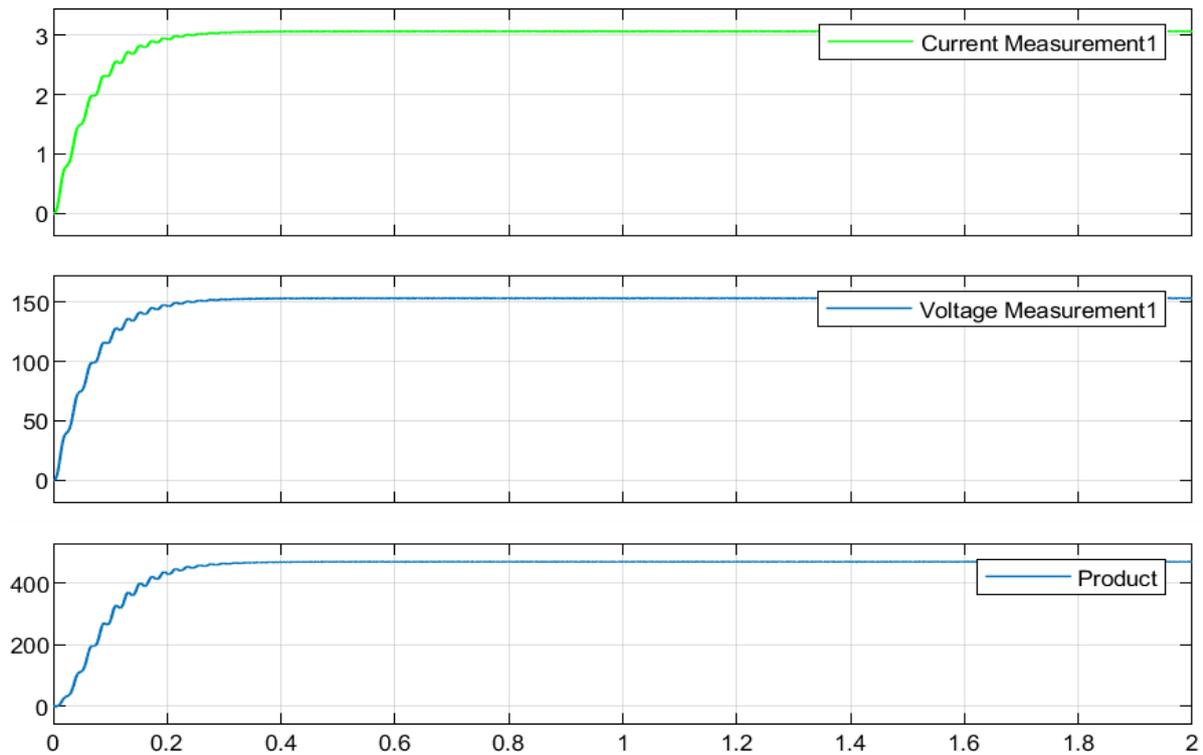


Figure III-8 : Caractéristiques de charge par la méthode P&O.

Dans les conditions standard ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{ W/m}^2$) les résultats de la simulation de la méthode P&O fournissent des informations précieuses sur la performance et l'efficacité d'un système photovoltaïque sous des conditions idéales, ce qui aide à concevoir et à optimiser ces systèmes pour une utilisation réelle.

À partir des résultats obtenus Figure III.7 ,Figure III.8, on remarque que la commande P&O permet de retrouver le point de puissance maximale du panneau (la même valeur donnée par le constructeur). Cette technique permet d'atteindre le PPM en $t=0,3\text{s}$. L'hacheur Boost fournit une tension de sortie $V_s = 150\text{V}$ devant $V_{pv} = 60\text{V}$. La puissance atteint la valeur de 468W .

III.4.2. Simulation avec la méthode PSO

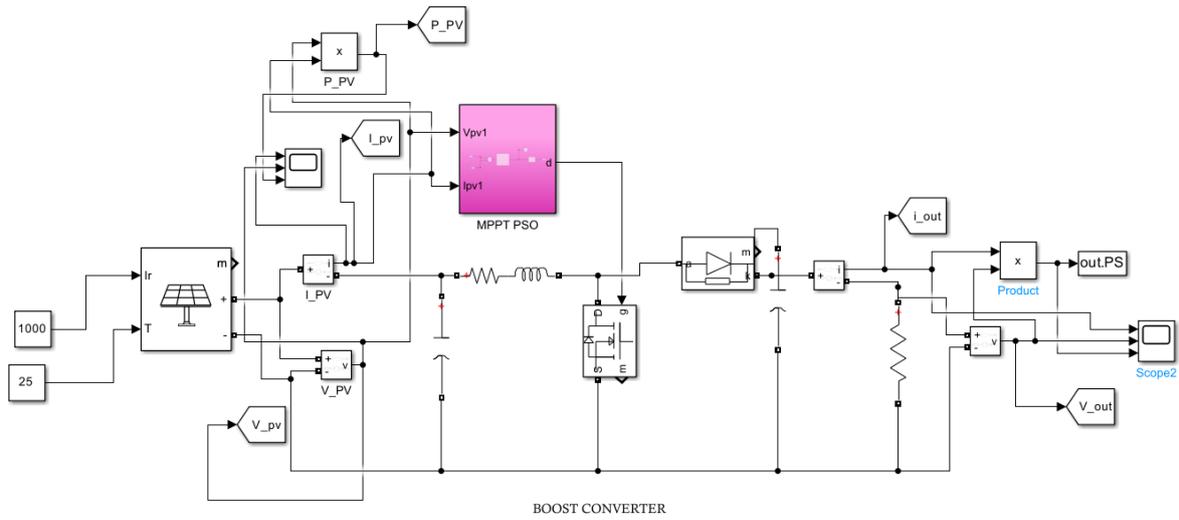


Figure III-9 : Schéma bloc Simulink de la technique PSO.

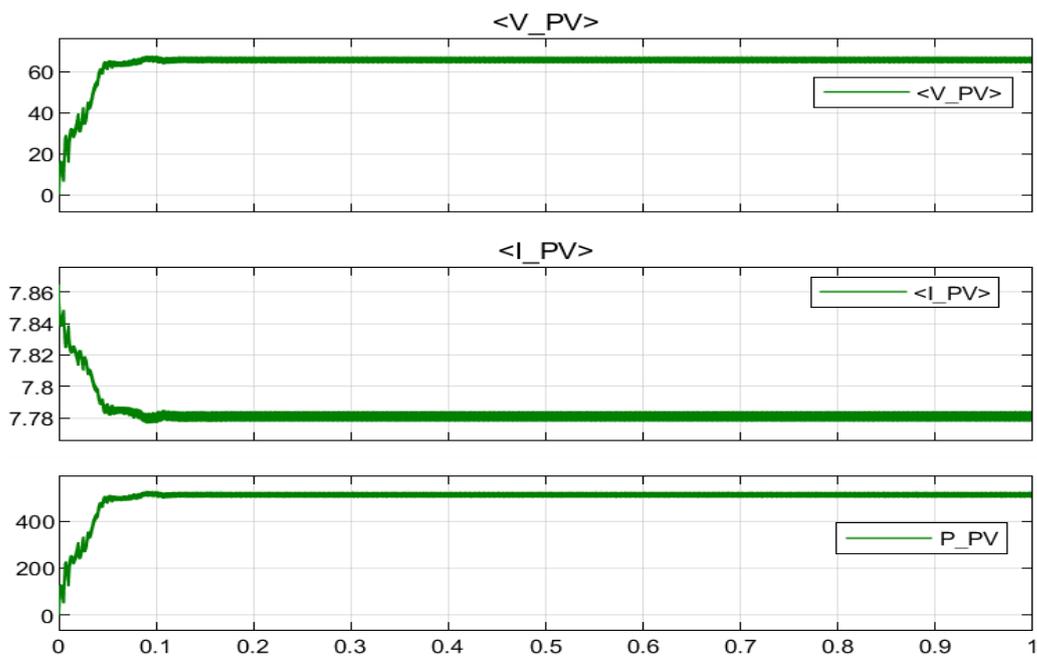


Figure III-10 : Caractéristiques d'entrée pour la méthode PSO.

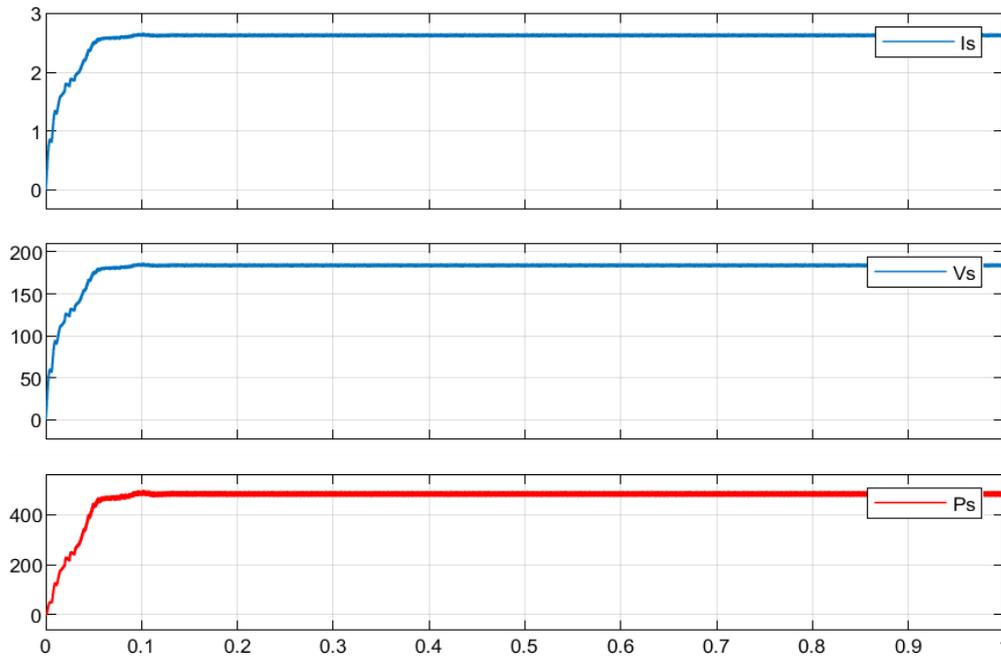


Figure III-11 : Caractéristiques de charge par la méthode PSO

À partir des résultats obtenus Figure III.10, Figure III.11, on remarque que, cette technique permet d'atteindre le PPM en $t= 0,10s$ et , le hacheur survolteur fournit une tension de sortie V_s supérieure à celle du générateur photovoltaïque arrive à 180V. La puissance atteint la valeur de 491W.

III.4.3. Simulation avec la méthode GWO

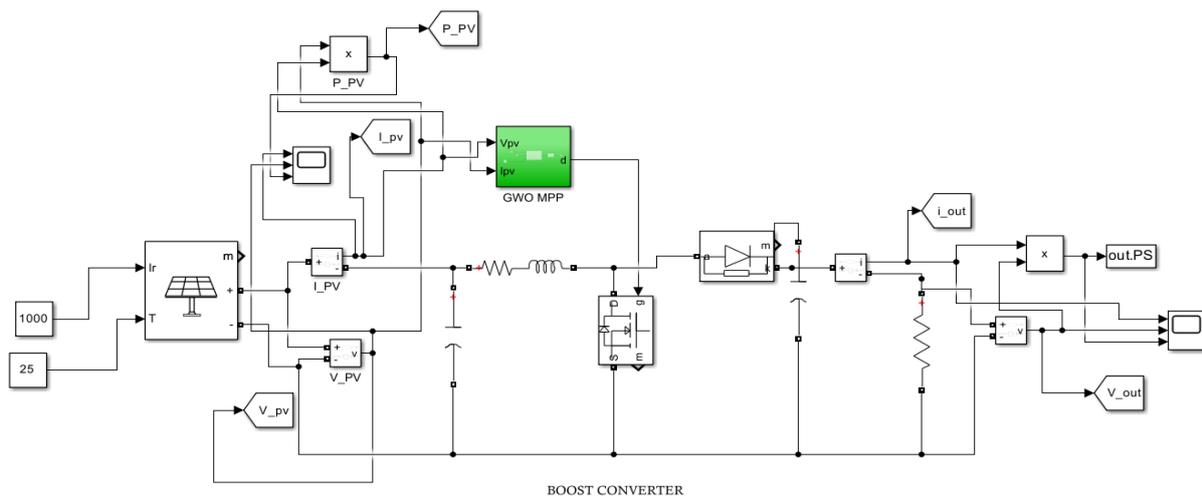


Figure III-12 : Schéma bloc Simulink de la technique GWO

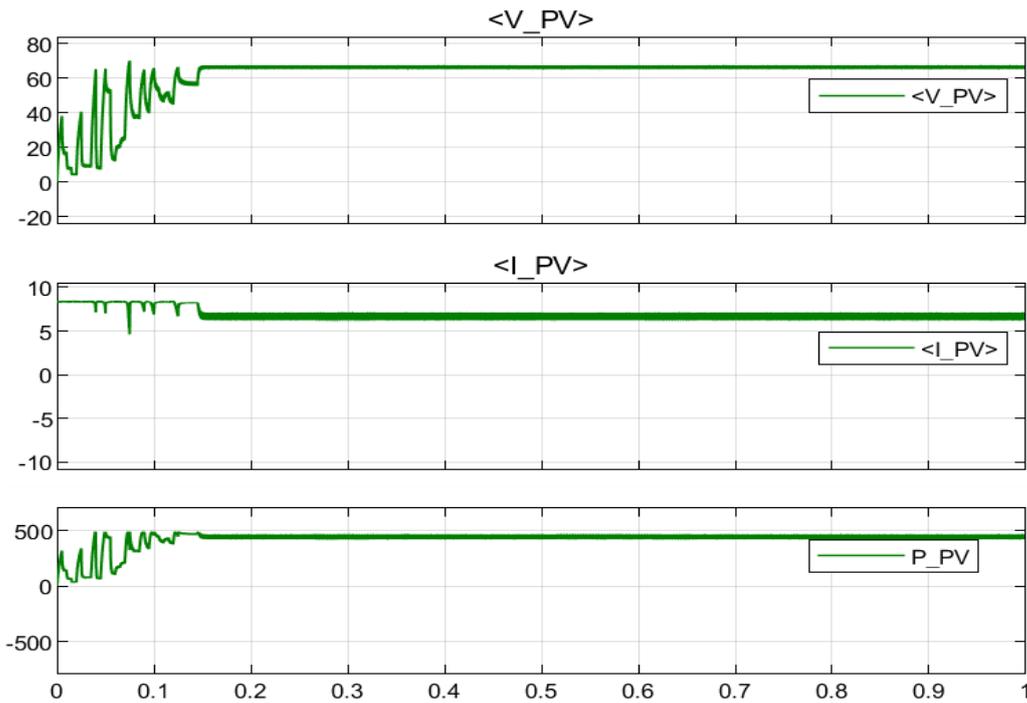


Figure III-13 : Caractéristiques d'entrée pour la méthode GWO

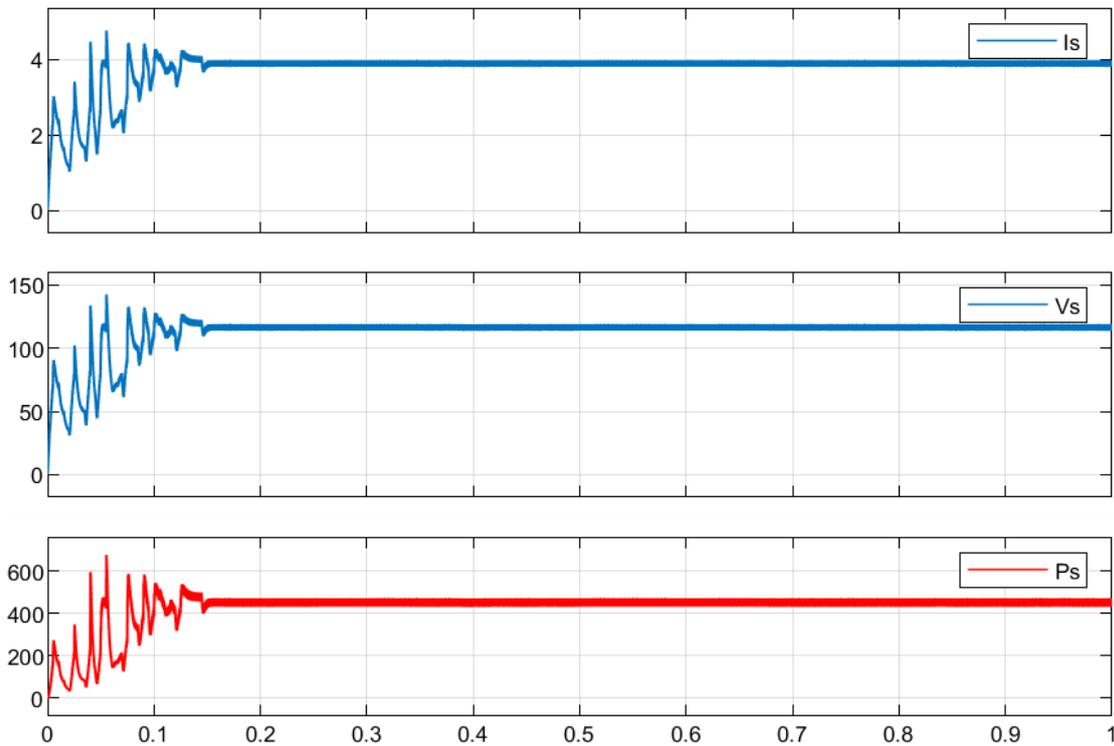


Figure III-14 : Caractéristiques de charge par la méthode GWO

Cette technique permet d'atteindre le PPM en 0,15s et, le hacheur survolteur fournit une tension de sortie V_s supérieure à celle du générateur photovoltaïque et puissance inférieure

à celle du générateur photovoltaïque et le courant augmente par rapport au courant de sortie du générateur photovoltaïque, qui diminue, et d'avoir une bonne poursuite des tension et puissance de références et de courant.

III.4.4. Comparaison des trois méthodes P&O, PSO et GWO

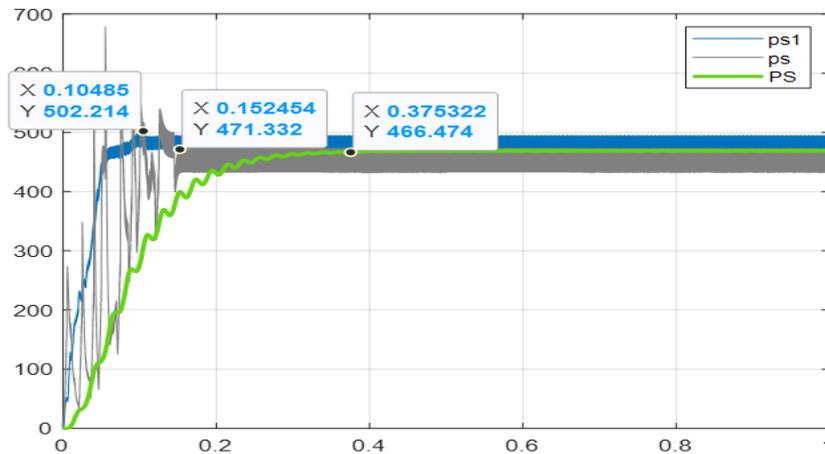


Figure III-15 : Comparaison des résultats de simulation des trois méthodes.

A partir de la figure III.14 on constate que :

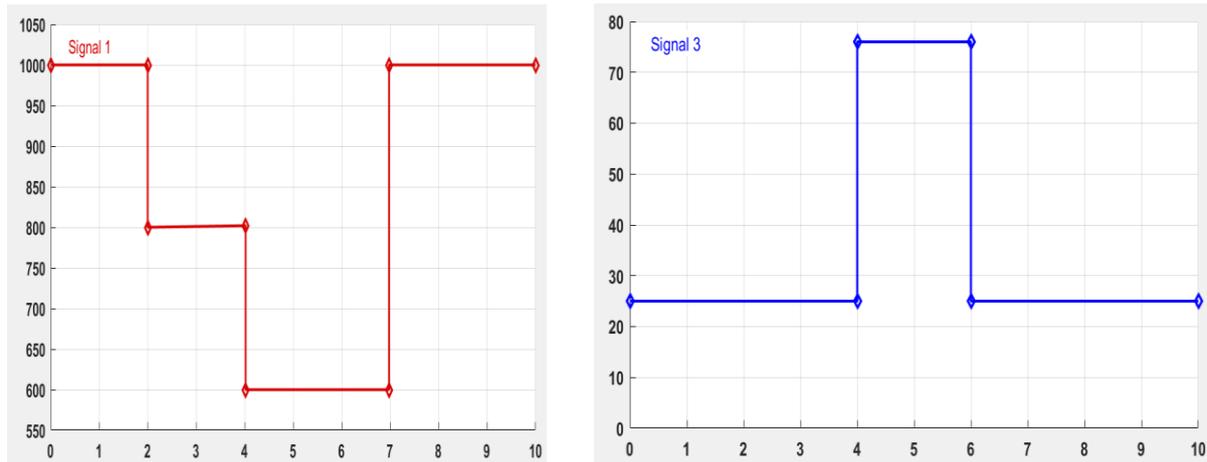
Ces résultats montrent que le hacheur survolteur et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles

- Les trois algorithmes proposés ont réussi à poursuivre le point maximum global.
- L'algorithme P&O a nécessité environ 0.3 secondes pour se stabiliser au maximum global $P_s=468$ W, par contre, l'algorithme GWO ne nécessite que 0.15 secondes à valeur de puissance égale 473 W, alors que l'algorithme PSO s'est stabilisé à 0.10 seconde, avec $P_s=491$ W.

III.5. Etudes des trois méthodes pour des conditions climatiques variables

Nous avons abordé le fonctionnement du système étudié en deux étapes :

- Eclairage variable et température étant égale à 25 °C (Figure III.17a).
- en fonction de la variation de la température (Figure III.17b) l'irradiation fixée à 1000 W/m².



(a)(b)

Figure III-16 : Variation de la température (b) et de l'éclairement (a)

Ces deux étapes ont pour objectif d'étudier le comportement des différentes commandes MPPT lors de condition de température et d'irradiance différentes. En réalité Ces deux grandeurs ne varient pas de manière brusque et instantanée, mais le but de la simulation est de tester la robustesse des commandes.

III.5.1. Simulation avec la commande P&O

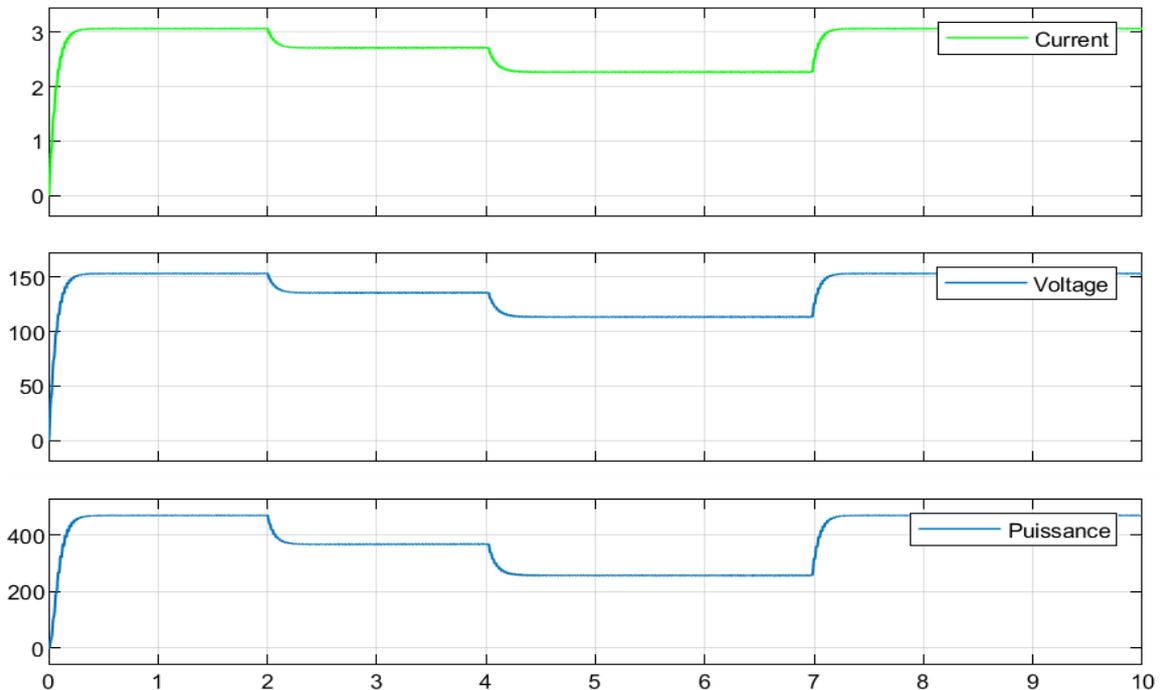


Figure III-17 : Résultats de la simulation de la méthode P&O avec variation de l'éclairement

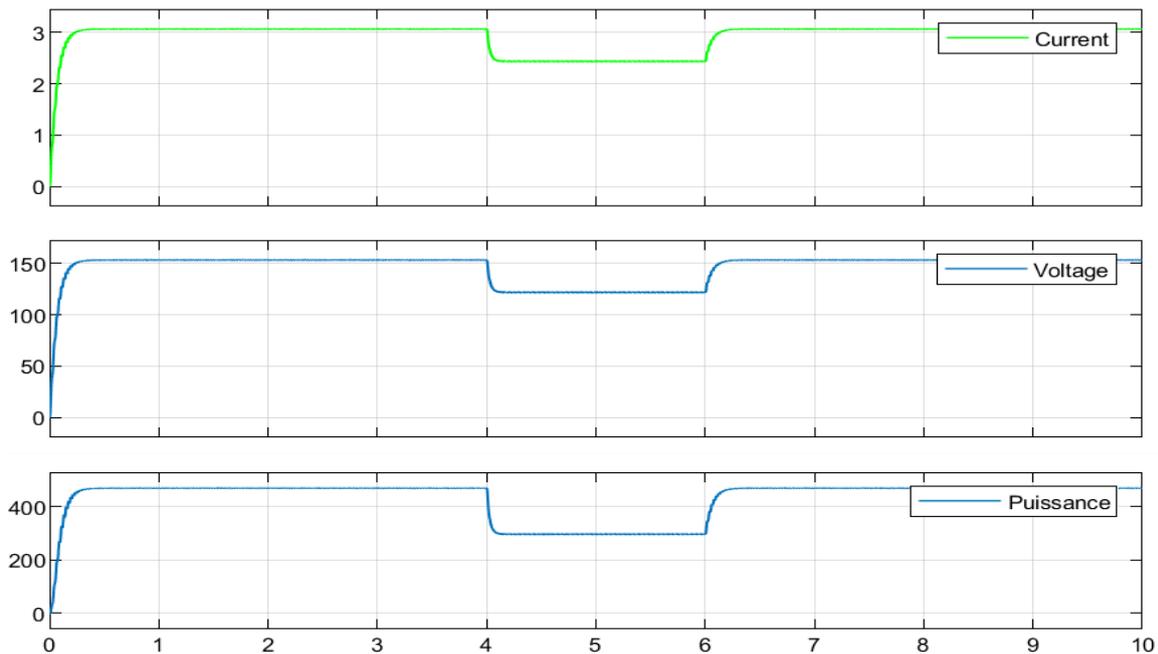


Figure III-18 : Résultats de la simulation de la méthode P&O avec variation de la température.

Les simulations montrent des variations de courant, de tension et de puissance en réponse aux changements de l'éclairement Figure III.17:

- Le courant de sortie est plus grand, alors qu'il diminuera à mesure que l'éclairement diminue et vice versa.
- La tension est plus élevée, alors qu'elle diminuera à mesure que l'éclairement diminue.
- La puissance générée est également sujette à des changements en fonction des changements de l'éclairement, car on observe un pic de puissance à un certain niveau de rayonnement, correspondant au point de puissance maximale (MPP) du GPV.
- Il affecte négativement le fonctionnement des panneaux solaires lorsqu'il est faible et positivement lorsqu'il est élevé, car il augmente leur efficacité.
- Cette technique permet d'atteindre le PPM en 0,3 s et d'avoir une bonne poursuite des tension et puissance de références. Vous pourrez évaluer l'efficacité du suivi du MPP et la rapidité de réponse du système aux changements d'irradiance.
- Enfin, nous concluons que les panneaux photovoltaïques fonctionnent bien dans un bon éclairage.

Les simulations montrent des variations de courant, de tension et de puissance en réponse aux changements de la température Figure III.18 :

- Nous remarquons que la température affecte négativement les panneaux solaires, car lorsque la température augmente, la capacité diminue en raison du faible courant et de la tension.
- Cette technique permet d'atteindre le PPM en 0,3s et d'avoir une bonne poursuite des tension et puissance de références.

Vous pourrez évaluer l'efficacité du suivi du MPP et la rapidité de réponse du système aux changements de température.

III.5.2. Simulation avec la méthode PSO

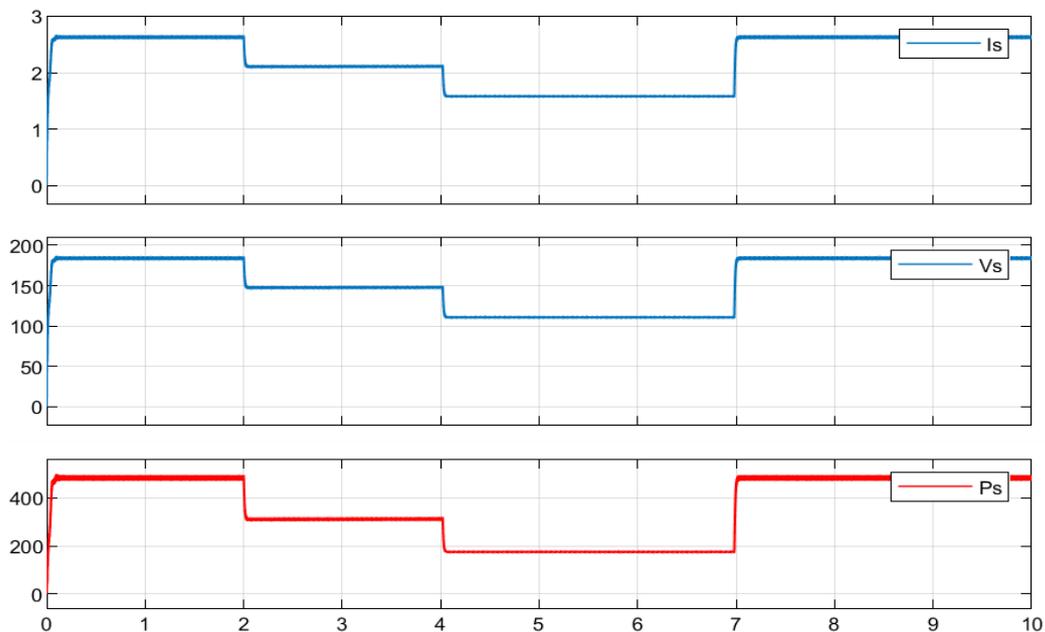


Figure III-19 : Résultats de la simulation de la méthode PSO avec variation de l'éclairement.

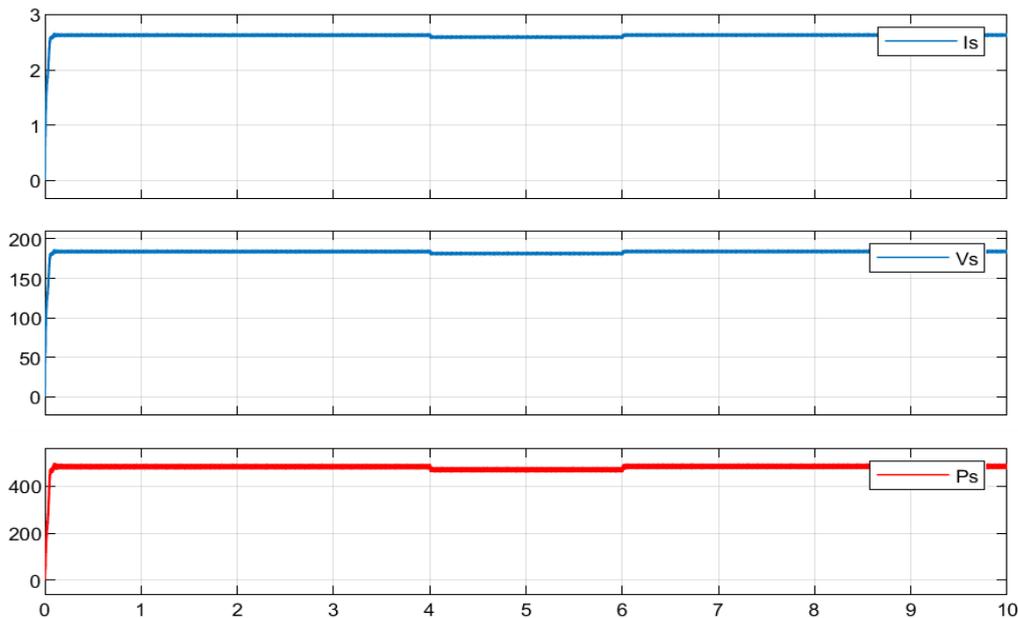


Figure III-20 : Résultats de la simulation de la méthode PSO avec variation de la température.

Les simulations montrent des variations de courant, de tension et de puissance en réponse aux changements de l'éclairement Figure III.19:

- Le courant de sortie est plus grand, alors qu'il diminuera à mesure que l'éclairement diminue et vice versa.
- La tension est plus élevée, alors qu'elle diminuera à mesure que l'éclairement diminue.

La puissance générée est également sujette à des changements en fonction des changements de l'éclairement, car on observe un pic de puissance à un certain niveau de rayonnement, correspondant au point de puissance maximale (MPP) du GPV.

Il affecte négativement le fonctionnement des panneaux solaires lorsqu'il est faible et positivement lorsqu'il est élevé, car il augmente leur efficacité.

- Cette technique permet d'atteindre le PPM en 0,10s et d'avoir une bonne poursuite des tension et puissance de référence. Vous pourrez évaluer l'efficacité du suivi du MPP et la rapidité de réponse du système aux changements d'irradiance.

Enfin, nous concluons que les panneaux photovoltaïques fonctionnent bien dans un bon éclairage.

Les simulations montrent des variations de courant, de tension et de puissance en réponse aux changements de la température Figure III.20 :

- Dans les trois courbes, on remarque une légère diminution des valeurs de courant, de tension et de puissance malgré l'augmentation de la température. C'est une chose positive et permet aux panneaux solaires de bien fonctionner.
- Cette technique permet d'atteindre le PPM en 0,10s et d'avoir une bonne poursuite des tension et puissance de références.

Vous pourrez évaluer l'efficacité du suivi du MPP et la rapidité de réponse du système aux changements de température.

III.5.3. Simulation avec la commande GWO

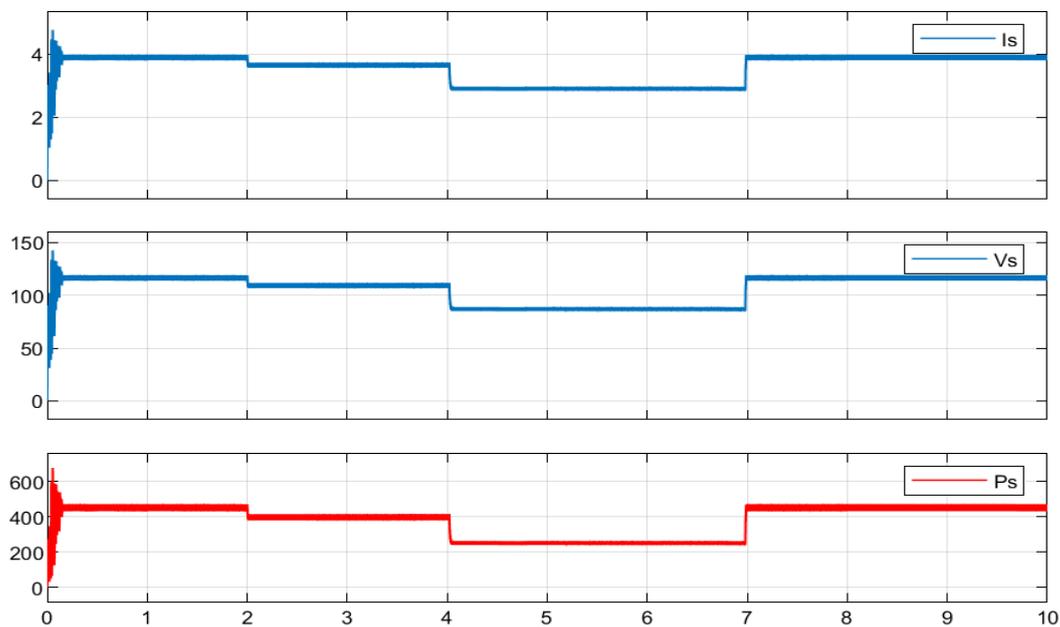


Figure III-21 : Résultats de la simulation de la méthode GWO avec variation de l'éclairement.

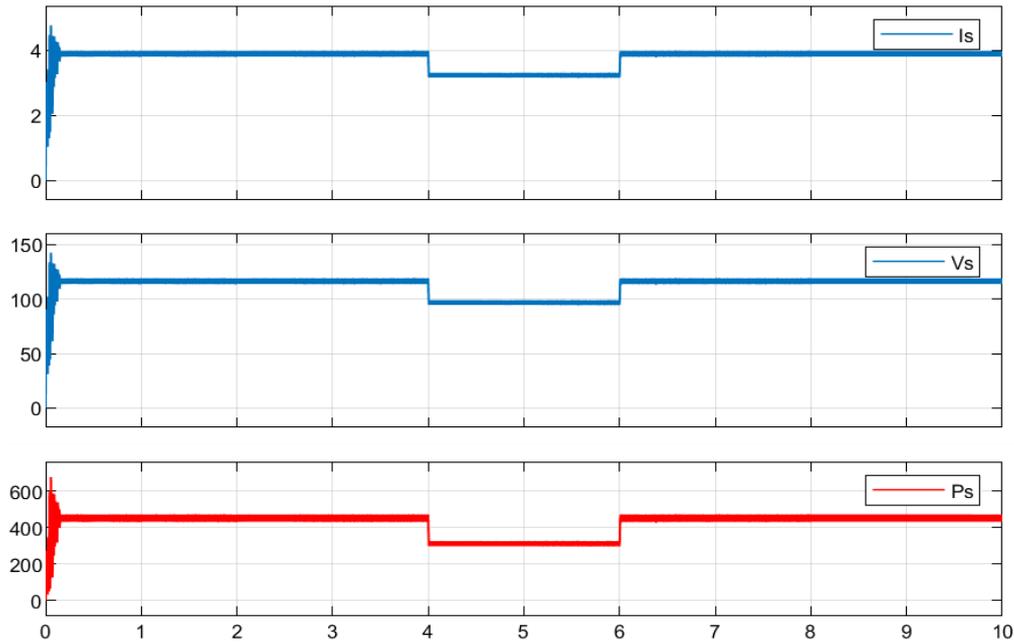


Figure III-22 : Résultats de la simulation de la méthode GWO avec variation de la température.

Les simulations montrent des variations de courant, de tension et de puissance en réponse aux changements de l'éclairement Figure III.21:

- Le courant de sortie est plus grand, alors qu'il diminuera à mesure que l'éclairement diminue et vice versa.
- La tension est plus élevée, alors qu'elle diminuera à mesure que l'éclairement diminue.

La puissance générée est également sujette à des changements en fonction des changements d'éclairement, car on observe un pic de puissance à un certain niveau de rayonnement, correspondant au point de puissance maximale (MPP) du GPV.

Il affecte négativement le fonctionnement des panneaux solaires lorsqu'il est faible et positivement lorsqu'il est élevé, car il augmente leur efficacité.

- Cette technique permet d'atteindre le PPM en 0,15s et d'avoir une bonne poursuite des tension et puissance de références. Vous pourrez évaluer l'efficacité du suivi du MPP et la rapidité de réponse du système aux changements d'irradiance.

Enfin, nous concluons que les panneaux photovoltaïques fonctionnent bien dans un bon éclairage.

Les simulations montrent des variations de courant, de tension et de puissance en réponse aux changements de la température Figure III.22:

- Dans les trois courbes, on remarque une légère diminution des valeurs de courant, de tension et de puissance malgré l'augmentation de la température. C'est une chose positive et permet aux panneaux solaires de bien fonctionner.

Cette technique permet d'atteindre le PPM en 0,15s et d'avoir une bonne poursuite des tension et puissance de références.

Vous pourrez évaluer l'efficacité du suivi du MPP et la rapidité de réponse du système aux changements de température

III.6. Etudes des méthodes MPPT pour des conditions d'ombrage partiel

III.6.1. Ombrage Partiel du générateur PV

Dans des conditions environnementales normales, la puissance photovoltaïque fournie par le système photovoltaïque est optimale. Cependant, si le générateur PV est soumis à des contraintes environnementales telles que l'ombrage partiel, ses performances sont réduites. Le phénomène d'ombre est dû à la répartition inégale du rayonnement à la surface du générateur photovoltaïque. Celui-ci peut être causé par des raisons atmosphériques (par exemple, à travers les nuages), des obstacles dans l'environnement du générateur photovoltaïque (par exemple, câbles, branches, bâtiments), une partie de l'accumulation de poussière sur la surface du générateur photovoltaïque. L'ombre perturbe le fonctionnement normal du système photovoltaïque, car le module ombragé affecte négativement les modules restants uniformément éclairés. Parmi les problèmes rencontrés, il y a la réduction du rendement du système PV, la présence de maximums locaux de puissance (miss-matching) et les apparitions de points chauds (hot spots) qui peuvent être évités en utilisant des diodes bypass [71] [72]. La figure III.23 représente la caractéristique photovoltaïque d'un générateur en présence d'ombrages partiels provoquant l'apparition de plusieurs maximum locaux.

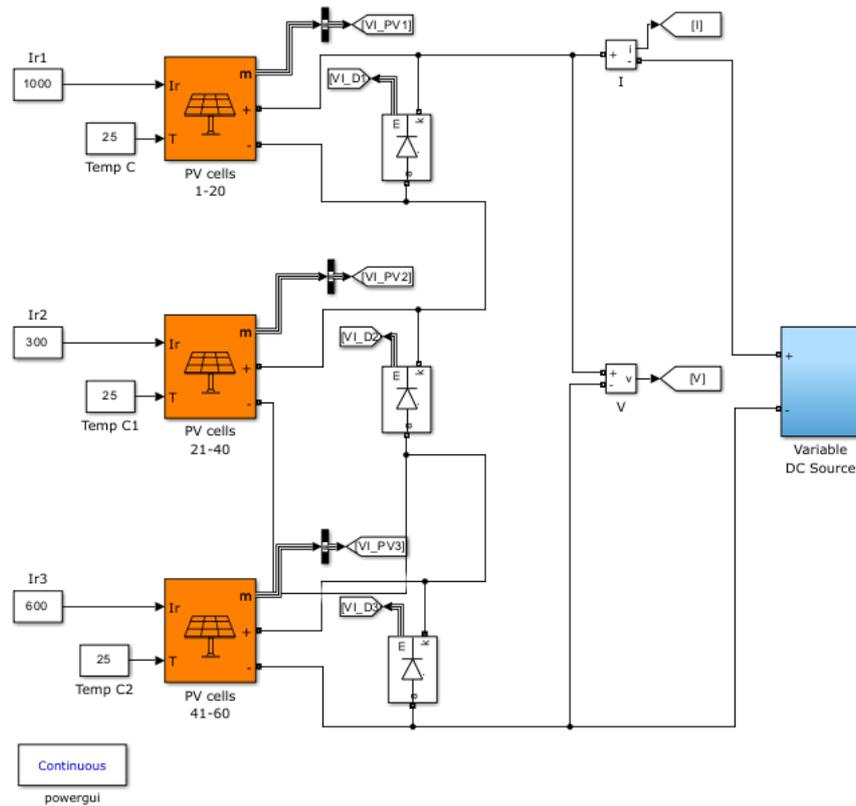


Figure III-23 : Schéma Sumilink d'un panneau sous ombrage partiel.

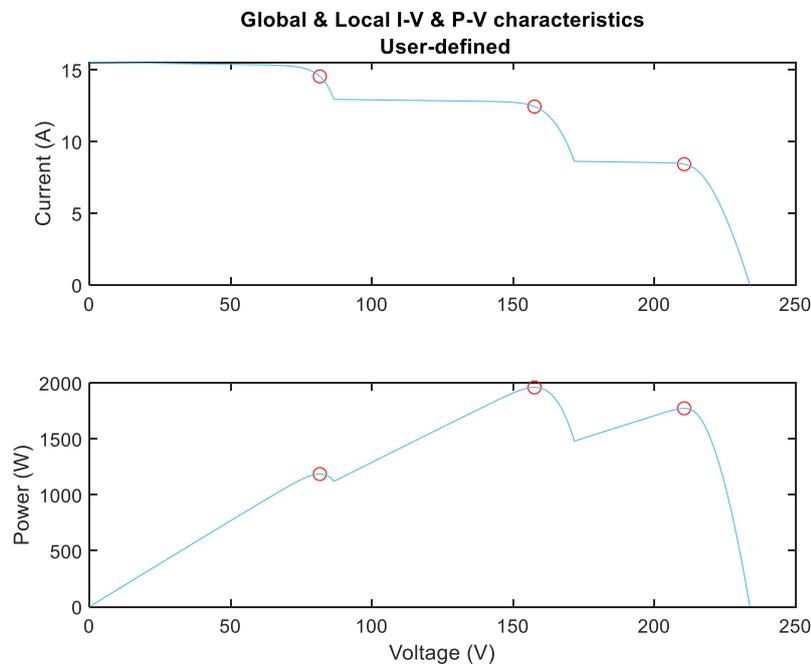


Figure III-24 : La courbe caractéristique $I(V)$, $P(V)$ dans le cas d'un ombrage partiel.

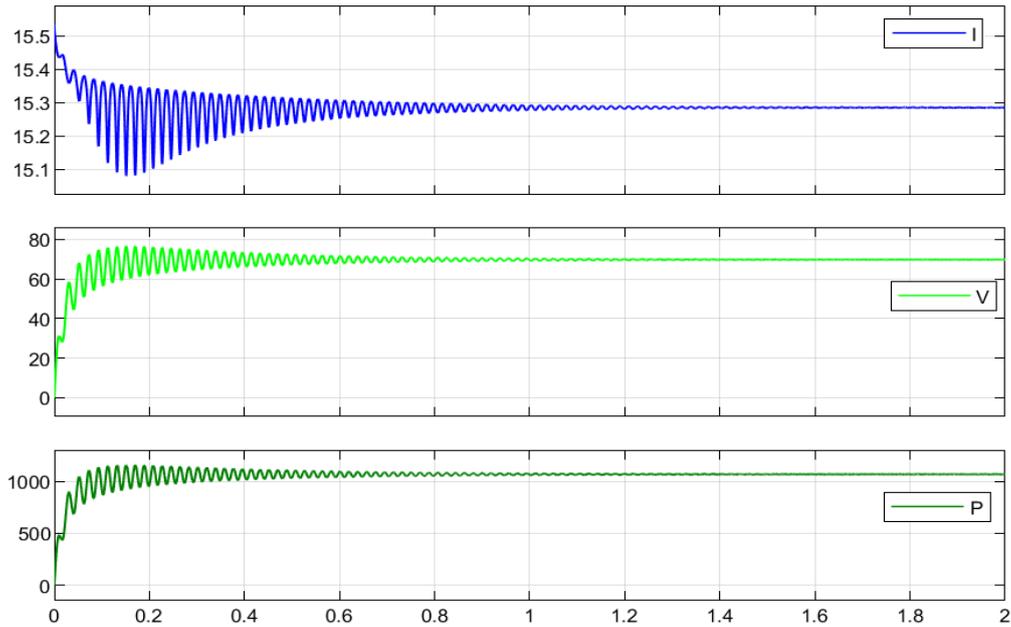


Figure III-25 : Caractéristiques d’entrée pour la méthode P&O.

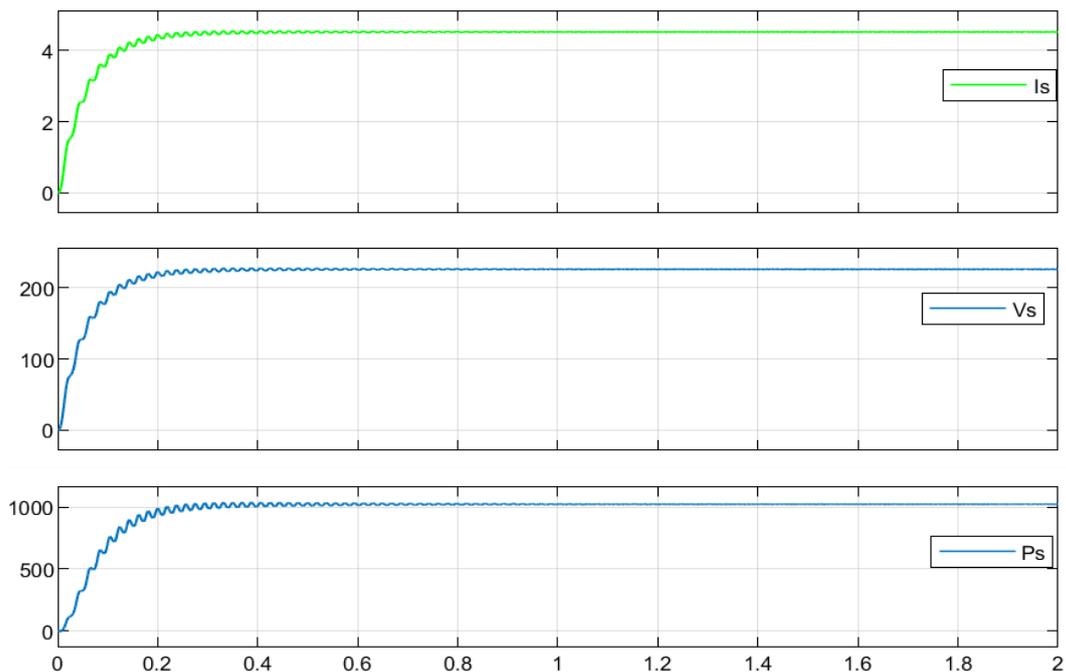


Figure III-26 : Résultats de la simulation par la méthode P&O.

Pour tester les performances de l’algorithme P&O, nous avons effectué la simulation avec l’ombrage partiel A partir des résultats de la courbe de la Figure III.25, Figure III.26,on remarque que Cette technique permet d’atteindre le PPM en 0.8s et le hacheur survolteur fournit une tension de sortie V_s supérieure à celle du générateur photovoltaïque et puissance inférieure à celle du générateur photovoltaïque et le courant augmente par rapport au courant de sortie du

générateur photovoltaïque , qui diminue , et d'avoir une bonne poursuite des tension et puissance de références et de courant.

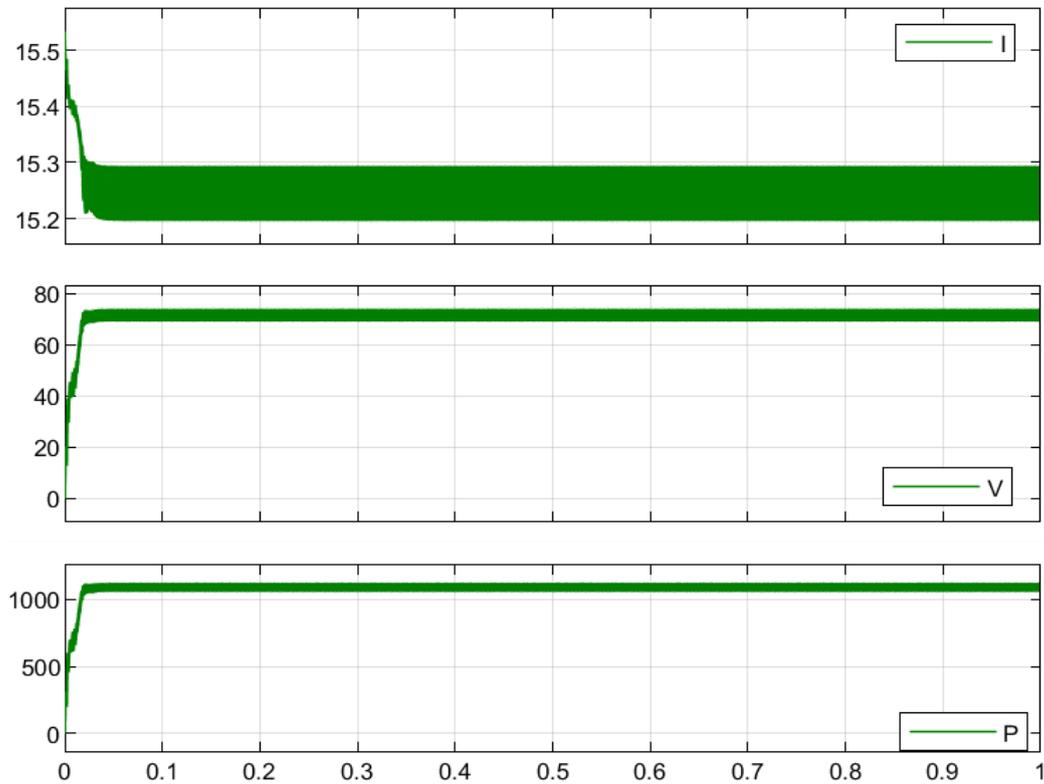


Figure III-27 : Caractéristiques d'entrée pour la méthode PSO.

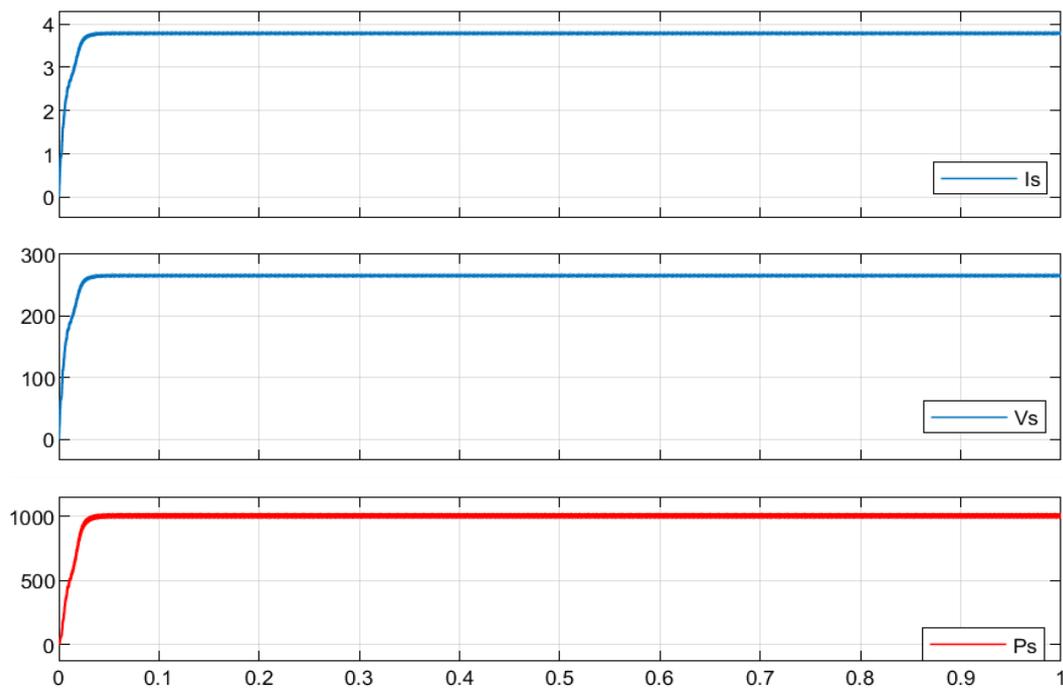


Figure III-28 : Résultats de la simulation de la méthode PSO .

Pour tester les performances de l'algorithme PSO, nous avons effectué la simulation avec l'ombrage partiel A partir des résultats de la courbe de la Figure III.27, Figure III.28, on remarque que Cette technique permet d'atteindre le PPM en 0.03s et , le hacheur survolteur fournit une tension de sortie V_s supérieure à celle du générateur photovoltaïque et puissance inférieure à celle du générateur photovoltaïque et le courant augmente par rapport au courant de sortie du générateur photovoltaïque , qui diminue , et d'avoir une bonne poursuite des tension et puissance de références et de courant.

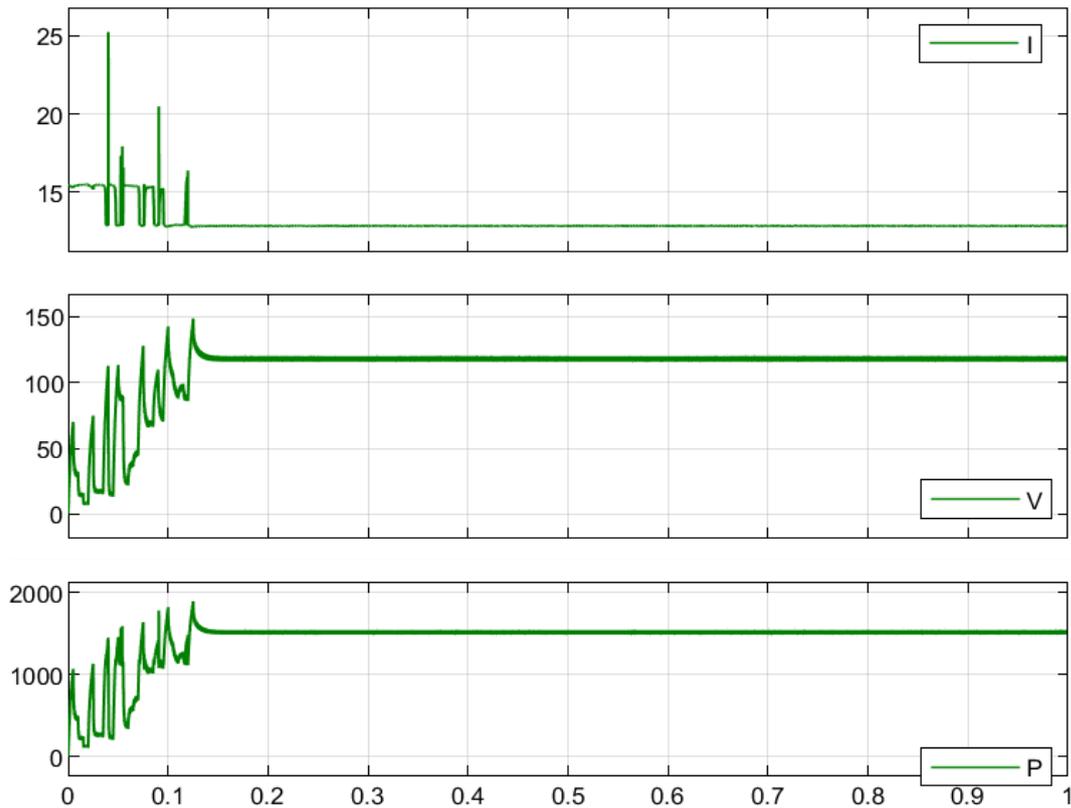


Figure III-29 : Caractéristiques d'entrée pour la méthode GWO.

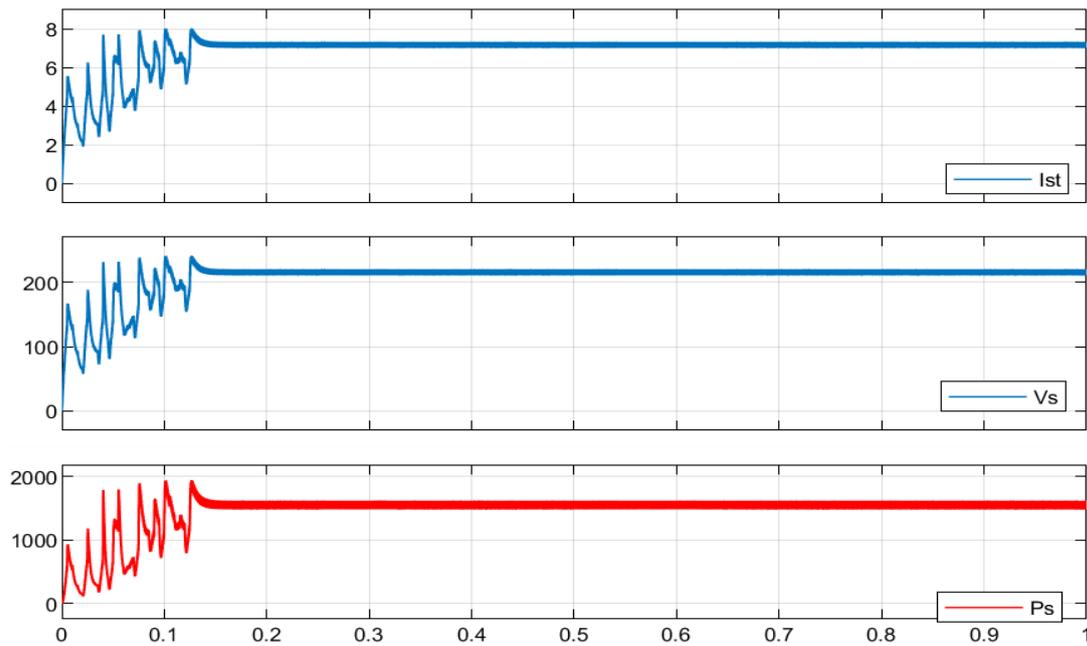


Figure III-30 : Résultats de la simulation de la méthode GWO.

Pour tester les performances de l’algorithme GWO, nous avons effectué la simulation avec l’ombrage partiel A partir des résultats de la courbe de la Figure III.29, Figure III.30, on remarque que Cette technique permet d’atteindre le PPM en 0.14s et , le hacheur survolteur fournit une tension de sortie V_s supérieure à celle du générateur photovoltaïque et puissance inférieure à celle du générateur photovoltaïque et le courant augmente par rapport au courant de sortie du générateur photovoltaïque , qui diminue , et d’avoir une bonne poursuite des tension et puissance de références et de courant.

III.6.2. Comparaison des techniques MPPT

Tableau III-2 : Comparaison des techniques MPPT

| MPPT Techniques | Cas 1 conditions standards | | | Cas 2 L’ombrage Partiel | | |
|-----------------------------|----------------------------|-----|------|-------------------------|------|------|
| | P&O | PSO | GWO | P&O | PSO | GWO |
| Pmax (W) | 468 | 491 | 473 | 1000 | 1020 | 1600 |
| Temps d’atteindre le MPP(s) | 0.3 | 0.1 | 0.15 | 0.8 | 0.03 | 0.14 |
| Le rendement η (%) | 96 | 98 | 100 | 93 | 94 | 100 |

III.6.3. Interprétation des résultats

La méthode P&O, les résultats de simulation montrent que cet algorithme est relativement simple à implémenter, mais qu'il peut présenter des oscillations autour du point de puissance maximale en raison de sa nature de perturbation. Cela peut entraîner une instabilité du système et une efficacité réduite du MPPT.

- P&O peut être plus lent en comparaison car il se base sur des perturbations et observations successives, ce qui peut prendre plus de temps pour atteindre le MPP, particulièrement dans des conditions de variation rapide.
- PSO tend à être très efficace dans la convergence rapide vers le MPP. Cela est dû à sa capacité à ajuster les positions des particules en fonction des meilleures solutions trouvées par l'ensemble du groupe.
- GWO, est également assez rapide dans la convergence grâce à sa capacité à exploiter les stratégies de chasse et de leadership des loups gris, ce qui permet une exploration et une exploitation équilibrées de l'espace de recherche.

À la fin, Les résultats indiquent que PSO est la méthode la plus performante parmi les trois pour le suivi du MPP, offrant une convergence rapide et précise avec une stabilité acceptable. GWO suit de près avec une bonne performance mais légèrement plus d'ondulations. P&O, bien que stable après la convergence, est le moins performant en termes de rapidité et précision de convergence au MPP.

La simulation prouve l'efficacité de PSO, Qui conduit à des meilleures performances, avec l'absence des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide par rapport à les autres méthodes.

III.7. Conclusion

Ce chapitre présente les résultats obtenus par trois méthodes de commande de MPPT appliqué à un générateur PV. Le travail a été réalisé sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Nous avons simulé ces techniques dans les conditions standards de l'éclairement et la température à l'état stable et lors du changement de l'éclairement et la température ainsi que l'ombrage partiel. Nous avons effectué une étude comparative entre ces trois méthodes MPPT, la première est la méthode P&O, la deuxième est la méthode PSO alors la troisième c'est la GWO.

Cette étude a donné des résultats discutés précédemment. Chaque méthode présente des caractéristiques spécifiques en termes de simplicité, de précision, de réactivité et de stabilité, ce qui doit être pris en compte lors du choix de l'algorithme MPPT le mieux adapté à un système photovoltaïque donné. Les méthodes méta-heuristiques (PSO et GWO) sont plus efficaces lors de l'existence d'un ombrage partiel, les oscillations autour du PPM global à l'état stationnaire sont plus petites et exigent une puissance de calcul importante. mais elles sont complexe et difficile à mettre en œuvre par rapport au technique P&O.

Les résultats de simulation montrent que La technique PSO donne les meilleures performances par rapport à les autres méthodes.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie solaire est convertie en électricité grâce à des panneaux photovoltaïques. C'est une énergie de ressources abondantes, pas de pollution, faible rendement, exigences de coûts élevées l'investissement est élevé. Exigences de coûts élevées, l'investissement est élevé, mais les coûts d'exploitation et de maintenance sont extrêmement faibles.

Un algorithme de contrôle MPPT est nécessaire pour obtenir une efficacité supérieure et extraire en continu la puissance maximale disponible du module PV dans des conditions météorologiques statiques, variables et partiellement ombragées.

Pour résoudre le problème d'optimisation MPPT, de nombreux algorithmes ont été proposées dans la littérature. Ces méthodes réagissent différemment selon les situations, chacune a ses propres avantages et inconvénients et varie en termes de complexité, d'efficacité, de coût, de vitesse de convergence, de mise en œuvre matérielle etc.

Ce mémoire concerne le contrôle MPPT des panneaux photovoltaïques. Cela peut être vu comme une étude comparative de trois méthodes MPPT : la P&O, la PSO et la GWO. L'objectif principal est de mettre l'accent sur ; la méthode, le résultat extrait et la puissance maximale fournie à partir de panneaux photovoltaïques et absorbée par la charge.

La puissance générée par le panneau photovoltaïque est directement liée au rayonnement et inversement liée à la condition thermique. Il y a un point de fonctionnement maximal pour chaque valeur de rayonnement et de température.

Le convertisseur DC-DC utilisant l'algorithme MPPT joue un rôle crucial dans le système photovoltaïque pour garantir le transfert de puissance maximal entre la source et la charge, tout en améliorant l'efficacité du système.

Une fois la modélisation terminée, nous avons examiné le problème de maximisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque. Ainsi, nous avons effectué des tests et une comparaison des trois méthodes MPPT.

Selon les résultats, toutes les méthodes testées dans les conditions atmosphériques normales parviennent à atteindre le point MPP avec succès. Toutefois, il a été observé pour la méthode MPPT conventionnelle (P&O), Les simulations révèlent que cet algorithme est plutôt facile à mettre en œuvre, mais qu'il peut être sujet à des fluctuations autour du point de puissance maximale en raison de sa nature de perturbation.

Ceci peut provoquer une instabilité du système et une diminution de l'efficacité du MPPT, tandis que les méthodes méta-heuristiques ; la méthode de l'optimisation par essaim de particules (PSO) et la méthode d'optimisation du loup gris (GWO) entraînent des performances améliorées. Elles permettent de réduire le temps de réponse et l'erreur en régime permanent.

Un cas d'ombrage partiel est créé dans l'environnement MATLAB / Simulink afin d'étudier l'impact de l'ombrage partiel sur la progression du PPM du champ photovoltaïque. Afin de créer cet ombre partiel, le champ photovoltaïque a été séparé en trois parties qui ont été exposées à différentes irradiations. La courbe P-V obtenue présente trois points maximums, dont deux locaux et un global.

On a démontré que l'utilisation des méthodes méta-heuristiques et des méthodes conventionnelles sont efficaces pour suivre le PPM global lors de l'ombrage partiel.

Les résultats de simulation montrent que La technique PSO donne les meilleures performances par rapport à les autres méthodes.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/15619/energie-renouvelable>(20.02.2024)
- [2] <https://safetyculture.com/fr/themes/energie-renouvelable/>(20.02.2024)
- [3] Bouhired F.2004. Commande et contrôle d'un installation solaire thermique . Mémoire de Magister, Université, Boumerdès.
- [4] OUKAF A et Abdelkrim B.2021. Amélioration de la commande MPPT d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique Université MOHAMED BOUDIAF.
- [5] <https://fr.scribd.com/document/509165099/energie-photovoltaique-introduction> (28.03.2024)
- [6] Liman A et Soukane S. 2012. Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome, mémoire d'Ingénieur, UMMTO.
- [7] HELALLI K:2012 Modélisation d'une cellule photovoltaïque étude comparative. Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri.
- [8] BERREGUI A, ABSA A.2020. Etude technicoéconomique d'une installation photovoltaïque pour application dans la région de Ouargla, mémoire master académique, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [9] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect(28.02.2024)
- [10] <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaque.html> (1.03.2024)
- [11] HARA OUBIA M.2019. Etude simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque. MEMOIRE MASTER. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR , ANNABA.
- [12] Belkadi N, Akli K.2018 Contrôle indirect d'un panneau solaire isolé du réseau. Disse. Université Mouloud Mammeri.
- [13] <https://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/BENSACI-Wafa.pdf?idmemoire=146> (2.03.2024)
- [14] ZAIRI S et BOUBIADA.S.2020. Etude et Dimensionnement d'un centrale Photovoltaïque. Université Mohamed Khidre , Biskra
- [15] Kendoli B.2007. état de l'art et modélisation des microcentrales , magister en électrotechnique de l'université mentouri de Constantine .

- [16] TOUMI N ,KOUDA I .2021.ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE ET SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME. Université Badji Mokhtar ,Annaba.
- [17] LITIM A et ABID Z.2017. Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque. Mémoire de Fin d'Etudes ,Université ouargla
- [18] ARBOUZZB et BENHAMADA A.2019. Energie solaire photovoltaïque'', Mémoire du diplôme Master Université Djilali Bounaama ,Khemis Miliana.
- [19] Hellali K.2012. Modélisation d'une cellule photovoltaïque étude comparative. Mémoire de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE.Université ,Mouloud Mammeri.
- [20] <https://www.digikey.fr/fr/product-highlight/p/panasonic/amorphous-silicon-solar-cells> (02.03.2024)
- [21] Akli Y, et RahaliD.2013. Modélisation d'un panneau photovoltaïque et étude comparative. Disse. Université Mouloud Mammeri.
- [22] <https://fr.linkedin.com/pulse/module-5-les-principaux-%C3%A9%C3%A9ments-dun-syst%C3%A8me-solaire-mbainaiwala> (03.03.2024)
- [23] Tigrine C et Ait Ouali O.2019.Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque.Université A.MIRA-BEJAIA.
- [24] Zaiem K.2019. Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-flou Réduit. MEMOIRE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR,ANNABA.
- [25] ZAÏRI soufiane, BOUBIADA Slimane.Etude et Dimensionnement d'un centrale Photovoltaïque.2020
- [26] JBILOU M.2020: Etude, simulation et réalisation d'un onduleur pour système photovoltaïque . Thèse de doctorat l'université de DJILLALI Liabes, Sidi-Bel-Abbes.
- [27] MERAOUAH M et Ali M.2020 Application du contrôle intelligent d'un hacheur Boost dans un système de conversion d'énergie solaire. MEMOIRE MASTER . UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN, TIARET.
- [28] Yann R.2009. Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecte au réseau.Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier.
- [29] BOUCHTER A et MOKRANE C.2020 .Comparaison entre différentes techniques de commande MPPT d'un système solaire. Université 8Mai 1945 – Guelma

- [30] Ferdjani S et Maatallah O.2019, Etude et réalisation d'un Hacheur Boost commandé par le μ C ARDUINO en vue d'implémenter des commandes MPPT . Mémoire de Master, Université Ahmed Draia, Adrar.
- [31] Fatima B.2018 Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique . Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostagane.
- [32] Anne Labouret, Michel Villos. Energie solaire photovoltaïque. édition. 2006 : Dunod.
- [33] Belarbi M.2006 .Modélisation et Simulation d'un Système de pompage Photovoltaïque”, Mémoire de magister en électronique , Université des sciences et de La technologie d'oran.
- [34] Vighetti S. 2010. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et Dimensionnement des étages de conversion, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG .
- [35] https://www.researchgate.net/figure/Symbole-dun-convertisseur-DC-DC_fig12_320910708 (04.03.2024)
- [36] <https://www.sirepe.fr/les-convertisseurs-dc-dc/>(04.03.2024)
- [37] Mamri.B, M.Z. 2006. contribution de système photovoltaïque avec pompage. Mémoire d'ingénieur en électronique, Université de Constantine.
- [42] H. Abbes , H. Abid , K. Loukil , A. Toumi et M. Abid.2014. Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque. Sfax, Tunisia. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3
- [43] Benadel F.2016. étude et simulation d'une commande mppt pour système pv, mémoire de master, université mohamed boudiaf-m'sila
- [44] N. ABOUCHABANA. 2009. Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT. mémoire de Magister. Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [45] SEGUIER.G , BAUSIERE .R.LABRIQUE. F. 2004. Electronique de puissance. Dunod. 8ième édition.
- [46] AOUCHE.N , AÏT CHEIKH. M.S, MALEK.A.2013.Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation. Revue des Energies Renouvelables, Vol. 16, N°3, pp : 485 – 498.

- [47] Guerid.A, Boumaali.A.2022. Contribution à la modélisation d'une cellule solaire. Université Badji Mokhtare,Annaba
- [48] SEGUIER.G, DELARU.PE, LABRIQUE.F.Electronique de puissance. Dunod, 10ième édition, 2004, 2011, 2015.
- [49] OMORUYI.E.2017. Modélisation du comportement transitoire des génératrices distribuées raccordées au réseau électrique de distribution à l'aide de convertisseurs. Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Ecole polytechnique de Montréal.
- [50] BELKACEM.M.2015.Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT). UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID ,TLEMCEN.
- [51] Lyes. A. 2011. Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque. Mémoire de Magister ,UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI ,DE TIZI OUZOU .
- [52] Djellal. L. I. et Dib.Y.2017. Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées, Mémoire de Master, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen.
- [53] ESRAM. T. and CHAPMAN.P. L..2007.Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,IEEE Transactions on energy conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439–449.
- [54] Zahar.S et Makhoulf.C.2017.Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique.Mémoire du diplôme de Master ,UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF ,M'SILA .
- [55] HAKOUMI. A et BENAMAR.A .Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue. THESE DE Master Université Ahmed Daria, Adrar.
- [56] RAKZ. B et OUANAS .S.2017.MODÉLISATION ET COMMANDE DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES, Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF,M'SILA.
- [57] BENZAIT .B et TOUAHRIA.D .2020.Etude comparative des algorithmes P&O et INC pour l'optimisation de l'énergie photovoltaïque.Mémoire du diplôme de Master, Université, Ghardaïa.
- [58] Kim. T.-Y, Ahn. H.-G, Park. S. K and Lee. Y.-K.2001. 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), vol. 2, pp. 1011–1014, IEEE.

[59] Xiao.W and Dunford.W.G.2004,Evaluating maximum power point tracking performance by using artificial lights,” in 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004, vol. 3, pp. 2883–2887, IEEE.

[60] Chaieb.H, SAKLY.A Comparison between P&O and P.S.O Methods Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. National Engineering School of Monastir, University of Monastir, Tunisia.2015

[61] Moulay-Amar.M et Loghouini. M. , 2005. Etude et réalisation d’un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque , Mémoire d’ingénieur, université de Ouargla, Algérie.

[62] Sobaihi.K .étude et réalisation d’un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction.Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique10, Avenue Hassen Badi ElHarrach ,Alger.

[63] <https://youtu.be/Bhd4xsJeVzQ?si=mgConx8zWol5zIY1> (01.03.2024)

[64] Aziz.A.2006. Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, Conception et modélisation d’une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l’énergie solaire. Thèse de Doctorat, Université Toulouse.

[65] Toumi, D. 2020.Comparaison de P&O et du contrôleur de logique floue dans MPPT pour Applications photovoltaïques (PV) à l'aide de MATLAB Simulink. El-Oued Université,Algeria.

[66] BOUZERIA.H.2016.Modélisation et commande d’une chaine de conversion photovoltaïque, DOCTORAT 3ème cycle LMD en Électrotechnique, Université de Batna.

[67] R. Eberhart and J. Kennedy.1995.A new optimizer using particle swarm theory, in MHS’95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp. 39–43.

[68] Benyousef .H.Harchou.K.2021.Etude comparative entre l’EO, PSO et FA.Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi ,Bordj Bou Arreridj.

[69] Almufti, S.M., Ahmad, H.B., Marqas, R.B. & Asaad, R.R.2021.Grey wolf optimizer: Overview, modifications and applications. International Research Journal of Science, Technology, Education, and Management,vol 1. no 1.p 44-56.

[70] Meflah A.2011. Modélisation et commande d'une chine de pompage photovoltaïque, Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie.

[71] B. D. Mert, F. Ekinci, and T. Demirdelen.2019. Effect of partial shading conditions on off-grid solar pv/hydrogen production in high solar energy index regions. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 44, no. 51, pp. 27713–27725 .

[72] D. P. Winston, S. Kumaravel, B. P. Kumar, and S. Devakirubakaran. 2020. Performance improvement of solar pv array topologies during various partial shading conditions,” Solar Energy, vol. 196, pp. 228–242.

Résumé

En ce qui concerne le développement industriel, économique et écologique, l'énergie solaire photovoltaïque représente actuellement une excellente option pour remplacer les énergies fossiles polluantes.

Le présent travail traite une étude de modélisation et commande d'un système photovoltaïque fonctionnant à sa puissance maximale et énergétiquement autonome. Pour que ce système fonctionne à sa puissance maximale, un étage d'adaptation a été associé à différents algorithmes MPPT (classiques et intelligentes) ; les méthodes GMPPT. Nous avons abordé les trois techniques les plus populaire pour la poursuite de point de fonctionnement a puissance maximale ; allant de la méthode conventionnelle la plus utilisée P&O aux méthodes bio-inspirées ; la Méthode de la Particule Swarm par le PSO et la méthode d'optimisation du loup gris (Grey Wolf Optimization GWO).

Une étude détaillée de ces diverses méthodes a été présenté. Des simulations des différentes parties du système sont développées sous environnement Matlab/Simulink, permettant ainsi la validation et la comparaison entre les différents comportements des méthodes.

Les résultats sont satisfaisants et indiquent une robustesse de ces méthodes lors de changements brusques des conditions climatiques. L'efficacité des méthodes GMPPT à poursuivre le point maximum global sous les conditions météorologiques statiques, variables et partiellement ombragées a été validée.

Mots clés : Système Photovoltaïque, la commande MPPT, GMPPT, P&O, PSO et GWO.

Abstract

In terms of industrial, economic and ecological development, photovoltaic solar energy currently represents an excellent option for replacing polluting fossil fuels. The present work deals with a modeling and control study of a photovoltaic system operating at its maximum power and energetically autonomous. To ensure that the system operates at maximum power, a matching stage has been combined with various MPPT algorithms (conventional and intelligent), using GMPPT methods. A detailed study of these various methods was presented. Simulations of the various parts of the system were developed in the Matlab/Simulink environment, enabling validation and comparison of the different methods' behavior. The results are satisfactory, and indicate the robustness of these methods in the face of abrupt changes in climatic conditions. The effectiveness of the GMPPT methods in tracking the global maximum point under normal conditions and partial shading has been validated.

Key words : Photovoltaic system , MPPT, GMPPT , DC/DC converter

الملخص

فيما يتعلق بالتنمية الصناعية والاقتصادية والبيئية، تمثل الطاقة الشمسية الكهروضوئية حاليًا خيارًا ممتازًا لاستبدال الوقود الأحفوري الملوث. يتناول العمل الحالي دراسة النمذجة والتحكم في نظام كهروضوئي يعمل بأقصى طاقة وطاقة مستقلة. ولكي يعمل هذا النظام بأقصى طاقة، تم دمج مرحلة مطابقة مع خوارزميات MPPT المختلفة (التقليدية والذكية). تم تقديم دراسة تفصيلية لهذه الطرق المختلفة. تم تطوير عمليات محاكاة للأجزاء المختلفة من النظام باستخدام بيئة Matlab/Simulink، مما يتيح التحقق من صحة سلوك الطرق المختلفة ومقارنتها. وكانت النتائج مرضية وتشير إلى متانة هذه الطرق في حالة حدوث تغيرات مفاجئة في الظروف:

الكلمات المفتاحية: نظام كهروضوئي، تقنيات تتبع، نقطه الحد الأقصى للاستطاعة، تقنه تتبع النقطة العظمى للاستطاعة، محول مستمر مستمر.