

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

Djenane Nada

Sadaoui Romaissa

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Commande MPPT d'un système photovoltaïque – application de l'optimisation par essaim particulaire

Soutenu le 01 /07 /2024 devant le jury composé de :

M ^{me} Abdeslam	Djamila	MCB	UMBB	Président
M. Kaouane	Mohamed	MCA	UMBB	Examineur
M ^{me} Gabour	Nour El Houda	MCB	UMBB	Rapporteur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu pour nous avoir accordé la force, la persévérance et la guidance nécessaires tout au long de cette aventure académique.

*À notre encadreur, **Mme N.GABOUR**, nous vous adressons nos plus sincères remerciements pour votre soutien inestimable, votre expertise et votre patience. Votre guidance éclairée a été une source de motivation constante et a grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.*

*Nous souhaitons également remercier **Mr OUMOUSSA** et **Mr OUAZENE** pour leur orientation et leur soutien durant la réalisation de ce projet.*

Nous remercions aussi les membres du jury pour leur temps et leurs remarques constructives qui ont enrichi notre travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude envers nos familles, amis, collègues de classe et tous ceux qui nous ont soutenus moralement. Merci à chacun d'entre vous pour votre inspiration et soutien tout au long de ce voyage. Votre bienveillance et vos efforts ont été essentiels à notre réussite.

Avec toute notre gratitude.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

*A mes très chers **parents**,*

Pour leur amour et leur soutien inconditionnels.

*A la mémoire de mon cher frère **Ali**,*

Que dieu fasse du paradis sa place.

*A mon cher frère **Abdou** et ma chère sœur **Maroua**,*

Pour leur encouragement et leur soutien moral.

*A toutes **Mes amies**,*

*Et précisément **Achwak**, **Cilia**, **Imene** et **Romaïssa** pour leur soutien et leur présence constante à mes côtés.*

*A toutes **Ma famille**.*

Nada

Dédicace

Je tiens à dédier cet humble travail à :

*À mon père, **Alfel**, et à ma mère, **Malika**, pour leur amour et leur soutien inconditionnels.*

*À mes sœurs, **Amína** et **Sara**, et à mes frères, **Yakoub** et **Ishak**, pour leur présence réconfortante.*

*À **ma grand-mère**, pour ses prières et son amour sans limites, qui m'ont toujours porté chance.*

*À tous les membres de **ma famille**.*

*À mon amie précieuse, **Cília**, pour son soutien et ses encouragements constants.*

*À **Achwak**, pour ses conseils précieux.*

*À **Nada**, pour son aide précieuse et sa collaboration.*

*Enfin, à **tous** ceux que j'aime et qui m'aiment, je vous exprime ma gratitude sincère.*

Romaïssa

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier une méthode de commande pour le suivi du point de puissance maximale d'un panneau solaire. Cette méthode repose sur l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire, une approche qui a démontré son efficacité dans divers domaines. Une étude comparative avec la technique de perturbation et d'observation a été réalisée afin d'évaluer les performances et l'efficacité de cette méthode.

Mots clés : Commande MPPT, Photovoltaïque, Optimisation par essaim particulaire, convertisseur BOOST.

Abstract

The objective of this work is to study a control method for tracking the maximum power point of a solar panel. This method is based on the particle swarm optimization algorithm, an approach that has proven effective in various fields. A comparative study with the perturb and observe technique was conducted to evaluate the performance and efficiency of this method.

Keywords: MPPT control, photovoltaic, particle swarm optimization, BOOST converter.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة طريقة للتحكم في تتبع نقطة الطاقة القصوى للوحة الشمسية. تعتمد هذه الطريقة على خوارزمية تحسين سرب الجسيمات، وهي نهج أثبتت فعاليتها في مجالات متعددة. تم إجراء دراسة مقارنة مع تقنية التعديل والمراقبة لتقييم أداء وكفاءة هذه الطريقة.

الكلمات المفتاحية: تتبع نقطة الطاقة القصوى، الكهروضوئية، سرب الجسيمات، محول رافع الجهد.

Table des matières

Remerciements	2
Dédicace	3
Résumé	5
Liste des figures	9
Liste des tableaux	11
Abréviations et symboles	12
Introduction générale	14
Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques	16
I.1. Introduction	17
I.2. Historique	17
I.3. Énergie solaire photovoltaïque	19
I.4. L'effet photovoltaïque	20
I.5. La cellule solaire	21
I.5.1. Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque	21
I.5.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	22
I.5.3. Types de cellules solaires	24
I.5.4. Comparaison des types de cellule solaire	27
I.5.5. Le rendement de conversion	27
I.5.6. L'influence du rayonnement	27
I.5.7. L'influence de la température	28
I.5.8. Circuit électrique équivalent	29
I.6. Modélisation mathématique d'une cellule solaire	31

I.7. Applications des systèmes photovoltaïques	32
I.8. Avantages de la technologie PV.....	33
I.9. Inconvénients de la technologie PV.....	33
I.10. Conclusion.....	34
Chapitre II : La Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques.....	36
II.1. Introduction	37
II.2. Les convertisseurs DC-DC	37
II.2.1. Le hacheur survolteur	38
II.2.1.1. Principe de fonctionnement	39
II.2.1.2. Le modèle mathématique équivalent	40
II.3. Le suivi du point de puissance maximale (MPPT)	42
II.3.1. La technologie MPPT	42
II.3.2. Contrôleur de charge solaire MPPT	43
II.3.3. Les caractéristiques principales du contrôleur de charge solaire MPPT	44
II.3.4. Schéma du modèle MPPT de base	44
II.3.5. Les Méthodes de commande MPPT pour un système PV	45
II.3.6. Comparaison entre les méthodes MPPT	50
II.3.7. Caractéristiques de MPPT	52
II.4. Critères d'évaluation d'une commande MPPT	53
II.5. Intégration de la commande MPPT avec le convertisseur BOOST	54
II.6. Conclusion	54
Chapitre III : l'Optimisation par essaim particulaire	56
III.1. Introduction	57
III.2. Généralités sur l'optimisation	57
III.2.1. Définitions	57

III.2.2. L'objectif d'optimisation.....	58
III.2.3. Applications	58
III.3. Optimisation par essaim particulaire (OEP).....	60
III.3.1. Définition	60
III.3.2. Principe	61
III.3.3. Construction.....	61
III.3.5. Organigramme	65
III.4. L'exploitation et l'exploration dans OEP	66
III.5. L'adaptation de l'OEP à la commande MPPT	67
III.6. Conclusion.....	67
Chapitre IV : Simulations et interprétation des résultats.....	69
IV.1. Introduction	70
IV.2. Simulation du système en boucle ouverte	70
IV.2.1. Caractéristiques du système	71
IV.3. Simulation de la commande MPPT du système par la méthode de perturbation et observation	73
IV.4. Simulation de la commande MPPT du système basé sur l'algorithme OEP	74
IV.5. Etude comparative entre les commandes Perturb and Observe et l'optimisation par essaim particulaire	75
IV.5.1. Cas des conditions stables	75
IV.5.2. Cas de la variation de l'irradiance	77
IV.5.3. Cas de la variation de la température	79
IV.6. Conclusion	81
Conclusion générale.....	82
Bibliographie.....	83

Liste des figures

Figure 1.1: Chronologie de l'énergie solaire.	19
Figure 1.2: L'effet photovoltaïque dans une cellule solaire.	21
Figure 1.3: Schéma de fonctionnement d'une cellule solaire.	22
Figure 1.4: Caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque.	23
Figure 1.5: Cellules de silicium cristallin.	24
Figure 1.6: Cellule de silicium amorphe.	25
Figure 1.7: Cellule à couche mince.	25
Figure 1.8: Cellules organiques.	26
Figure 1.9: Caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différentes intensité du rayonnement.	28
Figure 1.10: Caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différents degrés de température.	29
Figure 1.11: Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire.	30
Figure 2.1: Schéma d'un convertisseur hacheur.	38
Figure 2.2: Schéma de principe du hacheur BOOST.	38
Figure 2.3: Formes d'ondes courant/tension dans le hacheur BOOST.	39
Figure 2.4: Schéma équivalente du hacheur survolteur quand $t \in [0, \alpha.T_s]$	39
Figure 2.5: Schéma équivalente d'un hacheur survolteur lorsque $t \in [\alpha.T_s, T_s]$	40
Figure 2.6: Allure du rapport de conversion en fonction du rapport cyclique.	40
Figure 2.7: Contrôleurs MPPT.	42
Figure 2.8: Schéma de principe pour l'application d'un régulateur MPPT sur un système donné.	43
Figure 2.9: Organigramme de la méthode P&O.	46
Figure 2.10: Positionnement du point de puissance maximale suivant la valeur de ΔP sur la caractéristique P-V.	47
Figure 3.1: Essaim d'oiseaux.	60
Figure 3.2 : Fonctionnement du PSO.	61

Figure 3.3: Organigramme de la méthode OEP.	65
Figure 4.1: Bloc Simulink d'un panneau solaire.....	71
Figure 4.2 : Schéma Simulink du système en boucle ouverte.	71
Figure 4.3: Caractéristique courant/tension $I(V)$ du système.....	72
Figure 4.4: Caractéristique puissance/tension $P(V)$ du système.....	72
Figure 4.5: Schéma Simulink de la commande P&O.....	73
Figure 4.6: Schéma Simulink de la commande OEP.....	74
Figure 4.7: Résultats de simulation de la commande MPPT-P&O.....	75
Figure 4.8: Résultats de simulation de la commande MPPT-OEP.	76
Figure 4.9: Courbe de variation de l'irradiance.....	78
Figure 4.10: L'évolution de la puissance de la commande MPPT-OEP sous une irradiance variable.....	78
Figure 4.11: L'évolution de la puissance de la commande MPPT-P&O sous une irradiance variable.....	78
Figure 4.12: Courbe de variation de la température.....	79
Figure 4.13: L'évolution de la puissance de la commande MPPT-P&O sous une température variable.....	80
Figure 4.14: L'évolution de la puissance de la commande MPPT-OEP sous une température variable.....	80

Liste des tableaux

Table 1.1: Comparaison des types de cellule solaire.	27
Table 2.1: Comparaison entre les méthodes MPPT.	50
Table 4.1: Paramètres du panneau considéré.	70
Table 4.2: Paramètres du système pour la simulation de la commande P&O.....	73
Table 4.3: Paramètres du système pour la simulation de la commande par OEP .	74

Abréviations et symboles

A : Facteur d'idéalité de jonction P-N.

AC : Courant alternatif.

α : Rapport cyclique.

C1, C2 : Condensateur [F].

DC : Courant continu.

E_g : Énergie de bande passante du semi-conducteur [eV].

η : rendement de conversion (%).

η_{MPPT} : Le rendement du point de puissance maximale.

I_0 : Courant de saturation inverse réel de la cellule [A].

I_{ph} : Photo-courant.

I_L : Courant de l'inductance [A].

I_{mpp} : Courant à puissance maximale [A].

I_r : Irradiation solaire [W/m²].

I_{rs} : Courant de saturation inverse de la diode [A].

I_{sc} : Courant de court-circuit [A].

I_s : Courant de l'interrupteur [A].

I_{sh} : Courant de résistance de dérivation [A].

I_{pv} : Courant de sortie des cellules solaires [A].

I_D : Courant de la diode [A].

K : Constante de Boltzmann (1.381 10⁻²³ J/K).

K_i : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température [A/K].

L : Inductance [H].

M : Rapport de conversion.

MPP : Point de puissance maximale.

MPPT : Méthode de suivi de point de puissance maximale.

n' : Facteur d'idéalité de la jonction.

OEP : Optimisation par essaim de particules.

P&O : Perturbation et Observation.

P_{eff} : La puissance effectivement délivrée par le générateur photovoltaïque [W].

$P_{\max}$: La puissance maximale [W].

P_{in} : La puissance de la lumière incidente [W].

q : Charge électrique ($1.60222 \cdot 10^{-19}\text{C}$).

R_s : Résistance en série [Ω].

R_{sh} : Résistance shunt [Ω].

T : Température réelle des cellules solaires [K].

T_{ref} : Température de référence (298 Kelvin).

T_s : Période de découpage [s].

V_{mpp} : Tension à puissance maximale [V].

V_{oc} : Tension de circuit ouvert [V].

V_L : Tension aux bornes de l'inductance [V].

V_0 : Tension aux bornes de l'interrupteur [V].

V_{pv} : Tension de sortie des cellules solaires [V].

ΔP : La différence entre deux valeurs de puissance.

Introduction générale :

L'énergie photovoltaïque (PV) est une énergie dont la source est inépuisable, non polluante et dont l'exploitation causerait le moins de dégâts écologiques. Elle occupe une place importante dans la recherche afin de satisfaire les besoins futurs en matière d'énergie.

L'énergie solaire photovoltaïque consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques ont la capacité de transformer les photons en électrons. Fournissant ainsi un courant continu prêt à être utilisé.

Plusieurs études dans le domaine solaire photovoltaïque ont été faites, qui ont pour objectif d'exploiter le maximum de puissance que peut générer le générateur photovoltaïque en utilisant la technique MPPT.

Le but de ce travail est faire une étude sur les systèmes PV et le développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite du point de puissance maximale pour une exploitation qui répondent au cahier de charge, en prenant en compte les conditions météorologiques changeantes.

Notre mémoire se compose de quatre chapitres composés comme suit :

□ Le premier chapitre traite des systèmes photovoltaïques (PV), explorant l'énergie solaire photovoltaïque et l'effet photovoltaïque. Il examine le fonctionnement des cellules PV, leurs caractéristiques électriques ainsi que l'influence du rayonnement et de la température. Cette section met également la lumière sur les applications des systèmes photovoltaïques, en discutant des avantages et des inconvénients.

□ Le deuxième chapitre se penche sur les convertisseurs DC/DC, en particulier le hacheur BOOST, et présente la commande MPPT, en se concentrant sur la méthode traditionnelle de perturbation et d'observation (P&O). Cette partie pose les bases théoriques nécessaires à la compréhension des techniques de commande MPPT et de leur importance dans l'optimisation des systèmes photovoltaïques.

□ Le troisième chapitre explore l'optimisation de la performance des panneaux solaires à l'aide de l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire (OEP). Cette méthode d'optimisation offre une approche novatrice pour ajuster les paramètres de fonctionnement des panneaux solaires afin d'atteindre un rendement maximal.

□ Enfin, le quatrième chapitre présentera les résultats de simulations réalisées avec Simulink sur MATLAB, comparant la performance de la commande MPPT traditionnelle (P&O) avec celle optimisée par l'algorithme d'OEP. Cette comparaison fournira des perspectives sur l'efficacité de ces deux approches dans des conditions réalistes.

Une conclusion générale dressera le bilan de cette étude.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction :

Un système photovoltaïque convertit la lumière solaire en électricité utilisable à l'aide de panneaux solaires. Il se compose d'un réseau solaire et d'autres composants comme des onduleurs, des batteries et du câblage. Les panneaux solaires du système captent la lumière du soleil et la convertissent en courant continu (DC), qui est ensuite converti en courant alternatif (AC) par l'onduleur pour une utilisation dans les maisons ou les entreprises [1][2]. Les systèmes photovoltaïques sont conçus pour exploiter l'énergie renouvelable du soleil, ce qui en fait une source d'énergie durables et respectueuses de l'environnement [3].

Ce chapitre offre une vue d'ensemble des systèmes photovoltaïques, de leur évolution, des composants impliqués et de leur fonctionnement.

I.2. Historique :

Le mot photovoltaïque (PV) a été mentionné pour la première fois vers 1890, il vient des mots grecs : photo : « phos », signifiant lumière, et « volt », qui se réfère à l'électricité.

Le photovoltaïque signifie donc la lumière-électricité, décrivant exactement le phénomène photovoltaïque où la lumière est convertie en électricité.

L'histoire de la technologie photovoltaïque (PV) s'étend du XIXe siècle à nos jours, marquée par des découvertes et des innovations clés :

1839 : Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque en menant des expériences électrochimiques, en l'observant sur des électrodes d'argent et de platine exposées au soleil [4][5].

1873 : Willoughby Smith a observé l'effet photovoltaïque du sélénium et a noté son application potentielle dans les essais de câbles sous-marins [6].

1877 : Adams et Richard Day conçoivent et mettent au point la première cellule solaire au sélénium, avec une efficacité d'environ 0,5 %.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

1905 : Albert Einstein propose la théorie photoélectrique, expliquant la relation entre les ondes lumineuses et les photons, ce qui lui vaut le prix Nobel de physique en 1921[7].

1939 : La découverte par Russell Ohl de régions de type n et p dans le silicium et l'effet photoélectrique dans les jonctions p-n ouvrent la voie au développement de cellules solaires au silicium [8].

1940 : Ohl met au point la première cellule solaire au silicium chez Bell Labs, ouvrant de nouvelles possibilités pour les appareils électroniques [9].

1954 : Calvin Fuller, chimiste chez Bell Labs, met au point un procédé de dopage du silicium, conduisant à la création de la première cellule solaire à jonction p-n avec un rendement de 6% [4][6].

1955 : La première cellule solaire a été utilisée comme source d'énergie pour un réseau de télécommunications à Americus, en Géorgie [4][8].

1958 : La NASA lance le satellite Vanguard-I équipé d'un système solaire composé de six cellules solaires en silicium, marquant la première utilisation de cellules solaires dans l'espace [6].

Années 1970 : La crise pétrolière suscite un intérêt accru pour la technologie photovoltaïque. Le procédé de Joseph Lindmeyer a augmenté l'efficacité des cellules solaires au silicium de 50%, conduisant à la fondation de Solarex en 1973 [4].

1980 : La technologie photovoltaïque prend de l'ampleur avec le développement de nouveaux matériaux et procédés, contribuant à la réduction des coûts de fabrication.

Présent : Les panneaux photovoltaïques sont largement adoptés, et les recherches en cours visent à améliorer l'efficacité et à explorer de nouveaux matériaux. La technologie photovoltaïque est un acteur clé dans la transition vers les sources d'énergie renouvelables, contribuant à des objectifs tels que l'énergie abordable et propre, les villes et les communautés durables, l'action pour le climat décrite dans le Pacte vert européen et les Objectifs de développement durable des Nations Unies.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

L'évolution de la technologie photovoltaïque témoigne d'un parcours allant des découvertes initiales à l'adoption généralisée, jouant un rôle essentiel dans la résolution des défis environnementaux et la promotion des objectifs de développement durable.

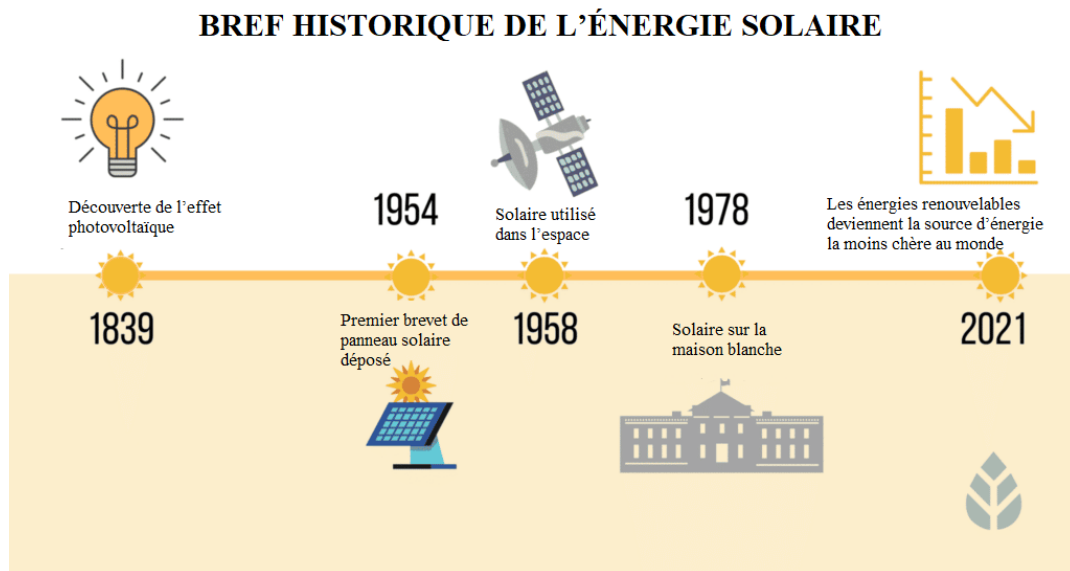


Figure 1.1: Chronologie de l'énergie solaire.

I.3. Énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité dans des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium ou ceux recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence de l'énergie externe, connue sous le nom d'effet photovoltaïque. L'énergie est délivrée par des photons (composants de la lumière) qui entrent en collision avec les électrons, les libérant et induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro-puissance, mesuré en watts de crête (WC), peut être converti en courant alternatif via un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée dans des batteries (énergie électrique décentralisée) ou injectée dans le réseau. Un générateur solaire photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques, eux-mêmes composés de cellules photovoltaïques interconnectées.

La performance d'une installation photovoltaïque dépend de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'exposition au soleil [10].

I.4. L'effet photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque consiste à transformer directement l'énergie électromagnétique, sous forme de rayonnement lumineux, en énergie électrique utilisable. Cette transformation se réalise à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque, utilisé dans les cellules solaires, permet cette conversion en exploitant la capacité d'un matériau semi-conducteur à générer et à transporter des charges électriques sous l'influence de la lumière solaire. Ce matériau est constitué de deux parties :

- Partie dopée de type N (dopée négativement) : Cette région a un excès d'électrons en raison de l'introduction d'atomes d'impuretés (dopage) qui fournissent des électrons supplémentaires. Pour les matériaux de type N le dopage se fait par le Phosphore.
- Partie dopée de type P (dopée Positivement) : Cette région a un déficit d'électrons, obtenu par dopage avec des atomes qui créent des « trous » où les électrons manquent. Pour les matériaux de type P le dopage se fait par le Bore.

Lorsque ces deux parties sont mises en contact, les électrons en excès dans la partie N se diffusent vers la partie P. Ce mouvement d'électrons crée un courant électrique, permettant ainsi la conversion directe de l'énergie lumineuse en électricité [11].

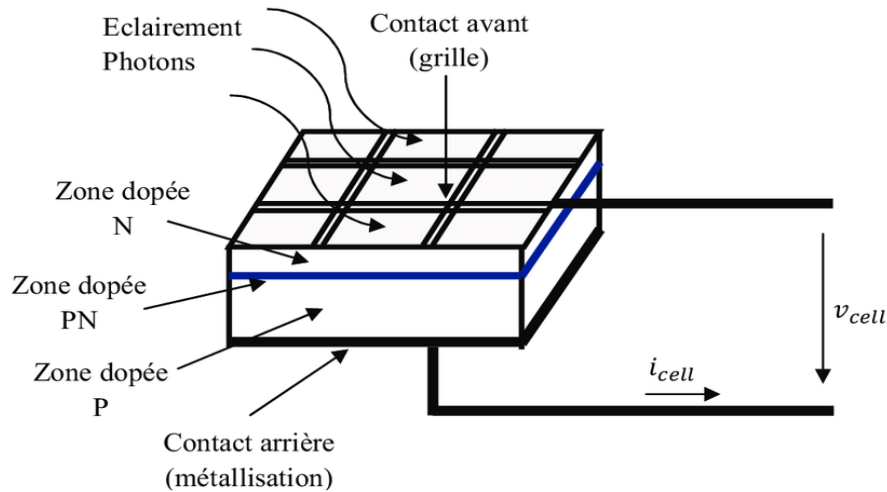


Figure1.2: L'effet photovoltaïque dans une cellule solaire.

I.5. La cellule solaire :

La cellule photovoltaïque est un dispositif optoélectronique essentiel à la production d'énergie solaire. Son fonctionnement repose sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs de ces cellules sont interconnectées pour former un module solaire photovoltaïque, et plusieurs de ces modules sont ensuite regroupés pour constituer une installation solaire. Cette installation génère de l'électricité qui peut être utilisée localement ou injectée dans un réseau électrique.

Les cellules photovoltaïques les plus courantes sont composées de semi-conducteurs, principalement du silicium (Si), bien que d'autres semi-conducteurs soient également utilisés, tels que le sélénium de cuivre et d'indium ($\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), le tellure de cadmium (CdTe), entre autres [11].

I.5.1. Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est composée de matériaux semi-conducteurs dopés P et dopés N, formant une jonction P-N. Cette jonction permet aux électrons excédentaires de la région N de traverser la jonction et d'occuper les trous dans la région P. Lorsque la lumière frappe la surface (dopée N) d'une cellule photovoltaïque, les photons dans la lumière transfèrent leur énergie aux atomes du

matériau, libérant des électrons des atomes, générant ainsi des charges N (électrons) et des charges P (trous). Cependant, le mouvement de ces électrons (créé par l'énergie photonique) est synonyme de production d'électricité.

Pour une cellule photovoltaïque, la production d'électricité est liée à la génération d'électrons (et de trous) par les photons dans la lumière incidente. Plus il y a de photons qui touchent la cellule, plus la quantité d'électricité produite est importante. Pour un éclairage donné, cette quantité dépend de l'efficacité de conversion de la cellule photovoltaïque (énergie produite/énergie reçue) [12].

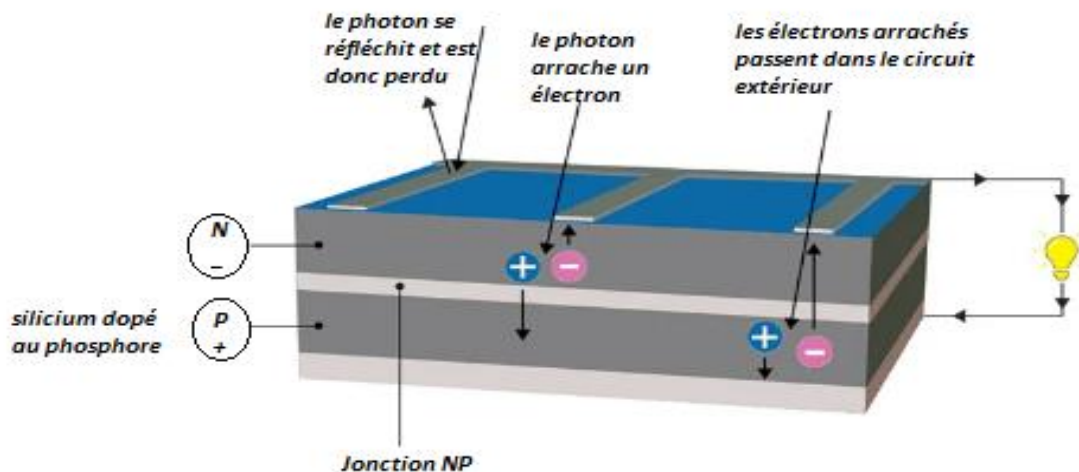


Figure 1.3: Schéma de fonctionnement d'une cellule solaire.

I.5.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque sont principalement décrites par sa courbe de courant-tension (I-V), qui illustre la relation entre le courant produit par la cellule et la tension à travers ses terminaux dans diverses conditions de fonctionnement. Voici les principales caractéristiques électriques :

5.2.1. Tension de circuit ouvert (V_{oc}) : Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule PV lorsque aucune charge externe n'est connectée, c'est-à-dire lorsque le courant est nul. Cette tension représente la tension maximale que la cellule peut

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

produire dans des conditions lumineuses spécifiques, qui incluent généralement un niveau d'intensité lumineuse, un spectre de lumière donné, un angle d'incidence et une température ambiante particulière.

5.2.2. Courant de court-circuit (I_{sc}) : Il s'agit du courant qui circule dans la cellule lorsque les bornes sont court-circuitées, c'est-à-dire lorsque la tension aux bornes est nulle. Ce courant représente le courant maximal que la cellule peut produire dans des conditions lumineuses spécifiques, similaires à celles décrites pour la tension de circuit ouvert.

5.2.3. Point de puissance maximale (MPP) : C'est le point sur la courbe I-V où le produit de la tension et du courant est maximum, indiquant la puissance maximale de sortie de la cellule. La tension et le courant à ce point sont indiqués comme V_{mpp} et I_{mpp} , respectivement.

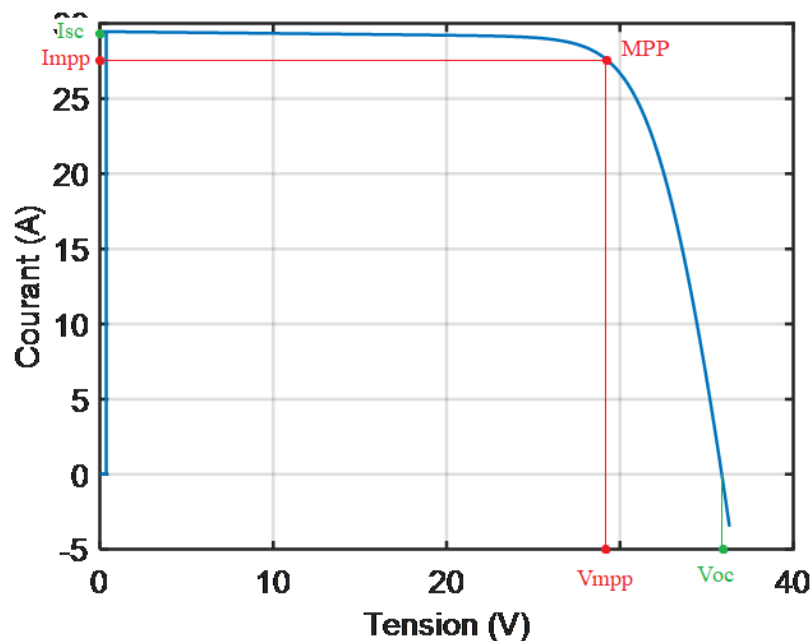


Figure 1.4: Caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque

La compréhension de ces caractéristiques électriques est cruciale pour concevoir des systèmes photovoltaïques et optimiser leurs performances pour des applications spécifiques. En outre, des facteurs tels que la température, le niveau

d'irradiance et la distribution spectrale de la lumière du soleil peuvent influencer le comportement électrique des cellules photovoltaïques [11].

I.5.3. Types de cellules solaires :

Les cellules solaires, également appelées cellules photovoltaïques, existent en différents types, chacun avec des caractéristiques et des applications uniques. Voici quelques-uns des principaux types en fonction des résultats de la recherche :

5.3.1. Cellules de silicium cristallin :

Cellules monocristallines : Fabriquées à partir de silicium monocristallin, ces cellules offrent un rendement élevé (15-20%) et une durabilité d'utilisation. Ils sont peu encombrants et ont une longue durée de vie, généralement avec une garantie de 25 ans [13].

Cellules poly-cristallines : Ces cellules sont fabriquées à partir de plusieurs cristaux de silicium plus petits, ce qui les rend plus rentables que les cellules monocristallines. Ils sont de forme carrée et offrent un bon équilibre entre l'efficacité et l'abordabilité [13].

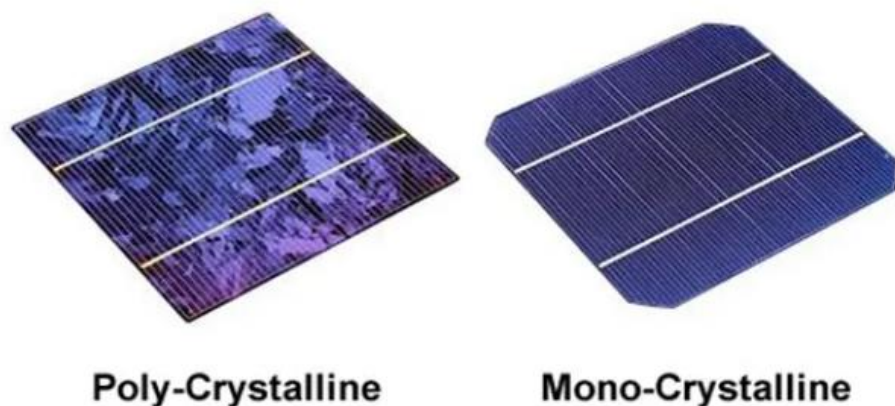


Figure 1.5: Cellules de silicium cristallin.

5.3.2. Cellules de silicium amorphe (a-Si) :

Ces panneaux ont une structure sans forme et nécessitent moins de silicium pour produire. Ils sont rentables mais moins efficaces, adaptés aux applications de faible puissance comme les calculatrices [14].

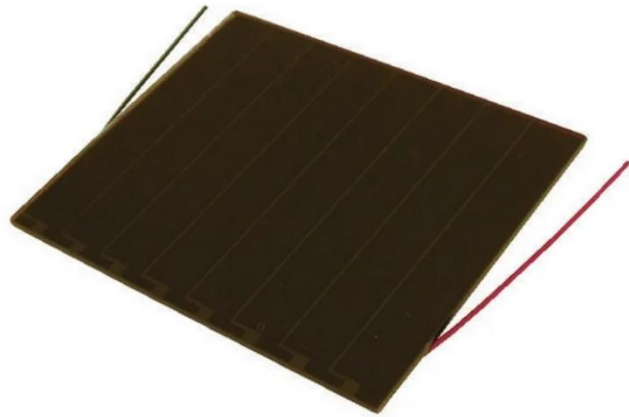


Figure 1.6: Cellule de silicium amorphe.

5.3.3. Cellules à couche mince :

La technologie à couche mince a l'avantage de produire des cellules grâce à un processus de revêtement à grande surface rentable. Ces cellules sont plus minces et peuvent même être déposées sur des supports flexibles (Figure). Divers matériaux semi-conducteurs sont considérés pour cette technologie, y compris le tellure de cadmium, le sélénium d'indium de cuivre et parfois le sélénium d'indium et de gallium de cuivre). Les nanotechnologies (cellules solaires sensibilisées aux colorants) n'ont pas encore joué un rôle significatif dans la l'industrie [15].

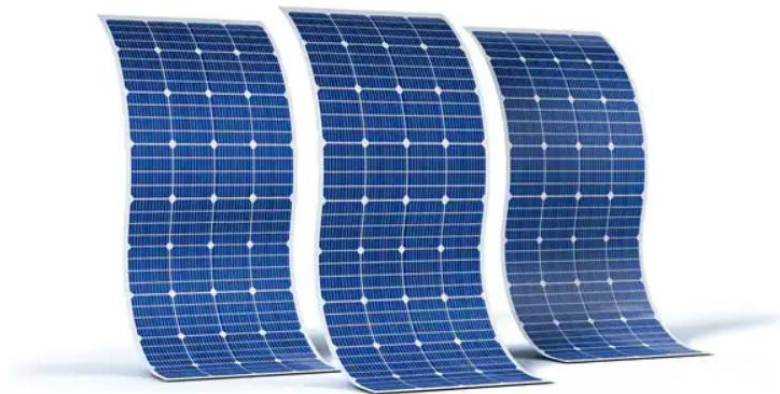


Figure 1.7: Cellule à couche mince.

5.3.4. Cellules organiques (cellules solaires en plastique) :

Au cours des 30 dernières années, l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs organiques a connu une croissance significative. Montrant initialement des valeurs d'efficacité de conversion très faibles, cette application spécifique de semi-conducteurs organiques a commencé à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang a démontré que des rendements proches de 1% étaient réalisables, conformément aux prévisions de Merritt en 1978. La cellule, composée d'une bicouche de molécules évaporées sous vide a atteint une efficacité de conversion de 0,95%. Ces cellules suivent deux voies : la voie cellulaire humide et la voie des cellules polymères organiques, également appelées cellules plastiques [15].

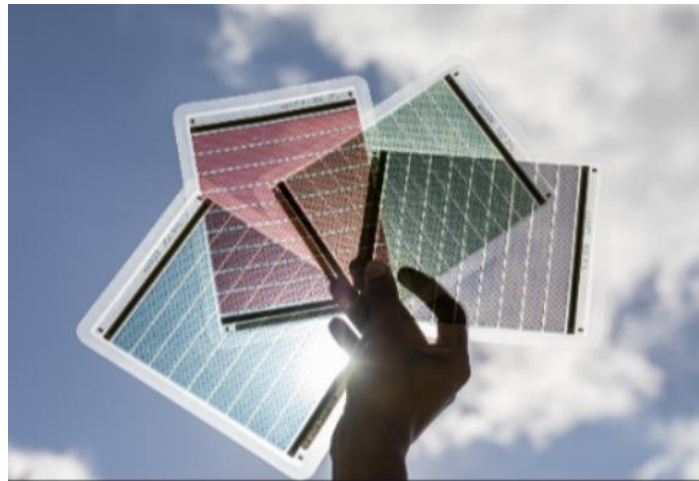


Figure 1.8: Cellules organiques.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.5.4. Comparaison des types de cellule solaire :

Ces valeurs de rendement sont calculées dans les conditions standards d'irradiance et de température.

Table 1.1: Comparaison des types de cellule solaire.

Matériau	Rendement (%)	Avantage	Désavantage
Silicium monocristallin	14-16	Bonne efficacité pour une cellule.	Coût de fabrication élevé, perte de matériel pendant la production.
Silicium poly-cristallin	12-14	Bonne efficacité pour un module.	Coût de fabrication élevé, perte de matériel pendant la production.
Silicium amorphe	6-8	Facile à fabriquer.	Mauvaise efficacité.
En couche mince	9-11	Flexible, léger.	Manque de matières premières.
Organique	6-9	Faible coût de fabrication, flexible.	Efficacité encore trop faible.

I.5.5. Le rendement de conversion :

Le rendement des cellules photovoltaïques η (%) se réfère au rendement de conversion de puissance. Il est défini par le rapport entre la puissance maximale $P_{\max}$ délivrée par la cellule et la puissance de la lumière incidente P_{in} [16].

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} \quad (1.1)$$

I.5.6. L'influence du rayonnement :

La figure illustre la caractéristique d'une cellule solaire pour diverses intensités de rayonnement solaire :

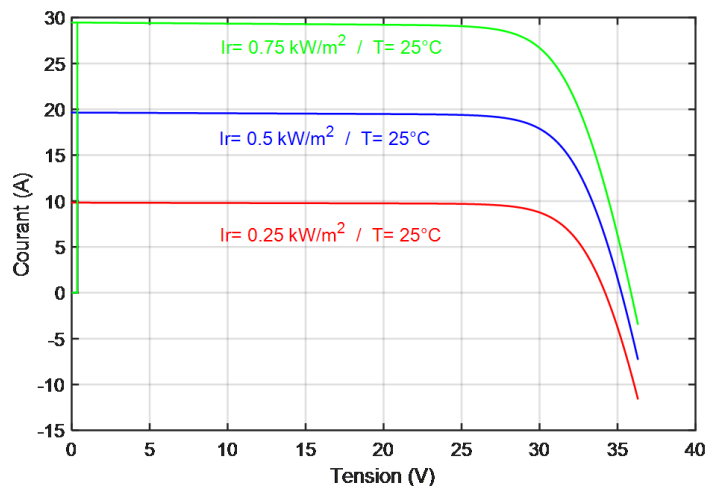


Figure 1.9: Caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différentes intensité du rayonnement.

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Cependant, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions mais reste presque identique même sous faible éclairage.

I.5.7. L'influence de la température :

La figure illustre les caractéristiques d'une cellule solaire pour différents degrés de température avec une intensité du rayonnement constante $I_r = 0.75 \text{ kW/m}^2$.

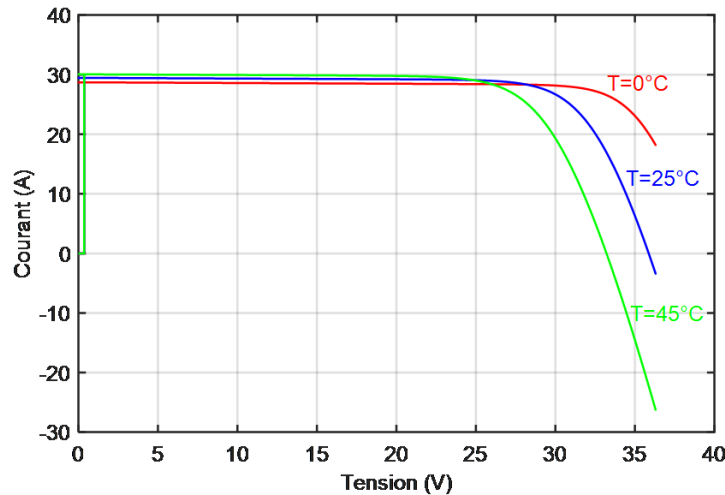


Figure 1.10: Caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différents degrés de température.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Cependant, la tension en circuit ouvert diminue considérablement à mesure que la température augmente, réduisant ainsi la puissance extractible. Lors de la conception d'une installation, la variation de température sur le site doit être prise en compte. Il est important de noter que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5 % pour chaque degré d'augmentation de la température de la cellule supérieure à 25 °C.

I.5.8. Circuit électrique équivalent :

Parmi les nombreuses constructions de circuits de modules photovoltaïques, le modèle présenté dans la figure est considéré comme le schéma équivalent le plus courant car il est précis et moins complexe. [17]. Ce modèle implique un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

phénomènes de polarisation cellulaire, et deux résistances (série et shunt) pour les pertes. [16]

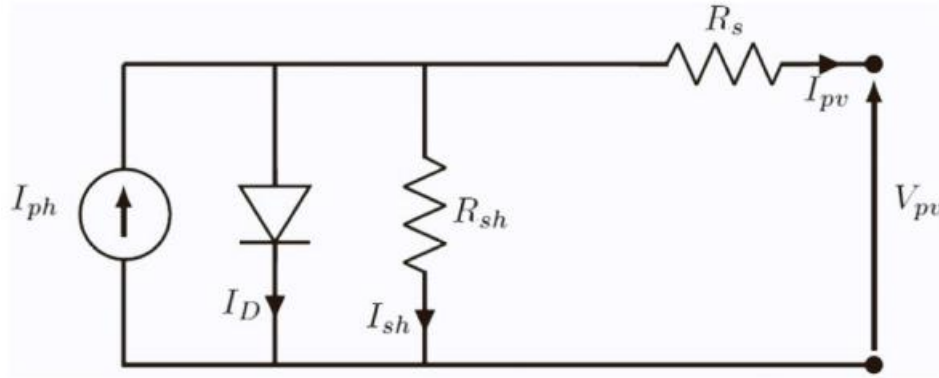


Figure 1.11: Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire.

Pour générer plus de puissance, le panneau photovoltaïque peut être connecté électriquement en série (N_s) ou en parallèle (N_p), et dans ce cas, nous parlons de générateur photovoltaïque (PVG). Le modèle d'un PVG constitué de panneaux connectés (N_s) et (N_p) peut être exprimé par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{A \cdot K \cdot T \cdot N_s}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1.2)$$

Où :

I_{pv} : Courant de sortie des cellules solaires (Ampère).

I_0 : Courant de saturation inverse réel de la cellule.

I_{ph} : Photo-courant.

V_{pv} : Tension de sortie des cellules solaires (Volt).

R_{sh} , R_s : résistance shunt et résistance en série, respectivement (Ohm).

q : Charge électrique ($1.60222 \cdot 10^{-19}C$).

K : Constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23} J/K$).

A : Facteur d'idéalité de jonction P-N.

T : Température réelle des cellules solaires (Kelvin).

I.6. Modélisation mathématique d'une cellule solaire :

I.6.1. Photo-courant I_{ph} :

Dépend de l'irradiance solaire et de la température de la cellule. La sortie du module PV varie en fonction du niveau d'irradiance solaire qui peut être obtenu à partir de l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - T_{ref})] \frac{I_r}{1000} \quad (1.3)$$

Où :

I_{sc} : Courant de court-circuit (Ampère).

K_i : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température (Ampère/Kelvin).

T_{ref} : Température de référence (298 Kelvin).

I_r : Irradiation solaire (Watt/m²).

I.6.2. Courant de saturation :

Ce courant I_0 varie avec la température et peut être exprimé par l'équation suivante :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot e^{\frac{q.E_{g0} \cdot (\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T})}{n' \cdot K}} \quad (1.4)$$

Où :

E_g : Énergie de bande passante du semi-conducteur (électronVolt) (1,12 eV pour un poly-cristallin de silicium à 25 °C).

n' : Facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n' < 2$).

I.6.3. Courant de saturation inverse de la diode :

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{q.V_{oc}}{n.N_s.K.T} - 1}} \quad (1.5)$$

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Où :

V_{oc} : Tension de circuit ouvert (Volt).

I.6.4. Courant de résistance de dérivation (shunt) :

Le courant de résistance de dérivation est un courant électrique non désiré qui se produit dans une cellule solaire. Il se forme lorsque des défauts dans la cellule permettent à une partie du courant électrique de contourner la partie photosensible de la cellule, réduisant ainsi son efficacité. Son équation est donnée par :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

I.7. Applications des systèmes photovoltaïques :

Les systèmes photovoltaïques ont de nombreuses applications, notamment :

- **Électrification d'habitations isolées** : Les systèmes photovoltaïques autonomes permettent d'électrifier des habitations éloignées du réseau électrique, comme des alpages ou des fermes isolées.

- **Connexion au réseau électrique** : Les installations photovoltaïques peuvent être raccordées au réseau électrique, permettant de réinjecter l'énergie non consommée.

- **Éclairage public autonome** : Les panneaux solaires peuvent alimenter des systèmes d'éclairage public indépendants du réseau.

- **Signalisation** : Les panneaux solaires sont utilisés pour alimenter des systèmes de signalisation routière, maritime ou aérienne.

- **Électrification rurale** : Les systèmes photovoltaïques permettent d'électrifier des zones rurales éloignées du réseau.

- **Alimentation de systèmes de communication** : Les panneaux solaires alimentent des répéteurs, antennes et autres équipements de télécommunication.

- **Applications agricoles et d'élevage** : L'énergie photovoltaïque est utilisée pour alimenter des pompes, des clôtures électriques, des systèmes d'irrigation, etc. dans les exploitations agricoles.

I.8. Avantages de la technologie PV :

● **Installation partout, même dans les zones urbaines :** Les systèmes photovoltaïques peuvent être installés à divers endroits, y compris dans les zones urbaines où l'espace peut être limité. Les panneaux solaires sur le toit, les façades solaires et les technologies solaires intégrées permettent une utilisation efficace de l'espace disponible dans les villes.

● **Solution pratique pour les sites isolés :** Dans les régions éloignées ou isolées où la connexion à un réseau électrique traditionnel peut être peu pratique ou coûteuse, les systèmes photovoltaïques fournissent un moyen rentable d'obtenir de l'électricité. Cela peut être crucial pour alimenter les équipements, l'éclairage ou les systèmes de communication dans des emplacements hors réseau.

● **Fiabilité et résistance aux intempéries :** Les systèmes photovoltaïques sont reconnus pour leur fiabilité parce qu'ils n'ont pas de pièces mobiles. Les matériaux utilisés dans leur construction, tels que le silicium pour les cellules solaires, le verre trempé pour les panneaux et l'aluminium pour les cadres, sont choisis pour leur durabilité et leur capacité à résister à diverses conditions météorologiques.

● **Évolutivité et adaptabilité :** Les installations photovoltaïques sont modulaires et peuvent être personnalisées pour répondre à des besoins énergétiques particuliers. Elles peuvent être facilement étendues ou réduites en fonction des exigences changeantes. Cette flexibilité les rend adaptés à une variété d'applications, des petites installations résidentielles aux projets industriels à grande échelle.

En résumé, l'énergie photovoltaïque offre une solution polyvalente et durable avec la capacité de s'adapter à différents environnements et besoins énergétiques. Sa fiabilité, son évolutivité et ses caractéristiques écologiques en font un choix de plus en plus populaire pour diverses applications.

I.9. Inconvénients de la technologie PV :

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

●**Coût d'investissement élevé pour les panneaux photovoltaïques** : Le coût d'investissement initial pour les panneaux photovoltaïques est élevé, ce qui peut constituer un obstacle à l'adoption généralisée, en particulier pour les particuliers ou les entreprises ayant des ressources financières limitées.

●**Diminution de l'efficacité électrique au fil du temps** : L'efficacité électrique des panneaux solaires a tendance à diminuer au fil du temps, avec une baisse typique d'environ 20% après 20 ans d'utilisation. Cette réduction progressive de l'efficacité peut avoir un impact sur les performances globales du système photovoltaïque.

●**Composants toxiques dans les panneaux et manque d'infrastructure de recyclage** : Les panneaux photovoltaïques contiennent des matériaux potentiellement toxiques, et à l'heure actuelle, il n'y a pas d'infrastructure de recyclage bien établie. Cela soulève des préoccupations environnementales, en particulier en ce qui concerne l'élimination et le recyclage appropriés des panneaux usagés.

●**Coût accru du système photovoltaïque lorsque le stockage d'énergie est nécessaire** : Lorsque le stockage d'énergie par batteries est nécessaire, le coût global du système photovoltaïque augmente. Le stockage de l'énergie est souvent nécessaire pour faire face aux fluctuations de la production et de la demande d'énergie, en particulier dans les situations hors réseau ou intermittentes.

●**Faible efficacité de conversion réelle des modules** : L'efficacité de conversion réelle d'un module photovoltaïque est relativement faible, ce qui signifie qu'une partie importante de la lumière solaire absorbée par le module n'est pas convertie en énergie électrique utilisable. Cette moindre efficacité peut avoir une incidence sur le rendement global et la rentabilité du système [18].

I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'évolution historique, des dépendances environnementales et de la modélisation mathématique des panneaux PV, ceci a souligné l'importance d'examiner attentivement les caractéristiques des cellules photovoltaïques.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

En conclusion, les caractéristiques des systèmes photovoltaïques, façonnées par des jalons historiques et des influences environnementales, ouvrent la voie à un avenir énergétique durable. Le voyage à travers cette exploration non seulement approfondit notre compréhension de l'énergie solaire, mais nous propulse également vers un avenir où les caractéristiques uniques de la technologie photovoltaïque contribuent de manière significative à un paysage énergétique plus propre et plus résilient.

Chapitre II : La Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques

II.1. Introduction :

Les convertisseurs DC-DC sont des éléments essentiels dans de nombreux systèmes d'alimentation, régulant la tension continue à un niveau adapté. Parmi ces convertisseurs, le hacheur BOOST est largement utilisé pour l'augmentation de tension. Ce chapitre se penche sur les convertisseurs DC-DC en général, en mettant l'accent sur le convertisseur BOOST.

L'efficacité énergétique et l'utilisation des énergies renouvelables sont des enjeux majeurs, maximiser la production d'énergie est cruciale. C'est là qu'intervient le concept du suivi du point de puissance maximale (MPPT), qu'on va aborder dans la deuxième partie de ce chapitre.

II.2. Les convertisseurs DC-DC :

Le hacheur, aussi appelé convertisseur statique DC-DC, est un circuit électrique permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits en courant continu. Son fonctionnement offre une souplesse considérable ainsi qu'un rendement élevé [18].

- Les composants d'un hacheur sont des condensateurs, des inductances et des commutateurs. Dans des conditions idéales, ces composants ne consomment aucune puissance active, ce qui contribue à des rendements élevés.
- Le commutateur, généralement un transistor MOSFET ou un IGBT, fonctionne en mode bloqué/saturé. Lorsque le dispositif est bloqué, aucun courant ne circule, entraînant une dissipation de puissance nulle. Lorsqu'il est saturé, la chute de tension à ses bornes est presque nulle, ce qui réduit les pertes de puissance au minimum.

La figure (2.1) représente le montage d'un convertisseur DC/DC, entre la source et la charge.

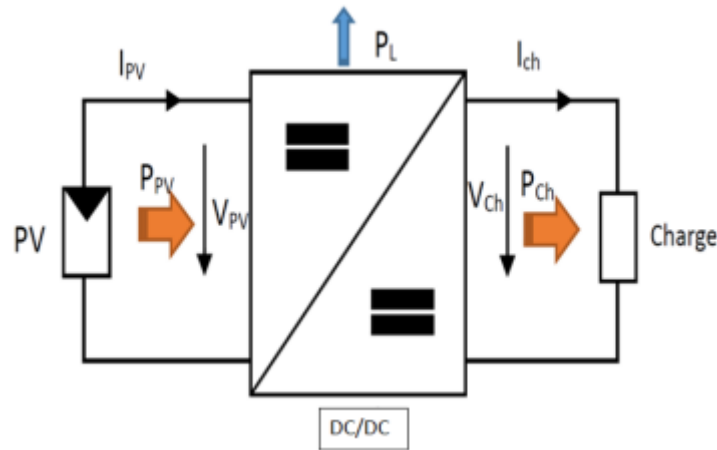


Figure 2.1: Schéma d'un convertisseur hacheur.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC :

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

Parmi les trois types de convertisseurs DC-DC, nous aborderons ici le principe de fonctionnement du convertisseur BOOST.

II.2.1. Le hacheur survolteur :

Le hacheur survolteur « BOOST » amplifie la tension qu'il reçoit en entrée de son circuit qui est représenté sur la figure (2.2).[19]

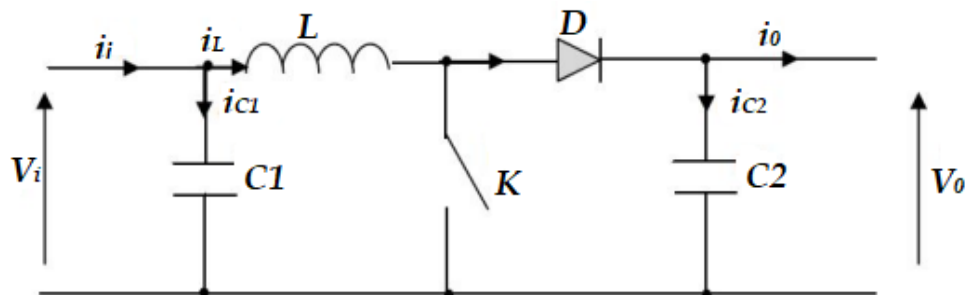


Figure 2.2: Schéma de principe du hacheur BOOST.

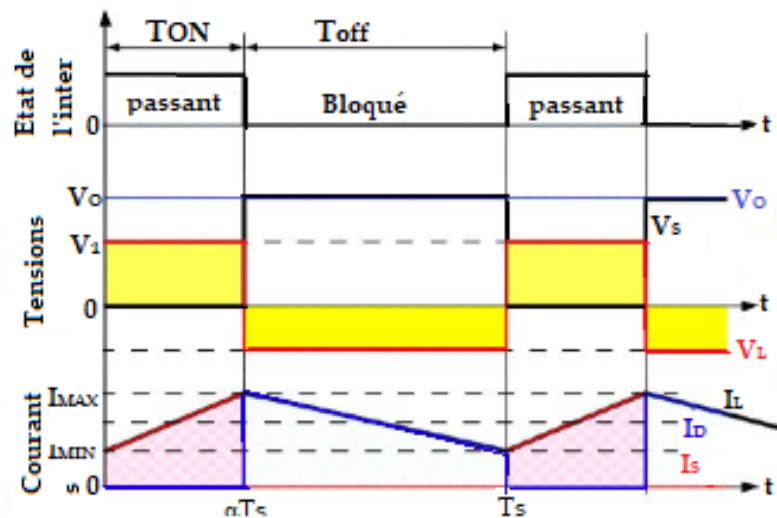


Figure 2.3: Formes d'ondes courant/tension dans le hacheur BOOST.

Ce diagramme montre comment le hacheur BOOST augmente la tension d'entrée en alternant entre stockage et transfert d'énergie.

Etat de l'inter : Etat de l'interrupteur

T_{ON} (fermé) : L'interrupteur est fermé, permettant au courant de passer et de stocker de l'énergie dans l'inductance.

T_{off} (ouvert) : L'interrupteur est ouvert, forçant l'énergie stockée à se transférer vers la charge via la diode, augmentant ainsi la tension de sortie.

V_0 : tension aux bornes de l'interrupteur.

V_L : tension aux bornes de l'inductance.

i_L : courant de l'inductance.

i_D : courant de la diode.

I_S : courant de l'interrupteur.

II.2.1.1. Principe de fonctionnement :

- Pendant la durée t_{ON} , $t \in [0, \alpha T_s]$: le courant croît progressivement, et l'inductance stocke de l'énergie durant tout le temps de la fermeture de K.

- Pendant la durée t_{OFF} , $t \in [\alpha T_s, T_s]$: l'inductance s'oppose à la variation du courant I_L dans son circuit. Cette variation sollicite aussi la variation du flux magnétique dans son noyau, et donc elle génère une tension à ses bornes qui s'ajoute à la tension de source, le tout se retrouvant aux bornes du condensateur C_2 .

II.2.1.2. Le modèle mathématique équivalent :

Pour analyser le fonctionnement du convertisseur élévateur à l'état d'équilibre, il est essentiel de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K [20]. La figure 2.3 représente le schéma équivalent du BOOST :

- Lorsque K est fermé, c'est-à-dire pendant la période comprise entre $[0, \alpha T_s]$.

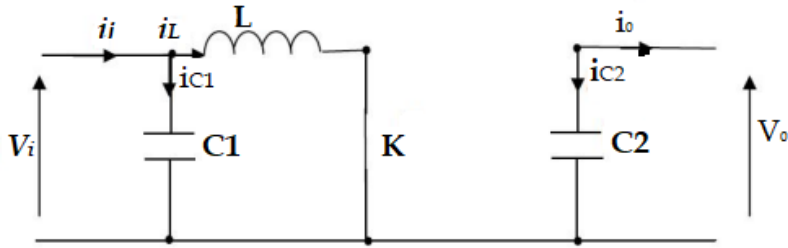


Figure 2.4 : Schéma équivalente du hacheur survolteur quand $t \in [0, \alpha T_s]$.

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

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

- A l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du BOOST est le suivant :

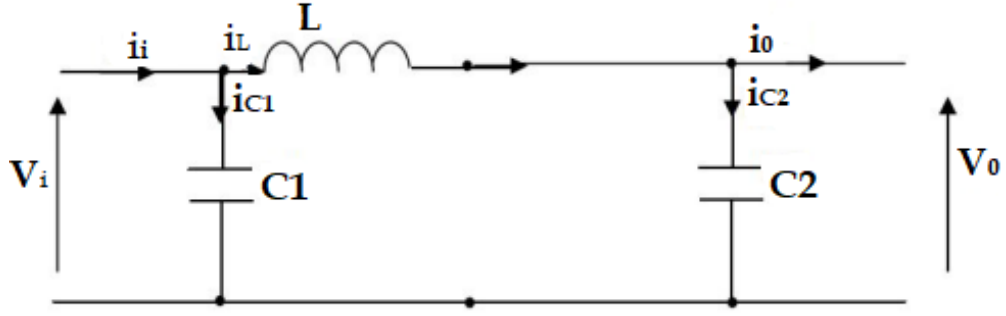


Figure 2.5 : Schéma équivalente d'un hacheur survolteur lorsque $t \in [\alpha.TS, TS]$.

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

II.2.1.3. Le rapport de conversion et le rapport cyclique :

- Rapport cyclique (α) : C'est la fraction de temps pendant laquelle l'interrupteur du hacheur est fermé. Il varie entre 0 et 1.
- Rapport de conversion : C'est le rapport entre la tension de sortie (V_{out}) et la tension d'entrée (V_{in}). Ce rapport indique la proportion d'amplification de la tension par le hacheur BOOST.

On peut calculer le rapport de conversion $\frac{V_o}{V_i}$ par :

$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (2.3)$$

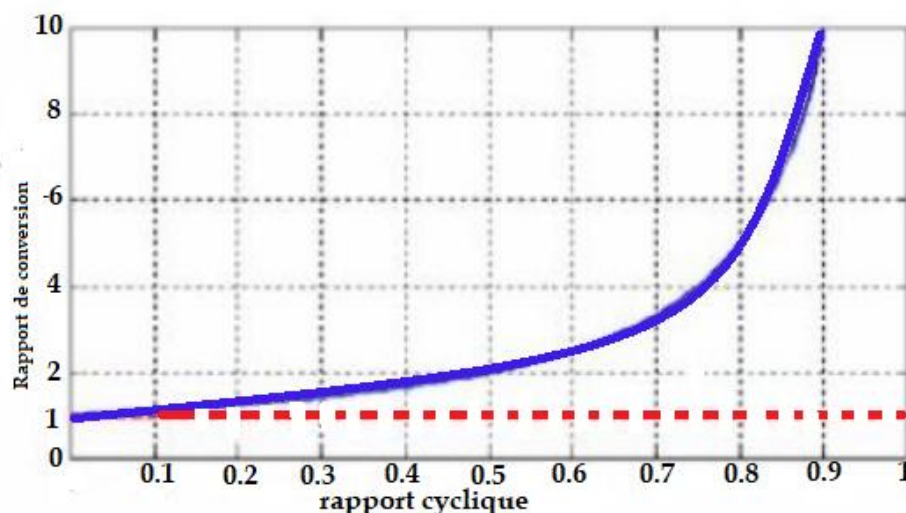


Figure 2.6 : Allure du rapport de conversion en fonction du rapport cyclique.

La courbe montre clairement que, en augmentant le rapport cyclique, le rapport de conversion augmente également. Toutefois, à des rapports cycliques très élevés (proches de 1), le rapport de conversion augmente très rapidement, ce qui pourrait être instable et difficile à contrôler précisément.

Pour un fonctionnement stable et efficace, le hacheur BOOST est souvent utilisé dans une plage de rapport cyclique modérée (typiquement entre 0.3 et 0.7) où le rapport de conversion est contrôlable et augmente de manière raisonnable.

Lorsqu'on s'approche de $\alpha = 1$, le rapport de conversion devient très grand, ce qui peut conduire à des tensions de sortie très élevées et potentiellement à des problèmes de stabilité et de gestion des composants.

II.3. Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) :

II.3.1. La technologie MPPT :

MPPT est l'acronyme pour « Maximum Power Point Tracking ». C'est une technologie utilisée dans les onduleurs solaires et les contrôleurs de charge pour maximiser l'efficacité des systèmes d'énergie solaire. L'objectif de la MPPT est d'extraire la quantité maximale d'énergie d'un panneau solaire ou d'un réseau en

Chapitre II : La commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques

ajustant dynamiquement le point de fonctionnement, ou le point de puissance maximum, des panneaux solaires.

Les panneaux solaires ont un point de fonctionnement spécifique auquel ils génèrent la puissance maximale, qui varie en fonction de facteurs tels que l'intensité du soleil et la température. La technologie MPPT surveille en permanence les caractéristiques électriques des panneaux solaires et ajuste les conditions de fonctionnement pour s'assurer que le système fonctionne au point de puissance maximal ou à proximité.

Les contrôleurs MPPT utilisent des algorithmes pour analyser en permanence la tension et le courant de sortie des panneaux solaires et ajuster le point de fonctionnement électrique pour maximiser la puissance de sortie. Cette optimisation contribue à améliorer l'efficacité globale du système d'énergie solaire et garantit qu'il génère la quantité maximale d'électricité dans des conditions environnementales variables.

II.3.2. Contrôleur de charge solaire MPPT :

Un contrôleur de charge solaire MPPT est un élément crucial pour optimiser l'efficacité des systèmes d'énergie solaire en contrôlant le flux de charge dans les batteries. Ce contrôleur garantit que les panneaux solaires fonctionnent à leur point de puissance maximale, améliorant la production et le stockage d'énergie [21][22].



Figure 2.7 : Contrôleurs MPPT.

II.3.3. Les caractéristiques principales du contrôleur de charge solaire MPPT :

Dans toutes les applications où le module PV est la source d'énergie, le contrôleur de charge solaire MPPT est utilisé pour corriger les variations des caractéristiques de courant-tension des cellules solaires :

- Le contrôleur de charge solaire MPPT est nécessaire pour que les systèmes d'énergie solaire puissent extraire la puissance maximale du module PV ; Il force le module PV à fonctionner à une tension proche du point de puissance maximale pour tirer la puissance maximale disponible.
- Le contrôleur de charge solaire MPPT permet d'utiliser un module PV avec une sortie de tension plus élevée que la tension de fonctionnement du système de batterie. Cela signifie qu'il réduit la taille de fil nécessaire tout en conservant la pleine sortie d'un module PV.
- Le contrôleur de charge solaire MPPT réduit la complexité du système tandis que le rendement du système est élevé.
- Puisque la puissance de sortie du PV est utilisée pour contrôler directement le convertisseur DC-DC. Le contrôleur de charge solaire MPPT peut être appliqué à d'autres sources d'énergie renouvelables telles que les petites turbines à eau, les éoliennes, etc.

II.3.4. Schéma du modèle MPPT de base :

La figure (2.6) illustre le principe d'application d'un régulateur MPPT sur un système donné. Les signaux G et T servent d'entrées au panneau PV, qui produit la tension du panneau (V_{pv}) et dirige le courant du panneau (I_{pv}) vers un convertisseur DC-DC et le régulateur MPPT. Ce dernier évalue le courant de point de puissance maximal (I_{mpp}) par rapport à I_{pv} et génère un signal de commutation PWM pour le convertisseur DC-DC afin d'alimenter la charge au maximum. [23]

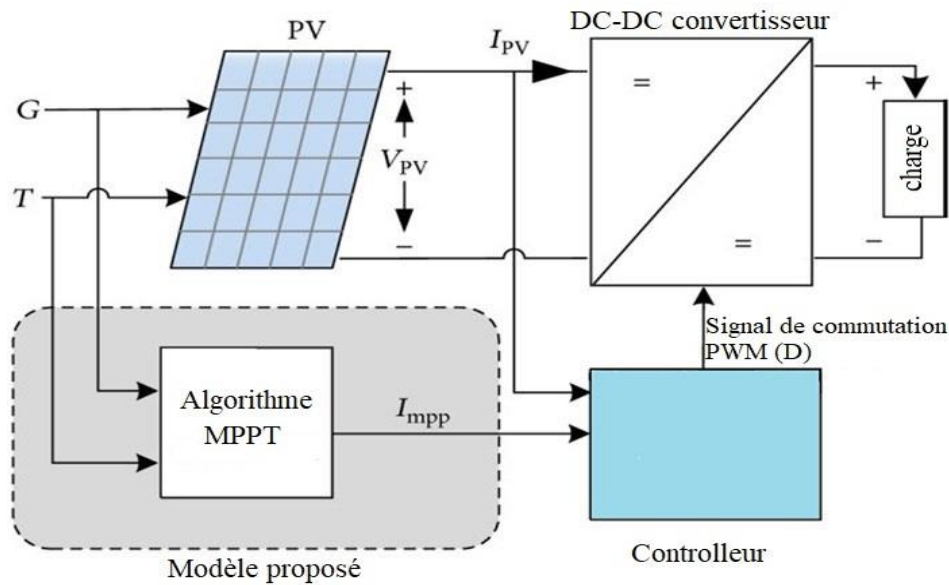


Figure 2.8 : Schéma de principe pour l'application d'un régulateur MPPT sur un système donné.

II.3.5. Les Méthodes de commande MPPT pour un système PV :

Les méthodes de commande MPPT couramment utilisées peuvent être divisées en deux types :

3.5.1. Les méthodes indirectes :

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

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

Chapitre II : La commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques

Les méthodes directes sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changement climatique [24].

- **La méthode de la tension fixe :**

Dans cette méthode, la tension de fonctionnement du module photovoltaïque solaire est ajustée en fonction de la saison pour maximiser la puissance de sortie.

Cette approche est relativement simple et facile à mettre en œuvre, mais elle peut ne pas être aussi précise que d'autres méthodes en raison de l'évolution des niveaux d'irradiation et de température au cours de la même saison.

Ceci sous l'hypothèse que des tensions MPP plus élevées sont prévues pendant l'hiver, et des tensions MPP plus basses pendant l'été pour le même niveau d'irradiation. [25]

- **La Méthode de la tension en circuit ouvert fractionné :**

Dans cette méthode, on suppose que :

$$V_{mpp} = k * V_{oc} \quad (2.4)$$

Où k est une constante et sa valeur pour le silicium cristallin est généralement d'environ 0,7 à 0,8. Cependant, la constante k n'est qu'une approximation conduisant à une efficacité réduite, et le système doit trouver la nouvelle tension de circuit ouvert (V_{out}) lorsque la condition d'éclairage change. Pour trouver la nouvelle tension de circuit ouvert, la charge connectée au module PV doit être déconnectée provoquant une perte de puissance.

Par conséquent, les méthodes MPPT directes mesurant la puissance sont plus précises et ont une réponse plus rapide que les méthodes indirectes [25].

3.5.2. Les méthodes directes :

Le contrôleur MPPT détermine le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque en analysant les courants, tensions ou puissances mesurés. Il peut ainsi s'adapter aux changements imprévus des conditions de fonctionnement.

Chapitre II : La commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques

Généralement, ces contrôleurs utilisent un algorithme de recherche itératif pour suivre le maximum de la courbe de puissance. A chaque pas, la tension de fonctionnement est légèrement augmentée. Si la puissance de sortie augmente, le contrôleur poursuit dans la même direction, sinon il inverse le sens de recherche. Ainsi, le point de fonctionnement oscille autour du maximum.

Des algorithmes plus élaborés évitent certaines erreurs, comme un changement brusque d'ensoleillement faussant temporairement la recherche du maximum.

Pour trouver le MPP, le contrôleur doit mesurer la tension et le courant du GPV et calculer leur produit qui donne la puissance.

D'autres méthodes font varier légèrement la fréquence de découpage du convertisseur et analysent la réponse en tension du GPV pour se rapprocher du MPP.

L'avantage de ces commandes MPPT est leur précision et leur réactivité pour extraire le maximum de puissance, malgré les variations des conditions météorologiques. [24]

- **La méthode de perturbation et d'observation (P&O) :**

Le point clé de la méthode P&O est de comparer la puissance photovoltaïque actuelle (P_n) avec la puissance photovoltaïque précédente (P_{n-1}). La puissance photovoltaïque est déterminée par la mesure du courant et de la tension. Lorsque la différence entre la puissance précédente et la puissance actuelle n'est pas nulle, cet algorithme tentera de trouver le point optimal dans le côté gauche ou droit de la position actuelle. La puissance maximale est obtenue lorsque ΔP est nul. La méthode P&O est implémentée sur le convertisseur en ajustant le rapport cyclique de la modulation à largeur d'impulsions. Si la puissance actuelle est plus grande que la précédente, le rapport cyclique sera augmenté jusqu'à ce que le MPP soit trouvé. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle introduit une oscillation sur l'état stationnaire et la variation de tension est grande. Cette méthode a également besoin d'un long temps de suivi et a une réponse lente aux changements d'irradiation et de température [26].

Chapitre II : La commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques

Par cette méthode, le MPP est atteint lorsque $\Delta P = 0$ alors $V_p = V_{mpp}$

$$\Delta P < 0 \text{ alors } V_p > V_{mpp} \quad (2.5)$$

$$\Delta P > 0 \text{ alors } V_p < V_{mpp} \quad (2.6)$$

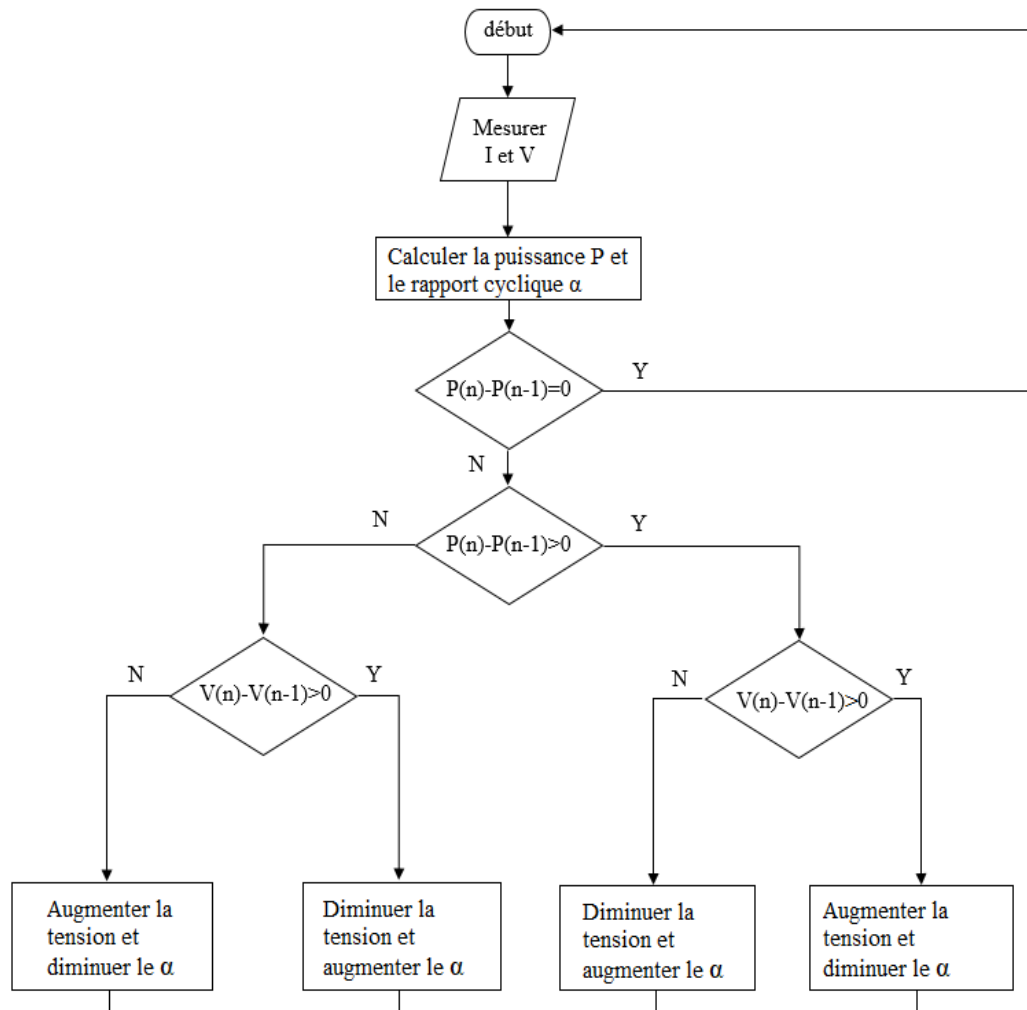


Figure 2.9 : Organigramme de la méthode P&O.

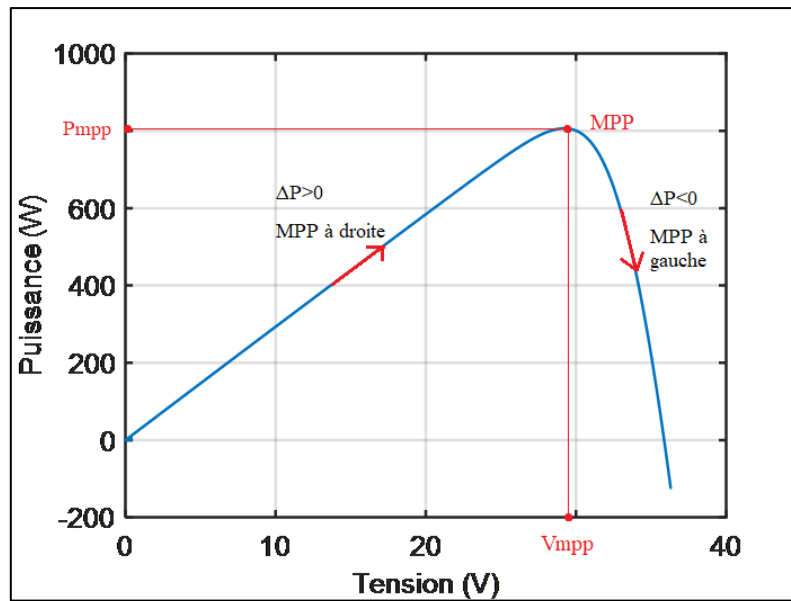


Figure 2.10 : Positionnement du point de puissance maximale suivant la valeur de ΔP sur la caractéristique P-V.

- **La méthode de conduction incrémentale (CI) :**

La conductance incrémentale a été conçue sur la base d'une observation de la courbe caractéristique P-V. Cet algorithme a été développé en 1993 et était destiné à surmonter certains inconvénients de l'algorithme P&O. La CI essaye d'améliorer le temps de suivi et de produire plus d'énergie sur un vaste environnement de changements d'irradiation. Le MPP peut être calculé en utilisant la relation entre :

$$\frac{dI}{dV} \text{ et } \frac{-I}{V}.$$

Si $\frac{dP}{dV}$ est négatif, le MPPT est situé à droite de la position récente et si $\frac{dP}{dV}$ est positif, le MPPT est situé à gauche [26].

II.3.6. Comparaison entre les méthodes MPPT :

Table 2.1: Comparaison entre les méthodes MPPT.

Méthode	Avantages	Inconvénients	Adéquation
Tension fixe	Implémentation simple avec de faibles exigences de calcul. Convient aux applications avec des conditions environnementales stables.	Moins efficace que les techniques MPPT plus sophistiquées. Peut ne pas suivre la MPP réelle avec précision, surtout dans des conditions changeantes.	Convient aux applications avec des ressources de calcul limitées et où les exigences de précision ne sont pas critiques.
Tension en circuit ouvert	Mise en œuvre relativement simple nécessitant moins de capteurs. Efficace dans des conditions stationnaires où la relation entre la tension de circuit ouvert et la tension de MPP reste stable.	Moins précise que les méthodes qui mesurent directement la puissance de sortie. Peut ne pas suivre le MPP vrai avec précision dans des conditions environnementales variables.	Convient aux applications avec des fluctuations environnementales minimales et où les exigences de précision ne sont pas strictes

Chapitre II : La commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques

Perturber et observer	Simple à mettre en œuvre et à comprendre. Faible complexité de calcul.	Sujette aux oscillations autour du MPP, particulièrement dans des conditions qui changent rapidement. Peut ne pas converger vers le vrai MPP dans certains scénarios.	Convient aux applications avec des conditions environnementales relativement stables où les changements rapides d'irradiance ou de température sont minimales.
Conduction incrémentale	Convergence plus rapide et meilleure précision par rapport à la méthode P&O. Efficace dans les environnements avec une irradiance qui change rapidement.	Complexité de calcul plus élevée par rapport à la méthode P&O. Plus sensible au bruit et aux variations des paramètres.	Convient aux applications où une grande précision et une réponse rapide aux changements des conditions environnementales sont nécessaires.

En résumé, le choix de la méthode MPPT dépend de facteurs tels que la complexité de l'application, le degré de variabilité environnementale, les exigences de précision et les ressources de calcul disponibles. Bien que certaines méthodes offrent simplicité et facilité de mise en œuvre, d'autres offrent une plus grande précision et de meilleures performances dans des conditions changeantes, mais peuvent nécessiter plus de ressources informatiques.

II.3.7. Caractéristiques de MPPT :

Les caractéristiques des systèmes MPPT sont les suivantes :

- **Production d'énergie améliorée :** Grâce aux systèmes MPPT, les panneaux solaires fonctionnent toujours à leur puissance maximale, indépendamment des changements environnementaux. Les algorithmes MPPT ajustent dynamiquement le fonctionnement du système photovoltaïque, ce qui augmente la production d'électricité. Cette technologie peut augmenter la production d'énergie jusqu'à 30 % par rapport aux systèmes sans MPPT.

- **Utilisation optimale des ressources solaires :** La technologie MPPT s'avère inestimable dans les régions où les conditions météorologiques imprévisibles ou les problèmes d'ombrage affectent les performances des panneaux solaires. En analysant continuellement la sortie du panneau, la MPPT optimise la tension et le courant pour correspondre au point de puissance maximale, maximisant ainsi l'utilisation des ressources solaires et assurant une puissance de pointe indépendamment des conditions.

- **Efficacité améliorée du système :** la MPPT garantit que les systèmes photovoltaïques solaires fonctionnent à leur efficacité maximale, minimisant les pertes d'énergie et maximisant les performances globales du système. La conversion de tension dynamique permet aux panneaux de maintenir une efficacité maximale indépendamment des fluctuations de tension de la batterie, réduisant considérablement les pertes de puissance et améliorant l'efficacité du système.

- **Rentabilité :** La technologie MPPT offre un retour sur investissement convaincant en maximisant la production d'énergie à partir d'un nombre donné de panneaux solaires. En optimisant la production d'énergie, la MPPT permet aux plus petits réseaux solaires de correspondre à la production d'énergie de plus grands systèmes non-MPPT. Cela réduit le nombre requis de panneaux solaires, ce qui entraîne des économies de coûts d'installation et d'entretien. De plus, les systèmes MPPT permettent d'utiliser un câblage solaire plus fin en raison de leur fonctionnement à haute tension, ce qui réduit encore les coûts.

II.4. Critères d'évaluation d'une commande MPPT :

La qualité de la commande MPPT peut être décrite comme la position du système par rapport au Point de Puissance Maximum (PPM). La quantité de puissance réelle fournie par le GPV est influencée par les diverses commandes appliquées au niveau du convertisseur (comme le MPPT, le contrôle de tension, la connexion directe, etc.). L'efficacité du point de fonctionnement qui en résulte (dénommée η_{MPPT}) est utilisée pour évaluer l'efficacité de la commande du convertisseur de puissance. Le η_{MPPT} indique le pourcentage de perte de puissance du module PV par rapport à sa puissance maximale théorique. [27]

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{eff}}{P_{max}} \quad (2.7)$$

Où :

η_{MPPT} : le rendement du point de puissance maximale.

P_{eff} : La puissance effectivement délivrée par le générateur photovoltaïque.

P_{max} : la puissance maximale disponible à la sortie du panneau.

L'évaluation de l'efficacité d'une commande MPPT ne se limite pas uniquement au paramètre η_{MPPT} . D'autres critères tout aussi significatifs sont employés pour évaluer la qualité de la commande : [28]

Efficacité de conversion : L'algorithme MPPT doit maximiser l'efficacité de conversion en extrayant la puissance maximale disponible des panneaux solaires, quelles que soient les conditions d'irradiance et de température.

Rapidité de suivi : L'algorithme doit réagir rapidement aux changements de conditions météorologiques, en ajustant rapidement la tension ou le courant pour suivre le point de puissance maximale.

Simplicité et Coût : La conception de la commande MPPT doit être simple, économe en énergie et offrir un coût d'exploitation raisonnable, de sorte que son utilisation puisse compenser les dépenses supplémentaires investies

Chapitre II : La commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques

Flexibilité : Indépendamment des conditions d'utilisation, la commande MPPT doit être précise et stable. Elle doit être conçue pour fonctionner de manière précise et fiable avec différents types de panneaux solaires, sans nécessiter de modifications importantes.

II.5. Intégration de la commande MPPT avec le convertisseur BOOST :

L'intégration de la commande MPPT avec le convertisseur BOOST est une pratique courante dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser l'efficacité de la conversion d'énergie solaire en électricité. Cette intégration permet de suivre en temps réel le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, même en cas de variations climatiques, assurant ainsi une production optimale d'énergie.

En utilisant un convertisseur BOOST, la tension continue et de faible amplitude délivrée par les panneaux solaires est élevée à une valeur supérieure, ce qui est essentiel pour optimiser le transfert de puissance entre le générateur PV et sa charge. La commande MPPT associée au convertisseur BOOST permet de maintenir le générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale, assurant ainsi une extraction optimale de la puissance disponible à tout moment, indépendamment des conditions météorologiques.

Cette intégration est cruciale pour garantir une efficacité énergétique maximale du système photovoltaïque, en ajustant dynamiquement le fonctionnement du convertisseur de puissance pour suivre et exploiter pleinement le potentiel de production d'énergie solaire.[29][30]

II.6. Conclusion :

Pour résumer, ce chapitre a examiné de près les convertisseurs DC-DC, en se focalisant sur le convertisseur BOOST en particulier. Son fonctionnement et sa commande ont été abordés. De plus, nous avons exploré différentes façons de

Chapitre II : La commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques

maximiser la puissance à travers la commande du suivi du point de puissance maximale (MPPT). Cette analyse nous donne une meilleure compréhension de la manière d'optimiser l'efficacité énergétique des systèmes de conversion d'énergie.

Chapitre III :

l'Optimisation par essaim particulaire

III.1. Introduction :

L'optimisation joue un rôle crucial dans de nombreux domaines, cherchant à identifier la meilleure solution parmi plusieurs choix possibles. Parmi les approches d'optimisation, l'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) se démarque par son efficacité dans la résolution de problèmes complexes. S'inspirant du comportement social des essaims, l'OEP repose sur la coopération entre les particules évoluant dans un espace multidimensionnel. Ce chapitre explore les concepts fondamentaux de l'optimisation en général et l'OEP en particulier, de ses origines à ses applications concrètes.

III.2. Généralités sur l'optimisation :

III.2.1. Définitions :

Optimisation : optimiser signifie améliorer le fonctionnement d'un système en gérant de manière perfectionnée les ressources, et chercher la meilleure solution pour un problème d'optimisation.

Problème d'optimisation : c'est le problème à résoudre par l'optimisation. Il est défini par un espace d'état, une ou plusieurs fonctions objectifs et des contraintes [31].

Espace d'état : ou l'espace de recherche, est l'ensemble de toutes les configurations possibles du système, représentant toutes les combinaisons permises de ses variables et paramètres à un moment donné.

Fonction objectif : appelée aussi le critère à optimiser, c'est la fonction à maximiser ou à minimiser pour déterminer la meilleure solution du problème. Elle attribue à chaque variable de l'espace d'état un nombre réel indiquant sa valeur dans l'essaim.

Contraintes : des règles qui limitent l'espace de recherche, et des conditions qui doivent être respectées lors de l'optimisation du problème. Ces contraintes peuvent être des contraintes d'égalité ou des contraintes d'inégalité.

Solution optimale : ou l'optimum, est la meilleure solution dans l'espace d'état.

III.2.2. L'objectif d'optimisation :

L'objectif de l'optimisation, dans un contexte général, est d'améliorer ou de maximiser un certain critère ou une certaine fonction sous contraintes. Cela peut prendre différentes formes selon le domaine d'application.

En mathématiques et en sciences de l'ingénieur, par exemple, l'optimisation vise à trouver les valeurs des variables qui minimisent ou maximisent une fonction objectif tout en satisfaisant des contraintes. Dans le domaine des affaires, l'optimisation peut viser à maximiser les profits, minimiser les coûts ou encore améliorer l'efficacité des opérations.

En général, l'optimisation cherche à trouver la meilleure solution possible dans un ensemble de solutions potentielles, en utilisant des techniques telles que la programmation linéaire, la programmation non linéaire, l'optimisation convexe, etc.

III.2.3. Applications :

L'optimisation est un véritable allié dans de nombreux domaines :

Ingénierie et conception : En optimisant la conception de produits, de structures et de systèmes, nous visons à maximiser leurs performances tout en réduisant les coûts et en respectant les contraintes.

Logistique et transport : Optimisation des itinéraires, l'allocation des ressources et la gestion des stocks afin de minimiser les coûts et les temps de transit, garantissant ainsi une logistique efficace et économique.

Finance : Optimisation de portefeuille, d'allocation de ressources et de stratégies d'investissement vise à maximiser les rendements tout en minimisant les risques, assurant ainsi une gestion financière prudente et efficace.

Chapitre III : L'optimisation par essaim particulière

Production et opérations : Optimisation des processus de fabrication, la planification de la production et la chaîne d'approvisionnement pour améliorer l'efficacité et réduire les coûts de production.

Réseaux et télécommunications : Optimisation des réseaux de communication, de la gestion des ressources, du routage et de la planification améliore les performances et la fiabilité des communications, garantissant une connectivité fluide.

Science des données et apprentissage automatique : En optimisant les modèles et les algorithmes, nous améliorons la précision, la vitesse d'exécution et l'efficacité des systèmes d'apprentissage automatique et des analyses de données, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives en matière de traitement et d'interprétation des données.

Énergie : Nous optimisons la production, la distribution et la consommation d'énergie pour réduire les coûts, les émissions de carbone et améliorer l'efficacité énergétique, contribuant ainsi à la transition vers des sources d'énergie durables.

Planification urbaine et gestion des ressources : Optimisation des politiques de développement urbain, la gestion des ressources naturelles et l'utilisation des terres pour promouvoir une croissance durable et équilibrée des villes.

Santé : En optimisant les traitements médicaux, la planification hospitalière et la gestion des ressources, nous améliorons l'accès aux soins de santé et les résultats pour les patients, contribuant ainsi à une meilleure qualité de vie.

Optimisation des processus industriels et chimiques : Optimisation des procédés de production, la conception des réacteurs et la planification des opérations pour maximiser les rendements et minimiser les déchets, favorisant ainsi une production plus efficace et respectueuse de l'environnement.

Ces exemples ne représentent qu'une fraction des applications possibles de l'optimisation, qui est largement utilisée dans divers secteurs pour résoudre une variété de problèmes complexes et contribuer à l'amélioration continue de nos sociétés. [32-35]

III.3. Optimisation par essaim particulaire (OEP) :

III.3.1. Définition :

L'optimisation par essaim particulaire (Particle Swarm Optimization) est une méthode de calcul utilisée pour les problèmes d'optimisation. Cette méthode est inspirée des travaux de C. Reynolds [Reynolds 87] et Russel Eberhart et James Kennedy en 1995. Ces chercheurs se sont intéressés au mouvement de bancs de poissons ou de vols d'oiseaux, et ont créé des modèles mathématiques permettant de les simuler. C'est une technique stochastique-métaheuristique basée sur la population où un groupe de particules se déplace dans un espace de recherche, chaque particule suivant sa propre meilleure position et la meilleure position de l'ensemble du groupe. Les particules ajustent leurs mouvements sur la base d'équations simples, convergeant progressivement vers la meilleure position globale. L'OEP est avantageux en raison de sa simplicité, de sa facilité de mise en œuvre sans passer par le calcul du dérivé. Cependant, il a des limites telles la convergence prématurée vers un minimum local, la sensibilité aux choix de paramètre comme le poids d'inertie, et la convergence lente dans les espaces de haute dimension. [36-38]



Figure 3.1: Essaim d'oiseaux.

III.3.2. Principe :

L'optimisation par essaim particulaire repose sur un ensemble d'individus originellement disposés de façon aléatoire et homogène, que nous appellerons dès lors des particules, qui se déplacent dans l'espace de recherche et constituent, chacun, une solution potentielle.

Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée ainsi que la capacité de communiquer avec les particules constituant son entourage. À partir de ces informations, la particule va suivre une tendance faite, d'une part, de sa volonté à retourner vers sa solution optimale, et d'autre part, de son mimétisme par rapport aux solutions trouvées dans son voisinage.

À partir d'optimums locaux et empiriques, l'ensemble des particules va, converger vers la solution optimale globale du problème traité [39].

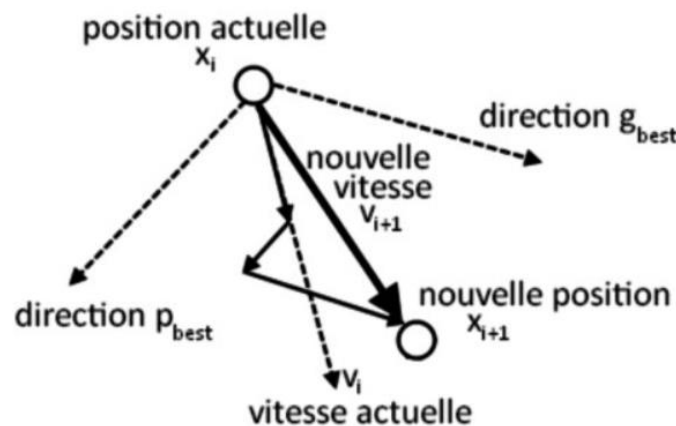


Figure 3.2 : Fonctionnement du PSO.

III.3.3. Construction :

Un essaim de particule est caractérisé par :

1. Population de particules : Un ensemble de particules, chacune représentant une solution potentielle dans l'espace de recherche du problème.

2. Position des particules : La position de chaque particule dans l'espace de

recherche, déterminée par un vecteur de dimension correspondant aux variables du problème.

3. Vitesse des particules : La vitesse de déplacement de chaque particule dans l'espace de recherche, influençant la manière dont elle explore l'espace des solutions.

4. Meilleure position individuelle (p_{best}) : Pour chaque particule, la meilleure position qu'elle ait atteinte depuis le début de l'optimisation. Cette position est déterminée par la fonction objectif du problème.

5. Meilleure position globale (g_{best}) : La meilleure position atteinte parmi toutes les particules de l'essaim depuis le début de l'optimisation. Elle représente la meilleure solution trouvée jusqu'à présent dans tout l'essaim.

6. Fonction objectif : Une fonction qui évalue la qualité de chaque solution candidate dans l'espace de recherche. L'objectif est de minimiser ou de maximiser cette fonction, selon le type du problème.

7. Critère d'arrêt : Une condition qui détermine quand l'algorithme s'arrête, comme un nombre maximum d'itérations ou l'atteinte d'un objectif prédéfini.

III.3.4. Configuration de la méthode :

1. Nombres de particules : La quantité de particules allouées à résoudre le problème dépend principalement de deux facteurs : la taille de l'espace de recherche et le rapport entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Il n'existe aucune règle pour déterminer ce paramètre. Effectuer de nombreux essais permet d'acquérir l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre [39].

2. **Coefficients de confiance** : Les coefficients de confiance sont des mesures statistiques utilisées pour évaluer la fiabilité des estimations ou des résultats obtenus dans une analyse.

Les variables aléatoires ρ_1 et ρ_2 peuvent être définies de la façon suivante :

$$\begin{cases} \rho_1 = r_1 \cdot c_1 \\ \rho_2 = r_2 \cdot c_2 \end{cases} \quad (3.1)$$

Où :

r_1 et r_2 sont des variables aléatoires entre 0 et 1.

c_1 représente l'attraction vers la meilleure position de la particule.

c_2 représente l'attraction vers la meilleure position du voisinage.

c_1 et c_2 sont des constantes positives déterminées de façon empirique et suivant la relation $c_1 + c_2 \leq 4$.

3. **Facteur d'inertie (ψ)** : est un paramètre clé qui influence le mouvement des particules dans l'espace de recherche. Ce facteur contrôle la contribution de la vitesse précédente d'une particule à sa nouvelle vitesse lors de la mise à jour de la position. En ajustant le facteur d'inertie, on peut moduler l'exploration et l'exploitation de l'algorithme, permettant aux particules de rechercher de nouvelles solutions tout en exploitant les meilleures solutions actuelles.

4. **Mise à jour de la vitesse et de la position** : la mise à jour est faite suivant les deux équations suivantes :

$$V_i(t+1) = \psi * V_i(t) + \rho_1 * (p_{i_{best}} - X_i(t)) + \rho_2 * (g_{best} - X_i(t)) \quad (3.2)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (3.3)$$

Où :

V_i : la vitesse de la particule i .

X_i : la position de la particule i .

g_{best} : la meilleure position atteinte par le voisinage de la particule i .

$p_{i_{best}}$: la meilleure position atteinte par la particule i .

5. **Initialisation de l'essaim** : Les positions et les vitesses initiales des particules doivent être initialisées de manière aléatoire selon une distribution uniforme sur l'intervalle $[0, 1]$. Cependant, pour ce qui est des positions des particules, il est recommandé d'utiliser un générateur de séquences de SOBOL, plus adapté pour obtenir une répartition homogène des particules dans un espace de dimension n .

*La séquence de SOBOL est une méthode de génération de suites de nombres pseudo-aléatoires particulièrement adaptée à l'analyse de sensibilité et à l'optimisation de modèles complexes [39].

6. **Critère d'arrêt** : la condition qui arrête l'algorithme doit être indiquée.

III.3.5. Organigramme :

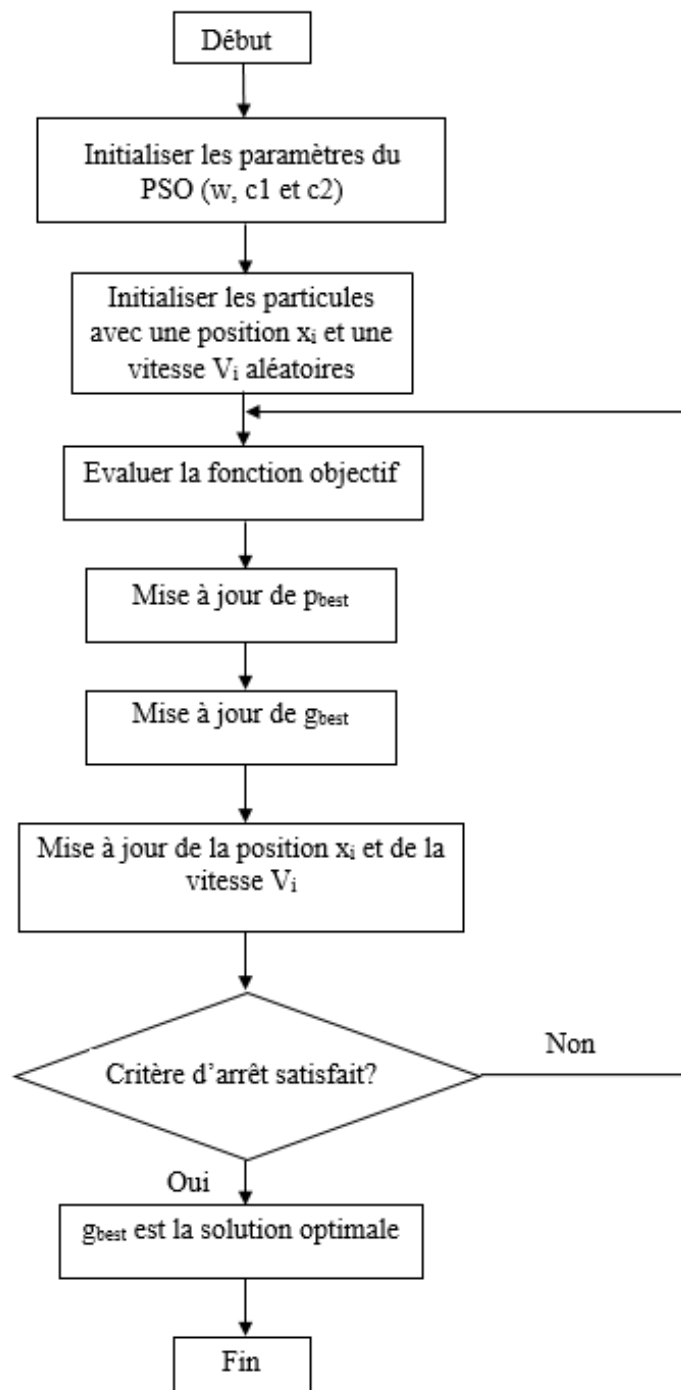


Figure 3.3: Organigramme de la méthode OEP.

III.4. L'exploitation et l'exploration dans OEP :

Explorer implique examiner de nombreuses régions de l'espace de recherche pour éviter les optimums locaux, tandis qu'exploiter signifie examiner attentivement les régions prometteuses pour découvrir de bons optimums locaux. Il s'agit de trouver un équilibre entre découvrir de nouvelles zones et approfondir l'exploration des zones prometteuses.

L'exploitation et l'exploration sont deux concepts clés dans l'optimisation par essaim particulaire. L'exploitation fait référence au processus de recherche de solutions optimales dans les zones proches des solutions actuellement connues, tandis que l'exploration se concentre sur la recherche de nouvelles solutions dans des zones non encore explorées.

Dans le contexte de l'OEP, l'exploitation est réalisée par la mise à jour de la position et de la vitesse des particules en se basant sur leur meilleure position personnelle et la meilleure position globale de l'essaim [40]. Cela permet aux particules de se rapprocher de la solution optimale en explorant les zones proches des solutions actuellement connues.

D'un autre côté, l'exploration est assurée par des techniques telles que la recherche de dimension particulaire (PMD) qui introduit de la diversité dans les positions des particules. Cette technique permet aux particules de s'éloigner des solutions actuellement connues et d'explorer de nouvelles zones de l'espace de recherche.

D'autres techniques d'exploration incluent la technique de partage de solution, qui permet aux meilleures particules de partager leurs informations et de mettre à jour leurs vitesses. La technique de recherche de plage partagée (SRS), empêche les particules de tomber dans un optimum local et étend l'exploration de l'espace de recherche à des zones inexplorées [41].

En résumé, l'exploitation et l'exploration sont deux concepts complémentaires dans l'OEP, qui permettent de trouver des solutions optimales en explorant à la fois les zones proches des solutions actuellement connues et les zones non encore explorées de l'espace de recherche.

III.5. L'adaptation de l'OEP à la commande MPPT :

L'adaptation de l'OEP à la commande MPPT implique l'utilisation de l'algorithme d'OEP pour maximiser la puissance délivrée par un générateur photovoltaïque. Dans ce contexte, l'OEP est utilisé pour optimiser le contrôleur MPPT afin de suivre et maintenir le point de puissance maximale MPP du système photovoltaïque. Cette adaptation permet d'améliorer l'efficacité de la commande en ajustant le rapport cyclique du convertisseur de puissance pour extraire la puissance maximale disponible du panneau solaire, en tenant compte des variations de l'ensoleillement et de la température.

Les recherches indiquent que l'application de l'OEP à la commande MPPT offre des avantages en termes de précision et de convergence vers le MPP, notamment par rapport à d'autres méthodes telles que P&O et INC. Cette adaptation permet d'optimiser le contrôleur MPPT de manière efficace, en assurant une meilleure performance du système photovoltaïque, même dans des conditions variables telles que des changements d'ensoleillement ou des cas d'ombrage partiel [42].

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré le vaste domaine de l'optimisation, en mettant l'accent sur son objectif fondamental et ses multiples domaines d'application. L'optimisation représente un pilier essentiel dans la résolution de problèmes complexes et dans l'amélioration des processus dans divers domaines, de l'ingénierie à l'économie en passant par la biologie et bien d'autres encore.

Chapitre III : L'optimisation par essaim particulaire

Parmi les différentes méthodes d'optimisation, nous nous sommes particulièrement penchés sur l'optimisation par essaim particulaire, une approche inspirée du comportement collectif des organismes vivants. Cette méthode présente des caractéristiques uniques, telles que sa capacité à explorer l'espace de recherche de manière efficace et sa flexibilité dans la résolution de problèmes multidimensionnels.

Chapitre IV : Simulations et interprétation des résultats

IV.1. Introduction :

Les simulations sont indispensables pour valider les algorithmes de commande MPPT et pour optimiser les systèmes photovoltaïques avant leur déploiement pratique. Elles fournissent des prévisions précieuses et aident à prendre des décisions sur le choix et l'implémentation des techniques de commande.

Ce dernier chapitre se concentre sur les simulations du panneau solaire en boucle ouverte, ainsi que sur l'implémentation et l'évaluation de deux techniques de commande MPPT : l'algorithme P&O et l'algorithme OEP. On va aussi réaliser une étude comparative entre ces deux derniers sous des conditions météorologiques variables, afin de déterminer leurs avantages et limitations respectives.

IV.2. Simulation du système en boucle ouverte :

Nous allons simuler un module photovoltaïque sur Matlab/Simulink en boucle ouverte.

Les paramètres du système sont listés dans le tableau suivant

Table 4.1: Paramètres du panneau considéré.

T	Température	25°C
Ir	Eclairement	0.75 kW/m ²
V _{oc}	Tension de circuit ouvert	36.3 V
I _{sc}	Courant de court-circuit	29.27 A
I _{mpp}	Courant à puissance maximale	27.5 A
V _{mpp}	Tension à puissance maximale	29.16 V
P _{max}	Puissance maximale	0.805 kW

Chapitre IV : Simulations et interprétation des résultats

Pour la simulation du module nous avons utilisé le bloc proposé par la Toolbox : Simscape de Matlab/Simulink présenté sur la figure 4.1.

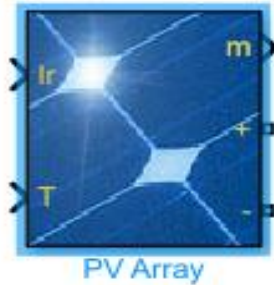


Figure 4.1: Bloc Simulink d'un panneau solaire.

Le schéma bloc pour la simulation de la caractéristique courant-tension est présenté sur la figure 4.2 :

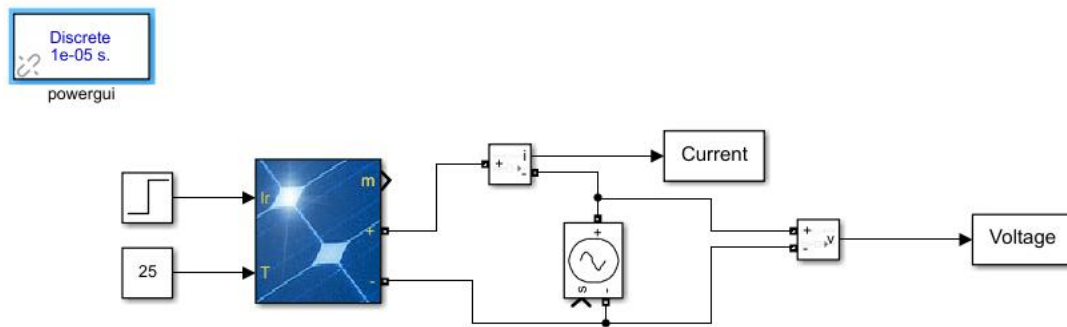


Figure 4.2 : Schéma Simulink du système en boucle ouverte.

IV.2.1. Caractéristiques du système :

Cette courbe représente la caractéristique courant/tension $I(V)$ du système étudié.

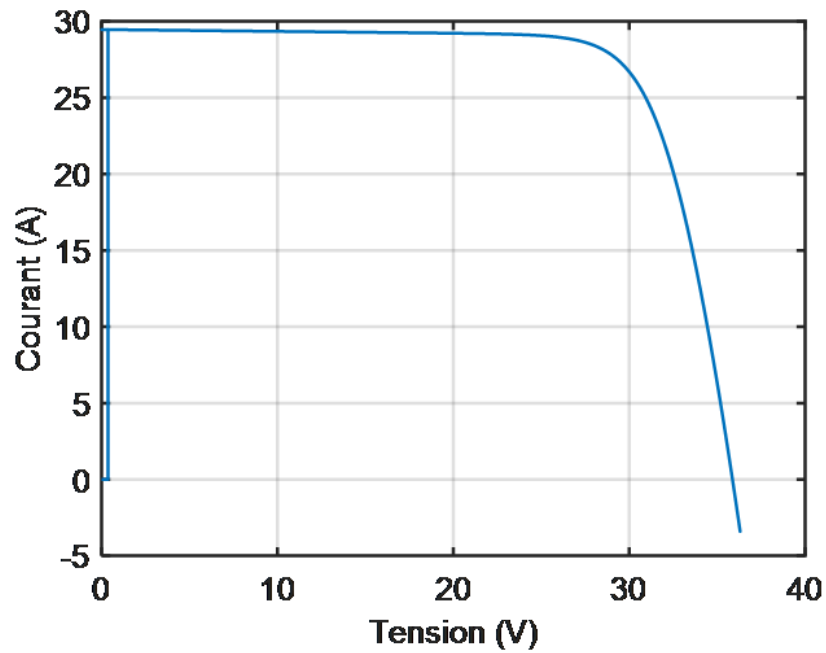


Figure 4.3: Caractéristique courant/tension $I(V)$ du système.

Cette courbe représente la caractéristique puissance/tension $P(V)$ du même système.

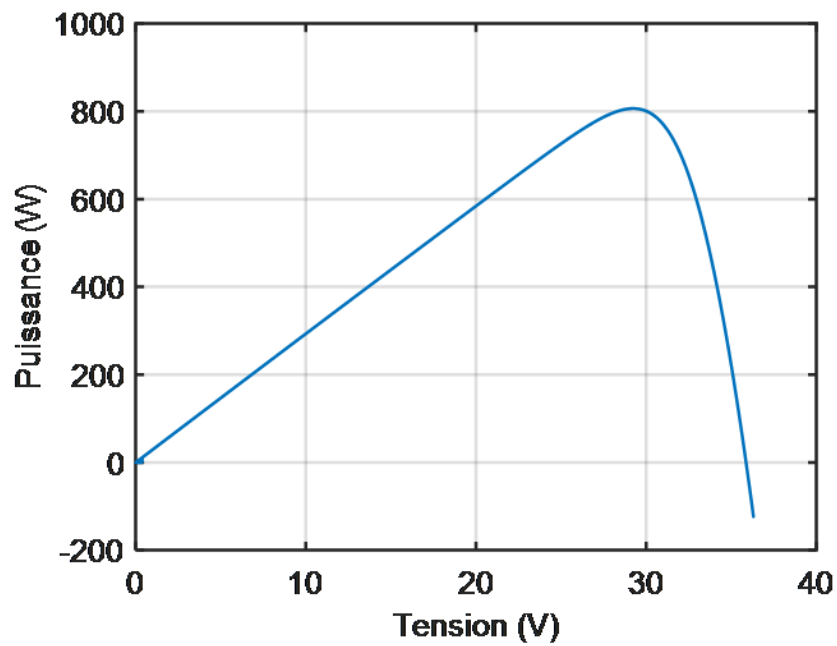


Figure 4.4: Caractéristique puissance/tension $P(V)$ du système.

IV.3. Simulation de la commande MPPT du système par la méthode de perturbation et observation :

Les paramètres du système sont listés dans le tableau suivant

Table 4.2: Paramètres du système pour la simulation de la commande P&O

T	Température	25°C
Ir	Eclairement	0.75 kW/m ²
C1	Capacité 1	100 µF
C2	Capacité 2	3300 µF
L	Inductance	5 mH
Charge	Résistance	10Ω

Le schéma bloc pour la simulation de la commande MPPT avec l'algorithme P&O est représenté sur la figure 4.5, où la charge est prise résistive et est alimentée par un hacheur BOOST, pour un rayonnement de 0.75 kW/m² et une température de 25°C.

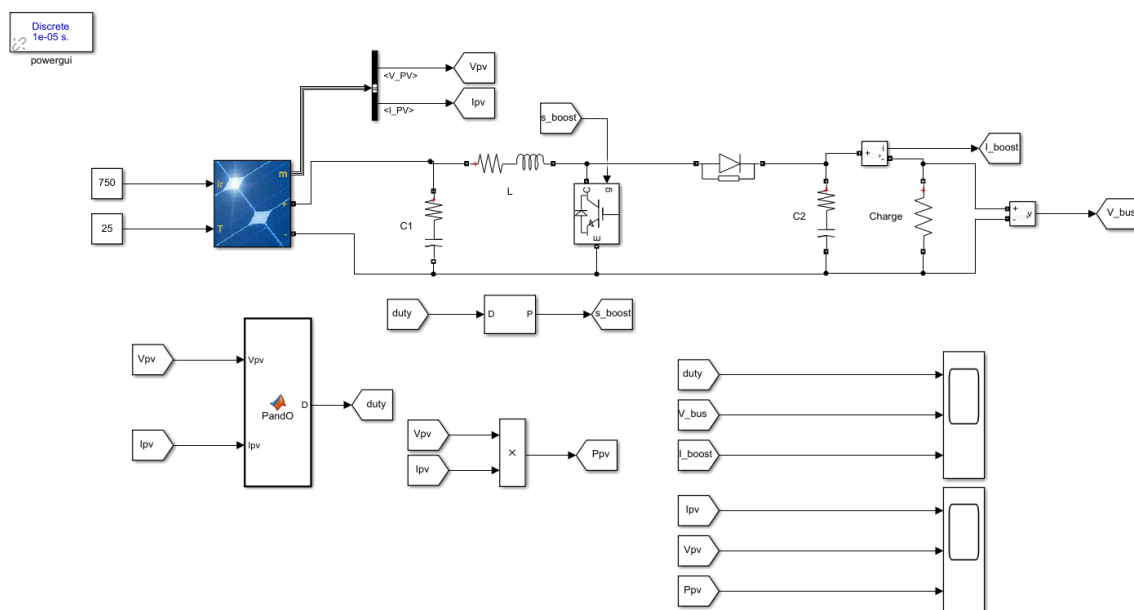


Figure 4.5: Schéma Simulink de la commande P&O.

Chapitre IV : Simulations et interprétation des résultats

L'algorithme P&O est implémenté comme étant une fonction MATLAB dont le fonctionnement est expliqué au chapitre 2 section 3.5.2.1.

IV.4. Simulation de la commande MPPT du système basé sur l'algorithme OEP :

Les paramètres du système sont listés dans le tableau suivant

Table 4.3: Paramètres du système pour la simulation de la commande par OEP

T	Température	25°C
Ir	Eclairement	0.75 kW/m ²
C1	Capacité 1	100 μ F
C2	Capacité 2	3300 μ F
L	Inductance	5 mH
Charge	Résistance	10 Ω

Le schéma bloc pour la simulation de la commande MPPT avec l'algorithme d'OEP est représenté sur la figure 4.6, avec les mêmes conditions prises pour la commande P&O.

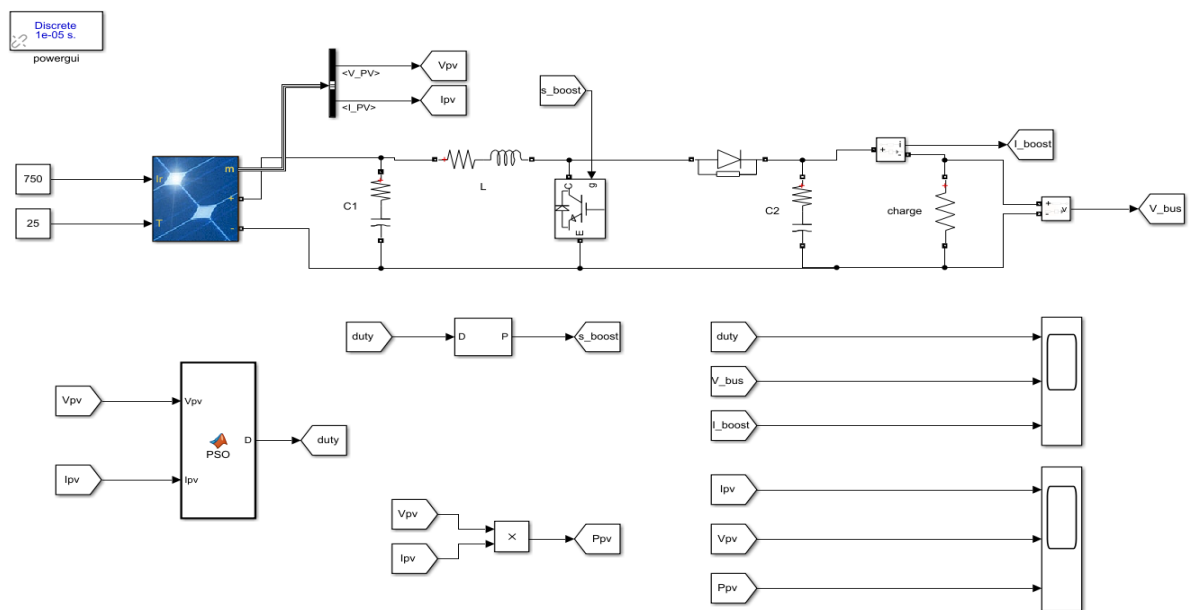


Figure 4.6: Schéma Simulink de la commande OEP.

Chapitre IV : Simulations et interprétation des résultats

L'algorithme OEP est implémenté comme étant une fonction MATLAB dont le fonctionnement est expliqué au chapitre 3 section 3.2.

IV.5. Etude comparative entre les commandes Perturb and Observe et l'optimisation par essaim particulaire :

Dans les simulations suivantes, nous allons faire une comparaison entre la puissance qui peut être délivrée par le panneau solaire en appliquant l'algorithme de la commande MPPT à base de la technique PSO. Pour conclure sur l'efficacité de l'algorithme considéré une comparaison est effectuée avec l'algorithme de perturbation et observation (P&O).

IV.5.1. Cas des conditions stables :

Pour une température de 25°C et une irradiance de 0.75kW/m²

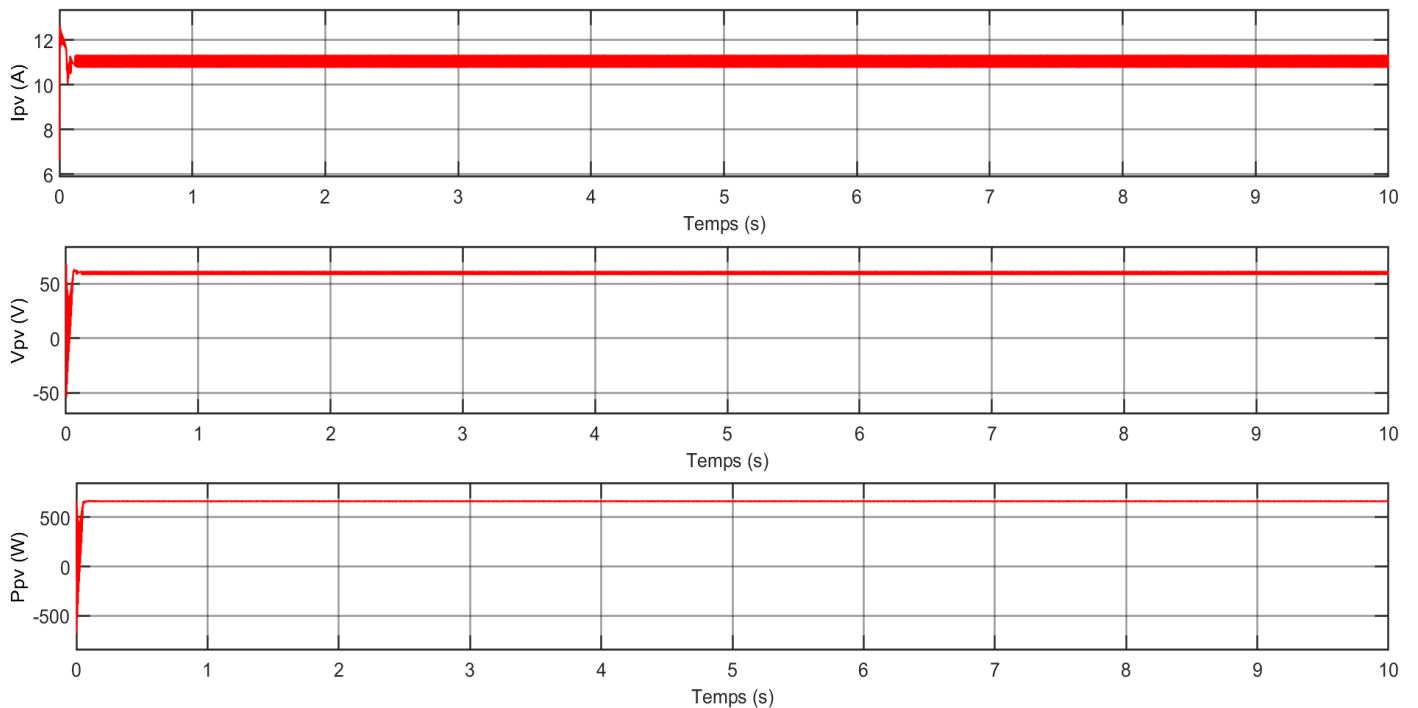


Figure 4.7: Résultats de simulation de la commande MPPT-P&O.

Chapitre IV : Simulations et interprétation des résultats

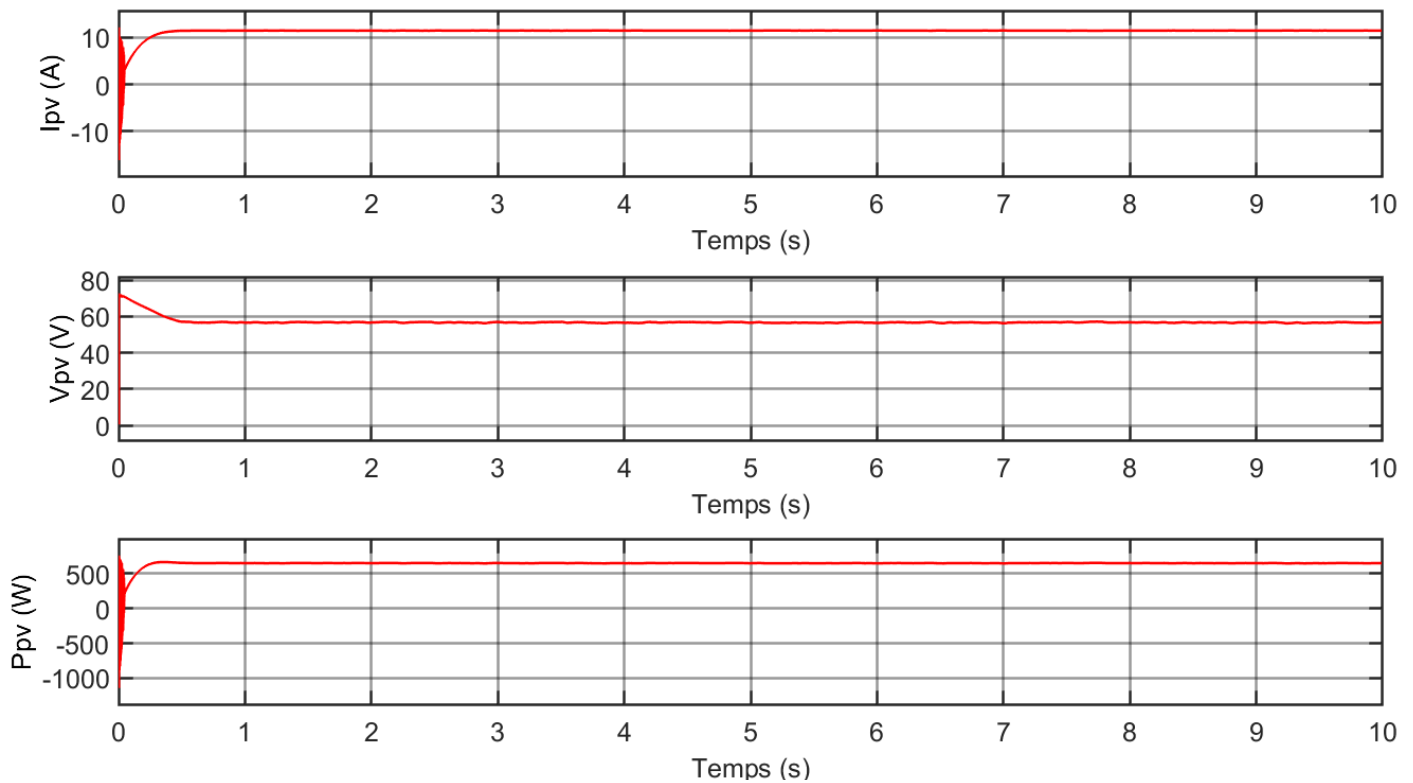


Figure 4.8: Résultats de simulation de la commande MPPT-OEP.

Les courbes de la figure (4.7) montrent l'évolution du courant (I_{pv}), de la tension (V_{pv}), et de la puissance (P_{pv}) d'un panneau solaire au fil du temps, en utilisant l'algorithme P&O pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) :

- La courbe de courant $I_{pv}(t)$ reste relativement stable autour de 12 A. Cela indique que le courant produit par le panneau photovoltaïque ne varie pas beaucoup au cours du temps.
- La courbe de tension $V_{pv}(t)$ montre une augmentation rapide à environ 50 V, suivie d'une stabilisation autour de cette valeur. Cette réponse rapide est typique de l'algorithme P&O, qui ajuste la tension pour maximiser la puissance générée par le panneau.
- La courbe de puissance $P_{pv}(t)$ atteint rapidement environ 500 W, indiquant que l'algorithme P&O a trouvé et maintenu le MPP efficacement. Après une légère ondulation initiale, la puissance se stabilise, montrant que le système fonctionne de manière optimale.

Chapitre IV : Simulations et interprétation des résultats

Les courbes montrent que l'algorithme P&O pour la commande MPPT est efficace pour trouver et maintenir le point de puissance maximale d'un panneau photovoltaïque. Malgré quelques oscillations initiales, le système parvient rapidement à une condition stable, optimisant ainsi la puissance extraite du panneau photovoltaïque.

Les courbes de la figure (4.8) montrent l'évolution du courant (I_{pv}), de la tension (V_{pv}), et de la puissance (P_{pv}) d'un panneau solaire au fil du temps, en utilisant l'algorithme d'OEP pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT).

- La courbe $I_{pv}(t)$ montre que le courant I_{pv} se stabilise rapidement autour de 12 A après un court temps de réponse initial. Cette stabilité indique que le système MPPT a rapidement trouvé et maintenu le point de puissance maximale pour le panneau solaire.
- La tension V_{pv} se stabilise également très rapidement, autour de 50 V, après un léger pic initial. La stabilisation rapide de la tension, comme pour le courant, indique une réponse efficace du système MPPT.
- La puissance P_{pv} atteint environ 500 W et reste stable après une brève période d'oscillations initiales. Cette stabilité suggère que le MPPT a réussi à optimiser et maintenir la production de puissance du panneau solaire à son niveau maximal.

Les résultats montrent que l'algorithme OEP suit rapidement et efficacement le point de puissance maximale, offrant une haute stabilité avec peu de variations. En revanche, l'algorithme P&O suit également le MPP rapidement, mais avec des oscillations mineures une fois le point atteint. Le choix entre les deux dépend des besoins en précision et stabilité du suivi du MPP pour le système photovoltaïque.

IV.5.2. Cas de la variation de l'irradiance :

Pour ce test, la température est maintenue à une valeur constante de 25 °C.

Chapitre IV : Simulations et interprétation des résultats

Les figures ci-dessous montrent la courbe de variation de l'irradiance et les résultats de simulation pour les deux algorithmes P&O et OEP.

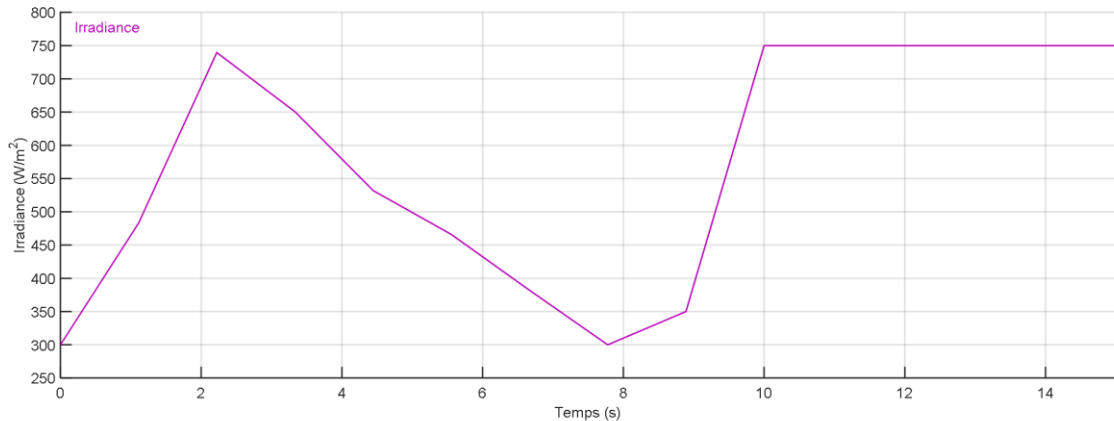


Figure 4.9: Courbe de variation de l'irradiance.

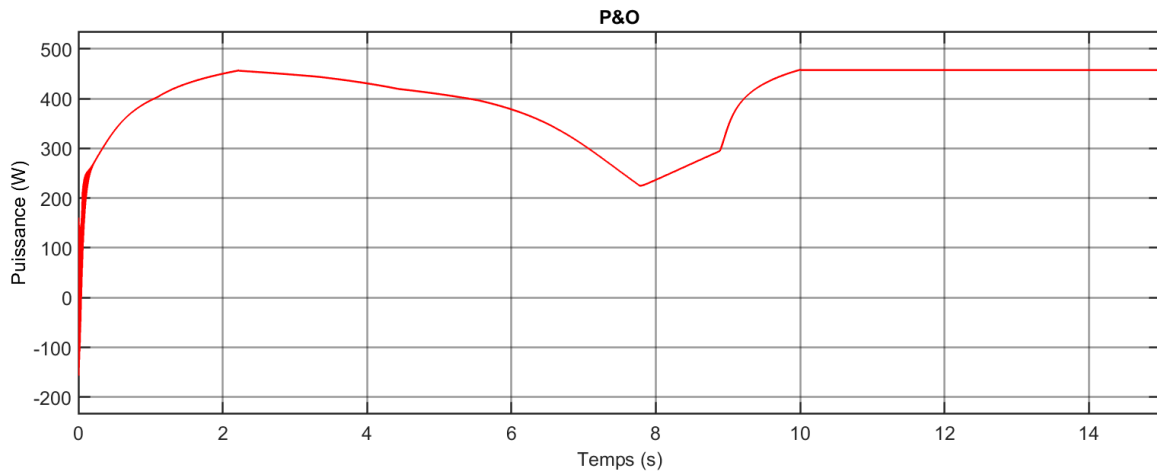


Figure 4.10: L'évolution de la puissance de la commande MPPT-P&O sous une irradiance variable

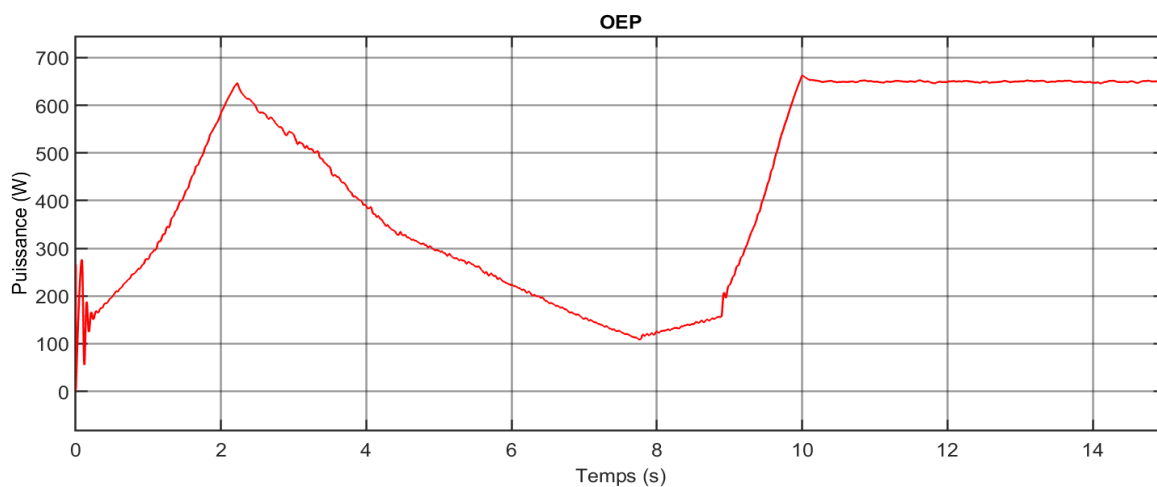


Figure 4.11 : L'évolution de la puissance de la commande MPPT-OEP sous une irradiance variable.

Sous une température constante de 25°C et une irradiance variable, l'algorithme OEP atteint une puissance plus élevée (600 W) comparée à l'algorithme P&O qui présente une chute de puissance et atteint 450 W. L'OEP montre une réponse initiale avec des oscillations légères mais parvient à une stabilité supérieure à long terme, tandis que le P&O offre une réponse initiale rapide mais souffre d'instabilité avant de se stabiliser. L'OEP est donc plus efficace pour maximiser la puissance extraite, tandis que le P&O peut être préféré pour sa réponse initiale rapide malgré sa moindre stabilité.

IV.5.3. Cas de la variation de la température :

Pour ce test, l'irradiance est maintenue à une valeur constante de 0.75 kW/m².

Les figures ci-dessous montrent la courbe de variation de l'irradiance et les résultats de simulation pour les deux algorithmes P&O et OEP.

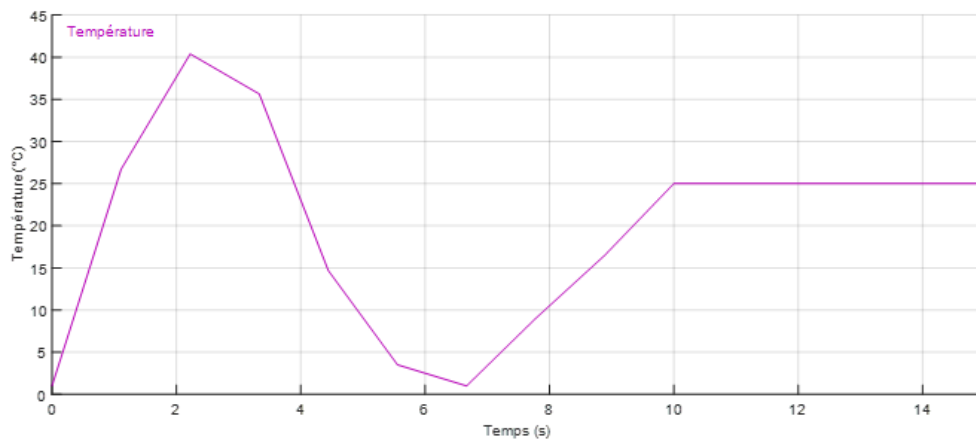


Figure 4.12: Courbe de variation de la température.

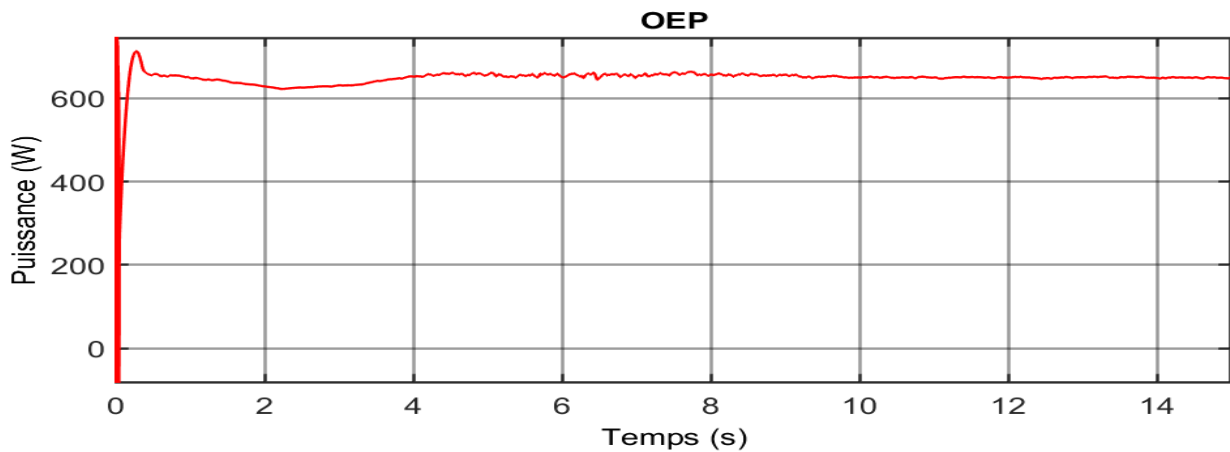


Figure 4.13: L'évolution de la puissance de la commande MPPT-OEP sous une température variable.

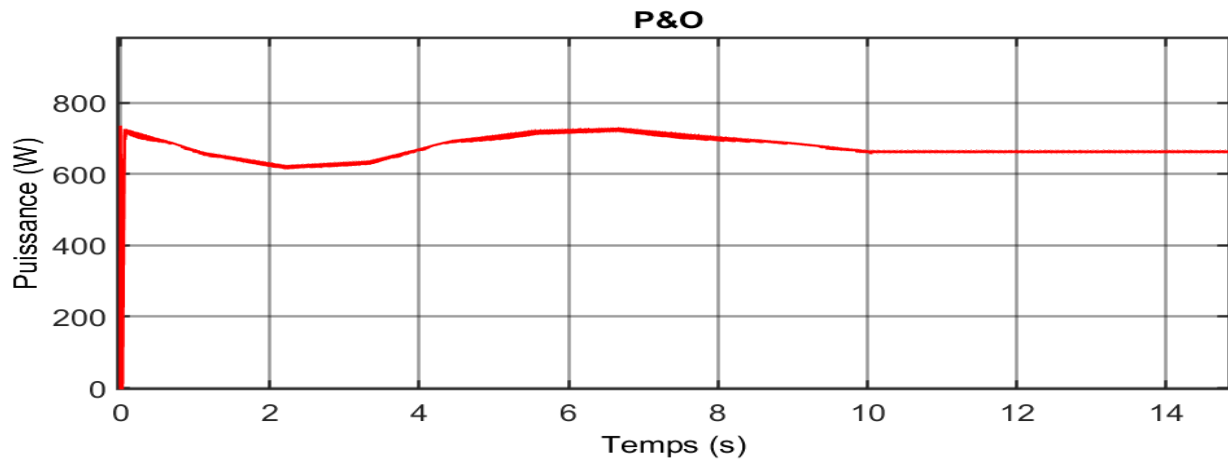


Figure 4.14: L'évolution de la puissance de la commande MPPT-P&O sous une température variable.

Avec une irradiance constante de 750 W/m^2 et une température variable, l'algorithme d'OEP atteint et maintient une puissance de 650 W de manière plus stable avec de légères oscillations initiales. Par contre, l'algorithme P&O commence avec une puissance initiale plus élevée mais subit des variations avant de se stabiliser également autour de 650 W. L'OEP montre une meilleure stabilité globale après l'ajustement initial, tandis que P&O présente plus de changements avant d'atteindre la stabilité. L'OEP est donc plus efficace pour maintenir une puissance stable dans ces conditions, bien que P&O atteigne finalement un niveau de performance similaire.

IV.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a modélisé le système photovoltaïque (panneau solaire) à l'aide de MATLAB/SIMULINK. On a réalisé une étude comparative entre les deux algorithmes de la commande MPPT pour P&O et OEP, sous des conditions variables d'irradiance et de température et les résultats ont été discutés précédemment.

Les résultats de la simulation montrent que l'algorithme d'OEP est plus efficace pour maximiser et maintenir la puissance extraite des panneaux solaires.

Pour conclure, l'OEP est préférable pour des performances optimales et une puissance stable, tandis que P&O peut offrir une alternative acceptable avec une stabilité finale comparable.

Conclusion générale

Cette étude a examiné l'optimisation des systèmes photovoltaïques en utilisant l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire pour améliorer la commande MPPT. L'objectif principal était de maximiser la puissance extraite des panneaux solaires, même face aux variations des conditions environnementales telles que l'ensoleillement et la température.

Les résultats montrent que l'algorithme OEP optimise efficacement le contrôleur MPPT, surpassant les méthodes traditionnelles comme Perturb and Observe en termes de rapidité et de précision. Les simulations effectuées avec MATLAB/Simulink ont confirmé cette supériorité, indiquant une performance globale améliorée du système photovoltaïque.

En résumé, l'intégration de l'OEP dans la commande MPPT des systèmes photovoltaïques représente une avancée significative. Elle permet une exploitation plus efficace de l'énergie solaire et une adaptation optimale aux conditions variables, améliorant ainsi la durabilité et la rentabilité des installations solaires en optimisant l'extraction de l'énergie disponible.

Bibliographie

- [1] Wikipedia Contributors, "Photovoltaic system," *Wikipedia*, 24 Juin 2019. https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_system.
- [2] "How does a photovoltaic system work?," *Enel X*. <https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/how-does-a-photovoltaic-system-work>.
- [3] Solar Energy Technologies Office, "Solar Photovoltaic Technology Basics," *Energy.gov*, 2022. <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>.
- [4] Andreev, V.M.; McEvoy, A.; Markvart, T.; Castañer, L. GaAs and High-Efficiency Space Cells. In *Practical Handbook of Photovoltaics*, 2nd ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2012; pp. 399–416.
- [5] Engana Carmo, J.; Neto Torres, J.P.; Cruz, G.; Marques Lameirinhas, R.A. Effect of the Inclusion of Photovoltaic Solar Panels in the Autonomy of UAV Time of Flight. *Energies* 2021, 14, 876. [CrossRef].
- [6] Breve História da Energia Solar. Available online: <http://web.ist.utl.pt/palmira/solar.html> (consulté le 30 mai 2024).
- [7] Albert Einstein – Facts, NobelPrize.org Nobel Prize Outreach AB. Disponible en ligne: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/einstein/facts> (consulté le 30 mai 2024).
- [8] Nokia Bell Labs. Bell Labs' Greatest Innovations. Available online: <https://www.bell-labs.com/about/history/> (consulté le 30 mai 2024).
- [9] Ohl, R.S. Light-Sensitive Electric Device. U.S. Patent US2402662A, 25 June 1946. Disponible en ligne: <https://patents.google.com/patent/US2402662> (consulté le 30 mai 2024).
- [10] "Observ'ER - L'Observatoire des énergies renouvelables," Observ'ER. http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp (consulté le 30 mai 2024).
- [11] K. F. Zohra, « Commande MPPT pour les panneaux photovoltaïques en ombrage ».

- [12] D. Thematique, « effet photovoltaïque et fonctionnement des installations solaires isolées,» énergies solidaires courrier es n°03 – janvier 2000, france,2000.
- [13] Janet, J.R. (2023) Different Types of Solar Cell, THE RENEWABLE ENERGY HUB. Available at: <https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/solar-panels/types-of-solar-cell> (consulté le 30 mai 2024).
- [14] Aurora Solar, “Comprehensive Guide to Solar Panel Types,” *Aurora Solar*, Jan. 16, 2021. <https://aurorasolar.com/blog/solar-panel-types-guide/>
- [15] M. H. Ahmed et M. M. Hakim, « Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant PSO ».
- [16] D.Amiri et M.Bouabdellah, “Modélisation et simulation d’un panneau solaire photovoltaïque ,” Mémoire, Université SAAD DAHLAB Blida, 2020.
- [17] C. Ben Regaya, H. Hamdi, F. Farhani, A. Marai, A. Zaafouri, et A. Chaari, « Real-time implementation of a novel MPPT control based on the improved PSO algorithm using an adaptive factor selection strategy for photovoltaic systems », *ISA Transactions*, vol. 146, p. 496-510, mars 2024, doi: 10.1016/j.isatra.2023.12.024.
- [18] H. Ahmed and M. Hakim, “Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant PSO,” Mémoire de Master en Electrotechnique, Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, 2020.
- [19] B. Mohamed Lamine et S. Redouane, “Etude et réalisation d’un convertisseur DC-DC avec contrôleur MPPT destiné au pompage photovoltaïque,” Mémoire de fin d’études, Ecole Nationale Polytechnique, 2014.
- [20] S. Redouane, “ Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant l’optimisation par essaim de particules,” Mémoire de master en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2014.
- [21] ECOFLOW, “What Is an MPPT Solar Charge Controller & How Does It Work?,” *EcoFlow US Blog*, Dec. 21, 2022. <https://blog.ecoflow.com/us/what-is-mppt-solar-charge-controller/>
- [22] Northern Arizona Wind & Sun, “What is maximum power point tracking (MPPT),” *Northern Arizona Wind & Sun*, 2019. <https://www.solar-electric.com/learning-center/mppt-solar-charge-controllers.html/>

- [23] Subha, R., and Himavathi, S. (2014). "Neural network based maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions," in International Conference on Advances in Green Energy (ICAGE), 17-18 December 2014 (Thiruvananthapuram, India: IEEE). doi:10.1109/icage.2014.7050141
- [24] BENADEL Faiza. Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV. PhD thesis, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2016.
- [25] S. Salman, X. Ai, et Z. Wu, « Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system », *Prot Control Mod Power Syst*, vol. 3, no 1, p. 25, déc. 2018, doi: 10.1186/s41601-018-0099-8.
- [26] R. I. Putri, S. Wibowo, et M. Rifa'i, « Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Using Incremental Conductance Method », *Energy Procedia*, vol. 68, p. 22-30, avr. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.228.
- [27] T.-Y. Kim, H.-G. Ahn, S. K. Park, and Y.-K. Lee, "A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation," in ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No. 01TH8570), vol. 2, pp. 1011-1014, IEEE, 2001.
- [28] W. Xiao and W. G. Dunford, "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, 2004.
- [29] R. Taleb, A. B. B. Ziane, et H. Benbouhenni, « Réalisation et commande d'une cascade convertisseur boost-onduleur solaire à trois niveaux pour systèmes photovoltaïques ».
- [30] C. Lahore, « Optimisation de commandes MPPT ».
- [31] L. Belhoul, « Résolution de problèmes d'optimisation combinatoire mono et multi-objectifs par énumération ordonnée ».
- [32] Sil, « Mathématiques pour l'Optimisation ».
- [33] J.-Y. Adou, « Applications et limitations de l'optimisation des ressources dans les activités de développement », *evaluation Matters*, 2016.

- [34] "OPTIMISATION : Définition de OPTIMISATION," *www.cnrtl.fr*.
<https://www.cnrtl.fr/definition/optimisation>
- [35] "Optimisation : Définition simple et facile du dictionnaire,"
www.linternaute.fr, 09 Juin 2021.
<https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/optimisation/> (consulté le 30 Mai 2024).
- [36] M. Rouse, Ed., "Particle Swarm Optimization," *Techopedia*, Mar. 30, 2018.
<https://www.techopedia.com/definition/32825/particle-swarm-optimization-pso> (consulté le 30 Mai 2024).
- [37] "What is particle swarm optimization (PSO)? | Autoblocks Glossary,"
www.autoblocks.ai. <https://www.autoblocks.ai/glossary/particle-swarm-optimization> (consulté le 30 Mai 2024).
- [38] Wikipedia Contributors, "Particle swarm optimization," *Wikipedia*, May 17, 2019. https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_swarm_optimization
- [39] G. Calas, « Optimisation par essaim de particules », 2009.
- [40] A. E. Dor, « Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d'images et en électronique ».
- [41] B. Fateh, M. Assia, et M. Hassina, « Etude de l'Identification d'un Système d'Ordre Fractionnaire ».
- [42] M. M. Tadjine, M. S. Taheri, et M. S. Berkane, « Étude des commandes MPPT d'un système Photovoltaïque », 2020.