



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR, EL OUED

Faculté des Sciences appliquées

Département génie électriques

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master Académique

Filière : electrothénique

Spécialité : Machines électriques

Présenté par :

LIWA ADEM NAIM ALLAOUA

ET

BOUKHALFA AHMED RAMI

ET

TAMMA AHMED CHARAF EDDIENE



THEME

Optimisation de la commande MPPT d'un système
photovoltaïque par des techniques d'optimisation
métaheuristiques

Devant le jury composé de :

DR. BARKA NOUREDDINE

Université d'El Oued

Encadreur

DR. LABBI YACINE

Université d'El Oued

Examineur

DR. GACEM ABDELMALEK

Université d'El Oued

Examineur

Année universitaire: 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ

Remerciements

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à notre Créateur, Allah le Tout-Puissant, qui nous a accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

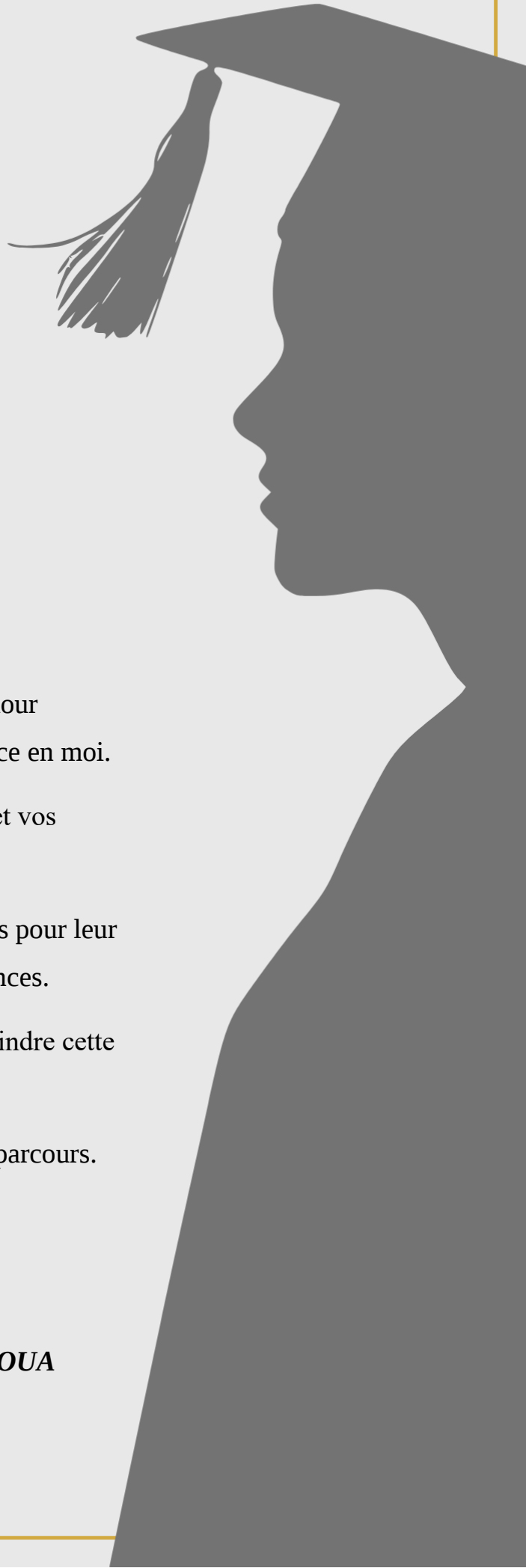
Nous remercions également chaleureusement l'administration de l'Université Hamma Lakhdar d'El Oued ainsi que l'ensemble du corps enseignant pour leurs efforts constants visant à garantir la qualité, la continuité et le succès de ce programme de Master.

Nos remerciements les plus sincères vont à **Monsieur Baraka Nour-Eddine**, qui nous a accompagnés tout au long de ce travail par ses conseils avisés, ses orientations précieuses et son soutien constant.

Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance aux membres du jury **Monsieur Labbi Yacine** et **Monsieur Gacem abdelmalek**, pour avoir accepté de consacrer de leur temps à l'évaluation de notre mémoire.

Enfin, nous adressons toute notre affection, notre gratitude et notre respect à nos chers parents et à notre famille, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et leur présence rassurante tout au long de ce parcours.

Dédicace



Je dédie ce mémoire à mes parents, pour leur amour
inconditionnel, leur soutien indéfectible et leur confiance en moi.

À mes frères et sœurs, merci pour votre présence et vos
encouragements constants.

Je remercie également tous mes enseignants et collègues pour leur
accompagnement et le partage de leurs connaissances.

Enfin, je rends grâce à Dieu pour m'avoir permis d'atteindre cette
étape importante.

Merci à toutes les personnes qui ont contribué à mon parcours.

LIWA ALLAOUA

Dédicace

Par-dessus tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant
de nous avoir accordé le courage et la patience
nécessaires
pour mener à bien ce travail, malgré toutes les
difficultés rencontrées.

Nous dédions cet humble travail :
à nos chers parents, que Dieu les protège,
pour leur soutien moral et financier,
leurs encouragements constants et les nombreux
sacrifices qu'ils ont consentis ;
à toute notre famille, de manière générale ;
et à nos amis proches, pour leur présence et leur appui.
Enfin, nous exprimons notre gratitude à tous ceux que
nous aimons.

BOUKHALFA AHMED RAMI



Dédicace



Par-dessus tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant
de nous avoir accordé le courage et la patience
nécessaires

pour mener à bien ce travail, malgré toutes les
difficultés rencontrées.

Nous dédions cet humble travail :

à nos chers parents, que Dieu les protège,
pour leur soutien moral et financier,

leurs encouragements constants et les nombreux
sacrifices qu'ils ont consentis ;

à toute notre famille, de manière générale ;

et à nos amis proches, pour leur présence et leur appui.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à tous ceux que
nous aimons.

TAMA CHARAF

Résumé

الملخص:

قدمت هذه الدراسة معلومات عامة حول الطاقة الشمسية. بعد ذلك، قمنا بنمذجة ومحاكاة نظام كهروضوئي بقدرة 200 واط لتوضيح كيفية تحويل الخلايا الشمسية للإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية. بهدف تحسين كفاءة النظام بشكل أكبر، قمنا بإدماج تقنية التتبع الأقصى لنقطة القدرة (MPPT) باستخدام خوارزميتي P&O و PSO. أظهرت مقارنة النتائج أن التحكم المعتمد على خوارزمية PSO يقدم أداءً أفضل من التحكم بخوارزمية P&O.

كلمات مفتاحية:

طاقة الشمسية، الخلايا الكهروضوئية، تتبع أقصى نقطة للطاقة، خوارزمية تحسين سرب الجسيمات، خوارزمية الاضطراب والمراقبة.

Résumé :

Cette étude a fourni des informations générales sur l'énergie solaire. Ensuite, nous avons modélisé et simulé un système photovoltaïque de 200 W pour illustrer la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique par les cellules solaires. Afin d'améliorer davantage l'efficacité du système, nous avons intégré la technique de suivi du point de puissance maximale (MPPT) en utilisant les algorithmes P&O et PSO. La comparaison des résultats a montré que le contrôle basé sur l'algorithme PSO offre de meilleures performances que celui basé sur l'algorithme P&O.

Mots-clés :

Énergie solaire, cellules photovoltaïques, suivi du point de puissance maximale, algorithme d'optimisation par essaim de particules, algorithme Perturb and Observe.

Abstract:

This study provided general information about solar energy. We then modeled and simulated a 200-watt photovoltaic system to demonstrate how solar cells convert solar radiation into electrical energy. To further improve system efficiency, we integrated Maximum Power Point Tracking (MPPT) using the P&O and PSO algorithms. The comparison of results showed that the control based on the PSO algorithm delivers better performance than that using the P&O algorithm.

Keywords:

Solar energy, photovoltaic cells, maximum power point tracking, particle swarm optimization algorithm, perturb and observe algorithm.

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et abréviations

MPPT : Suivi du point de puissance maximale.
P&O : Méthode de perturbation et observation.
IncCond : Méthode de conductance incrémentale.
PSO : Optimisation par essaim particulaire.
GPV : Générateur photovoltaïque.
DC/DC : Convertisseur continu-continu.
PWM : Modulation de largeur d'impulsion.
V_{co} : Tension à vide (circuit ouvert).
MPP : Point de puissance maximale.
HC : Escalade de colline.
FLC : Contrôleur à logique floue.
ANN : Réseau de neurones artificiels.
PI : Régulateur proportionnel–intégral.
I-V : Courbe intensité–tension

Symboles :

Symbole	Signification
----------------	----------------------

$P_{\max}$	Puissance maximale
V_{opt}	Tension optimale (au point de puissance maximale)
I_{opt}	Courant optimal (au point de puissance maximale)
L	Inductance, en henrys [H][H]
C_{pv}	Capacité du condensateur côté panneau photovoltaïque
C_{dc}	Capacité du condensateur côté sortie (courant continu)
V_{pv}	Tension en sortie du panneau photovoltaïque
I_{pv}	Courant en sortie du panneau photovoltaïque
G	Conductance instantanée

Liste des symboles et abréviations

Symbole	Signification
---------	---------------

ΔG	Incrément de la conductance
V_{co}	Tension à circuit ouvert (Open Circuit Voltage)
k_1	Coefficient de proportion entre V_{co} et V_{opt}
$x_i(t)$	Position de la particule i à l'instant t
$v_i(t)$	Vitesse de la particule i à l'instant t
P_{op-i}	Meilleure position locale de la particule i
P_{op-g}	Meilleure position globale atteinte par l'ensemble de l'essaim
w	Poids d'inertie (Inertia Weight)
c_1, c_2	Coefficients d'accélération
r_1, r_2	Nombres aléatoires dans l'intervalle $[0,1]$
np	Nombre de particules dans l'essaim (taille de la population)

Liste des figures

Liste des figures

Figure I. 1 : Types de rayonnement solaire reçus au [21].	7
Figure I. 2 : Représentation d'une jonction PN sous l'éclairement	8
Figure I. 3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	9
Figure I. 4 : Structure Hiérarchique d'un Système Photovoltaïque	10
Figure I. 5 : Typologie des Cellules Photovoltaïques	11
Figure I. 6 : Schéma équivalent d'une cellule idéale	12
Figure I. 7 : Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	14
Figure I. 8 : Schéma bloc du GPV dans l'environnements MATLAB / SIMULINK	15
Figure I. 9 : Caractéristique I-V d'une cellule PV	16
Figure I. 10 : Caractéristique P-V d'une cellule PV	16
Figure I. 11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule sous la variation de la température.	17
Figure I. 12 : Caractéristique puissance-tension d'une cellule sous la variation de la température.	17
Figure I. 13 : Caractéristique puissance-courant d'une cellule sous la variation de la température.	18
Figure I. 14 : Caractéristique courant-tension d'une cellule sous la variation l'éclairement.	19
Figure I. 15 : Caractéristique courant-tension d'une cellule sous la variation l'éclairement.	19
Figure I. 16 : Caractéristique puissance-courant d'une cellule sous la variation l'éclairement.	20
Figure I. 17 : Caractéristique I (V) d'un module pour divers facteurs de qualité.	21
Figure I. 18 : Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque.	22
Figure II. 1 : Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque avec commande MPPT	
Figure II. 2 : Comportement d'un GPV avec différents types de charges en connexion directe	25
Figure II. 3 : Circuit électrique de base du convertisseur Buck	26
Figure II. 4 : Caractéristiques tension-courant d'un convertisseur Buck	27
Figure II. 5 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur	27
Figure II. 6 : Caractéristique de la tension dans un hacheur boost	28
Figure II. 7 : Circuit électrique de base du convertisseur abaisseur-élevateur	28
Figure II. 8 : Caractéristiques courant-tension du convertisseur abaisseur-élevateur. [40]	29
Figure II. 9 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond	31
Figure II. 10 : Algorithme de la méthode IncCond.	33
Figure II. 11 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).	34
Figure II. 12 : L'algorithme de P&O classique	35
Figure II. 13 : Schéma bloc du système photovoltaïque avec MPPT-P&O dans SIMULINK/MATLAB	37
Figure II. 14 : la variation de l'éclairement	38

Liste des symboles et abréviations

Figure II. 15 :Résultats de simulation de panneau PV avec le convertisseur DC/DC et la charge	38
Figure II. 16 : Courbe de tension de sortie P&O	39
Figure II. 17 :Courbe de courant de sortie P&O.....	39
Figure II. 18 :Courbe de puissance de sortie P&O	40
Figure II. 19 :Courbe de tension de sortie P&O	40
Figure II. 20 :Courbe de courant de sortie P&O	41
Figure II. 21 :Courbe de puissance de sortie P&O.....	41
Figure III. 1 :Groupe de : (A) oiseaux, (B) poissons	
Figure III. 2 : Mouvement de particule.	45
Figure III. 3 :Organigramme de principe de PSO	48
Figure IV. 1 : Schéma bloc du système photovoltaïque avec MPPT-P&O/PSO dans.....	52
Figure IV. 2 : les allures des Tension	53
Figure IV. 3 : les allures des Tension	53
Figure IV. 4 :les allures des puissances	54
Figure IV. 5 : la variation de l'éclairement	54
Figure IV. 6 : Variation de la puissance du panneau PV de commande P S O et P&O	55
Figure IV. 7 :les allures des Tension sous conditions variable.....	55
Figure IV. 8 : les allures des courant sous conditions variable.....	56
Figure IV. 9 : les allures des puissances sous conditions variable	56

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I. 1:Rendement des types de silicium 11

Tableau II. 1 : Paramètres de hacheur boost..... 36

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

Liste des symboles et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

I.1 Introduction : 4

I.2 Historique : 4

I.3 Aperçu de l'énergie solaire : 5

I.4 L'effet photovoltaïque : 5

I.5 Le rayonnement solaire : 6

I.5.1 Types de rayonnement solaire reçus au sol : 6

I.6 La cellule Photovoltaïque : 7

I.6.1 Principe de la conversion photovoltaïque : 8

I.6.2 Types des cellules photovoltaïques : 10

I.7 Les Modules photovoltaïques : 11

I.8 Modélisation de Schéma bloc d'une système GPV : 12

I.8.1 Cas d'une cellule idéale : 12

I.8.2 Cas d'une cellule réelle : 13

I.8.3 Schéma bloc du GPV sous MATLAB : 15

I.9 L'influence de la température et de l'éclairement d'une cellule photovoltaïque : 16

I.9.1 L'influence de la température : 16

I.9.2 L'influence de l'éclairement : 18

I.9.3 Influence du facteur d'idéalité : 20

I.9.3.1 Effets du Facteur d'Idéalité sur les Performances de la Cellule : 20

I.10 Générateur photovoltaïque : 21

I.10.1 Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque : 21

Sommaire

I.11 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque :	22
I.11.1 Avantages :	22
I.11.2 Inconvénients :	23
I.12 Conclusion :	23
CHAPITRE II : ÉTAGE D'ADAPTATION ET TECHNIQUES MPPT CLASSIQUES	
II.1 Introduction :	24
II.2 Étage d'adaptation (DC/DC) :	24
II.2.1 Convertisseur abaisseur (Buck) :	26
II.2.2 Convertisseur élévateur (Boost) :	27
II.2.3 Convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost) :	28
II.3 Les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) :	29
II.4 Techniques MPPT classiques :	30
II.4.1 Méthode de la tension constante :	30
II.4.2 Méthode de l'incrément de la conductance (IncCond) :	31
II.4.3 Méthode de perturbation et observation (P&O) :	34
II.4.3.1 Avantage de la méthode P&O :	36
II.4.3.2 Inconvénients de la méthode P&O :	36
II.5 Implémentation de l'algorithme P&O sous MATLAB :	36
II.5.1 Réalisation de l'algorithme sous forme de fonction :	36
II.5.2 Résultats de simulation :	37
II.6 Conclusion	42
CHAPITRE III : OPTIMISATION PAR ESSAIM PARTICULAIRE (PSO) COMME TECHNIQUE MPPT	
III.1 Introduction :	43
III.2 Historique sur la méthode PSO :	43
III.3 Principe de la méthode PSO :	43
III.4 Application de PSO comme technique MPPT :	45
III.4.1 Formalisation du problème :	45
III.4.2 Adaptation de PSO pour le suivi du point de puissance maximale.....	46
III.5 Conclusion :	48
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION	
IV.1 Introduction :	50
IV.2 Comparaison des performances de P&O et PSO :	50
IV.2.1 Réponse dynamique :	50

Sommaire

IV.2.2 Efficacité sous conditions variables :	50
IV.2.3 Stabilité et vitesse de convergence :	51
IV.3 Résultats de simulation :	51
IV.3.1 Environnement stable :	51
IV.3.2 Fonctionnement de MPPT sous des conditions variables :	54
IV.4 Analyse des résultats :	57
IV.5 Discussion comparative des deux méthodes :	57
IV.6 Conclusion :	58
Conclusion générale	59
Références bibliographiques	62
ANNEXES	68

INTRODUCTION GENERALE

Introduction general

Introduction générale

Depuis quelques années, la production énergétique mondiale et la demande en ressources fossiles représentent un enjeu majeur pour répondre à l'essor démographique et à l'amélioration du niveau de vie. Les sources d'énergie fossiles, comme le pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium, sont largement exploitées, mais leur utilisation intensive entraîne une hausse des émissions de gaz à effet de serre. Cette situation aggrave la pollution et menace la préservation de ces ressources non renouvelables pour les générations futures [1][2].

De nos jours, la communauté scientifique porte une attention particulière aux nouvelles sources d'énergie renouvelables. Celles-ci se distinguent par leur capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution, tout en facilitant l'exploitation de diverses ressources telles que l'éolien décentralisé, l'hydraulique, la géothermie, la biomasse et l'énergie solaire. Ce mémoire se concentrera spécifiquement sur l'énergie solaire photovoltaïque [3].

L'énergie photovoltaïque est directement issue du rayonnement solaire et peut être transformée en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux solaires, constitués de cellules photovoltaïques, convertissent les photons en électrons, produisant ainsi un courant continu utilisable. Les systèmes photovoltaïques (PV) représentent une solution efficace pour générer de l'électricité propre, adaptée aussi bien aux applications autonomes qu'à l'injection sur le réseau électrique [4-5].

Un système photovoltaïque typique comprend un générateur composé de plusieurs modules de cellules solaires et un convertisseur DC-DC statique, qui adapte l'énergie produite pour alimenter une charge. Toutefois, ces systèmes présentent des dynamiques non linéaires influencées par divers facteurs environnementaux, notamment la luminosité, l'ombrage et la température. Ces variations rendent complexe la prévision de la tension et du courant nécessaires pour optimiser la puissance de sortie [6-7].

L'objectif principal de toute recherche dans le domaine photovoltaïque est d'améliorer les performances globales des systèmes de conversion d'énergie solaire. Lorsqu'un générateur photovoltaïque alimente une charge, quelle qu'en soit la nature, cela ne signifie pas forcément que le système est peu rentable. En effet, son efficacité dépend d'un équilibre entre un rendement acceptable et des coûts d'exploitation maîtrisés. Pour optimiser la conversion de l'énergie solaire et garantir une meilleure adaptabilité ainsi qu'un rendement optimal, diverses normes et technologies ont été développées et mises en œuvre.

Introduction general

Parmi ces technologies, on retrouve la technologie MPPT (« Maximum Power Point Tracker » ou « Suivi du point de puissance maximale »). Dans la littérature, les algorithmes de recherche MPPT les plus courants incluent la conductance incrémentale (IC), la méthode de perturbation et observation (P&O) ainsi (Particle Swarm Optimization) -(PSO). Les approches P&O et PSO sont particulièrement prisées pour leur simplicité de mise en œuvre, mais elles peuvent présenter des limites lorsque les conditions météorologiques varient rapidement. Afin d'améliorer les performances des systèmes photovoltaïques, plusieurs contrôleurs ont été proposés, s'appuyant sur des lois adaptatives, l'équilibre énergétique et la théorie de la réflexion. Dans cette optique, nous proposons d'utiliser la stratégie (P&O) ainsi que l'algorithme (PSO) et d'analyser leurs performances comparatives.

En quatre chapitres, le mémoire est organisé comme suit :

Le chapitre 1 présente des informations générales sur les systèmes photovoltaïques et à quelques idées générales et fondamentales sur l'énergie solaire. Nous mentionnons ses applications dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, puis nous expliquons la composition des panneaux solaires, le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques qu'ils contiennent, leurs différents types, leur structure de fonctionnement et leur modélisation.

Nous mentionnons ensuite l'effet des facteurs et conditions externes (météorologiques) tels que la température et l'éclairage sur le générateur photovoltaïque ainsi que ses caractéristiques.

Nous combinons le chapitre avec les avantages et les inconvénients de l'installation de panneaux photovoltaïques.

Le chapitre 2 sera consacré à l'étude des différents convertisseurs statiques (DC-DC) utilisés dans les systèmes de conversion photovoltaïques, ensuite nous allons présenter les algorithmes classiques de recherche du MPPT les plus utilisées à savoir l'incrémentale (IC) et la perturbation et observation (P&O), avec contrôle MPPT (P&O) sur MATLAB SIMULINK.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'algorithme PSO comme méthode intelligente de suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. Le principe de fonctionnement de l'algorithme ainsi que son adaptation au système PV sont présentés, suivi de son application à l'optimisation des performances d'un contrôleur MPPT flou. Enfin, une analyse des résultats de simulation met en évidence

Introduction general

l'efficacité de la méthode PSO en termes de précision, de rapidité de réponse et de capacité d'adaptation aux variations des conditions environnementales.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats et à leur discussion. Il propose une comparaison approfondie entre les deux algorithmes MPPT : P&O et PSO, en termes de performances dans un système photovoltaïque.

Chapitre I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

I.1 Introduction :

Le soleil est une source d'énergie renouvelable, produisant chaque année un rayonnement 8400 fois plus important que celui dont l'humanité a besoin. Le rayonnement se trouve à une intensité de 1 000 W/m² dans les zones tempérées et il peut s'approcher jusqu'à 1080 W/m² avec l'effet de pollution lumineuse atmosphérique, même s'il est dégradé au passage de l'atmosphère [8].

Les GVP permettent de convertir directement l'énergie solaire en électricité grâce aux cellules solaires, d'habitude réalisées à partir de semi-conducteurs. Les en brancher en série ou en parallèle, on dispose d'un module photovoltaïque [8].

Cette énergie est réfléchie, durable, ne nécessite pas d'entretien et est respectueuse de l'environnement. Elle s'adapte à une gamme large d'applications, de quelques fractions de watt à des plusieurs mégawatts. En outre, la plupart des unités sur le marché sont dotées d'une garantie de plus de 20 ans et de manière efficace, ils fonctionnent bien au-delà de cette période [9].

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les principes fondamentaux du rayonnement solaire, la structure d'une cellule photovoltaïque et son mode de fonctionnement. Nous aborderons ensuite l'impact des conditions météorologiques sur les modules solaires ainsi que les avantages et les limites de l'installation de panneaux photovoltaïques.

I.2 Historique :

L'effet photovoltaïque a été découvert au 19^e siècle. En 1839, le physicien français Alexandre Edmond Becquerel [10] a observé que certains matériaux, sous l'influence de la lumière, génèrent une faible quantité de courant électrique, découvrant ainsi la capacité de convertir la lumière en électricité.

Plus tard, divers scientifiques, dont Charles Fritz, Edward Weston, Nikola Tesla et Albert Einstein, ont poursuivi ces études. Ce dernier a même reçu le prix Nobel de physique en 1921 pour ses travaux sur l'effet photoélectrique, démontrant que la lumière possède non seulement une nature ondulatoire, mais aussi une transmission d'énergie sous forme de photons [11][12].

Le développement de l'industrie des semi-conducteurs, à partir des années 1950, a facilité l'émergence des cellules solaires [13]. Ce n'est cependant qu'à partir des années 1970 que les industriels ont commencé à investir dans cette technologie [14]. Les tentatives de réduction des coûts de production ont ensuite ouvert la voie à la popularisation de l'énergie photovoltaïque. L'Université du Delaware a construit la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques en 1973 [14].

Depuis les années 1980, l'industrie photovoltaïque continue de se développer, permettant la construction de centrales électriques de plusieurs mégawatts [15]. Aujourd'hui, cette source d'énergie connaît une croissance spectaculaire, notamment grâce à son intégration croissante dans divers produits du quotidien [16].

I.3 Aperçu de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable, au même titre que l'énergie éolienne ou marémotrice. Sa matière première est le soleil. Les rayons du soleil sont convertis soit en électricité via des panneaux photovoltaïques, soit en chaleur via des panneaux solaires thermiques [17].

L'expression « énergie solaire » est également utilisée pour désigner l'électricité ou la chaleur produite à partir du rayonnement solaire, qui constitue une source d'énergie primaire. L'électricité produite peut être utilisée pour l'éclairage ou le fonctionnement des équipements ménagers, alors que la chaleur sert au chauffage et à la production d'eau chaude sanitaire. La particularité de l'énergie solaire, c'est qu'elle est très peu émettrice de gaz à effet de serre, ce qui en fait un allié intéressant de la transition énergétique [17].

Il existe trois types d'énergie solaire : l'énergie photovoltaïque, l'énergie thermique et l'énergie thermodynamique [17].

I.4 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque correspond à la transformation de l'énergie solaire, émise sous forme de photons, en électricité grâce à des dispositifs semi-conducteurs appelés cellules solaires [18].

Ce phénomène ne peut se produire qu'en présence d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur exposé à la lumière. Une telle barrière se forme, par exemple, à l'interface entre

deux régions de matériau présentant des dopages différents. Il s'agit d'introduire deux types distincts d'impuretés en concentrations variables, comme dans le cas du dopage de type P-N. Lorsque la lumière frappe ce matériau, les charges générées par l'effet photoélectrique sont séparées de part et d'autre de la barrière, créant une répartition des charges positives et négatives [9].

Les principaux matériaux semi-conducteurs utilisés dans ce domaine incluent le silicium, le germanium, le sulfure de gallium et l'arséniure de gallium [19].

I.5 Le rayonnement solaire :

Bien que la distance entre le Soleil et la Terre soit de 150,106 kilomètres, les différentes couches terrestres continuent de recevoir une quantité considérable d'énergie, estimée à 180,106 GW. Cette énergie est émise par la surface du Soleil sous forme de rayonnement électromagnétique, dont la longueur d'onde varie de 0,22 à 10 μm [20]. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se répartit globalement comme suit :

- Ultraviolet ($< 0,4 \mu\text{m}$) : 3–5 %
- Lumière visible ($0,4 - 0,7 \mu\text{m}$) : 42
- Infrarouge ($> 0,7 \mu\text{m}$) : 52–55 %

I.5.1 Types de rayonnement solaire reçus au sol :

▪ Le rayonnement direct :

Ces rayons, provenant directement du Soleil sans subir de diffusion atmosphérique, restent parallèles entre eux. Ils produisent ainsi une ombre nette, pouvant être focalisée à l'aide d'un miroir. L'intensité de cette radiation peut être mesurée à l'aide d'un pyranomètre [21].

▪ Le rayonnement diffus :

Il est composé de lumière diffusée par l'atmosphère, notamment par l'air, les nuages et les aérosols. La diffusion est un phénomène par lequel un faisceau lumineux initialement parallèle se disperse en plusieurs rayons voyageant dans différentes directions. Dans le ciel, les molécules d'air, les gouttelettes d'eau des nuages et les particules de poussière contribuent à cette dispersion des rayons solaires. Ce processus dépend principalement des conditions météorologiques [21].

▪ Le rayonnement solaire réfléchi :

L'albédo du sol correspond au rayonnement réfléchi par la surface terrestre ou par les objets qui s'y trouvent. Il peut être particulièrement élevé lorsque le sol est très réfléchissant, comme dans le cas de l'eau ou de la neige [21].

▪ Le rayonnement global :

Il s'agit de la somme de tous les rayonnements reçus, y compris celui réfléchi par le sol et les objets à sa surface. Ces mesures sont réalisées à l'aide d'un pyranomètre ou d'un héliomètre sans écran [21].

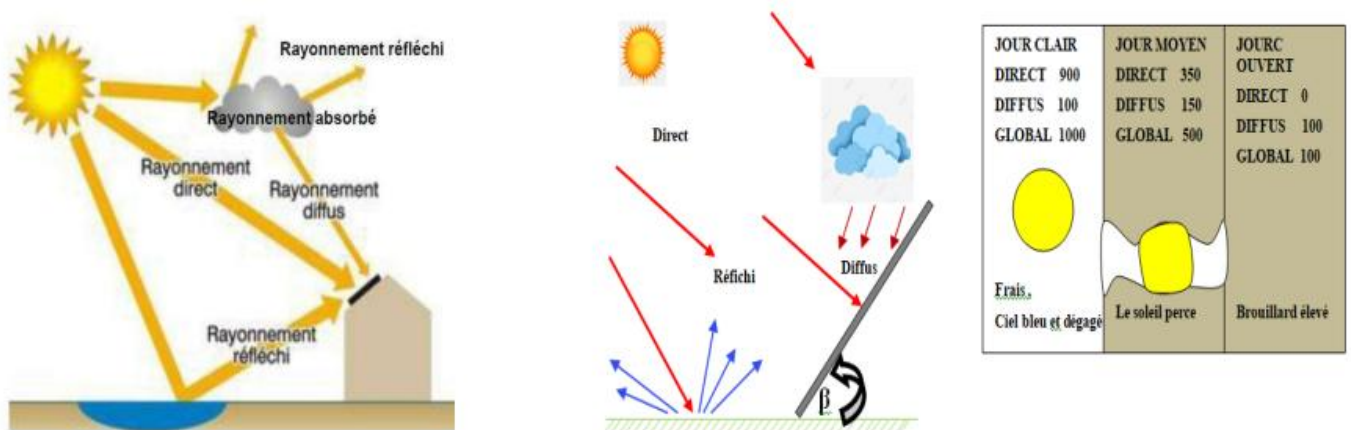


Figure I. 1 : Types de rayonnement solaire reçus au [21].

I.6 La cellule Photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un composant de base qui convertit l'énergie solaire en électricité par effet photoélectrique. La tension à vide (V_{oc}) se situe généralement entre 0,65 et 0,76 V pour les cellules cristallines.[22] [23]

Le courant de court-circuit (I_{sc}) dépend de l'intensité du rayonnement solaire.[24]

Structure physique de la jonction P-N

- **Région N** : Excès d'électrons → Charge négative
- **Région P** : Excès de trous → Charge positive

La jonction PN génère un champ électrique interne qui sépare les charges créées par l'absorption des photons. Générant un champ électrique qui sépare les charges. Des contacts métalliques en grille sont ensuite déposés à l'avant et à l'arrière pour collecter le courant [25].

Une cellule photovoltaïque est un composant capable de convertir la lumière du soleil en électricité. Ce processus repose sur trois mécanismes fondamentaux [26] :

- Capture des photons par le matériau constituant la cellule.
- Transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique, entraînant la génération de paires électron-trou dans le semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau formant la cellule photovoltaïque doit avoir deux niveaux d'énergie distincts et une conductivité suffisante pour assurer la circulation du courant, ce qui explique l'utilisation des semi-conducteurs.

Pour récupérer les particules générées, un champ électrique est indispensable afin de séparer les paires électron-trou formées. À cette fin, une jonction PN est généralement employée (Figure I.2).

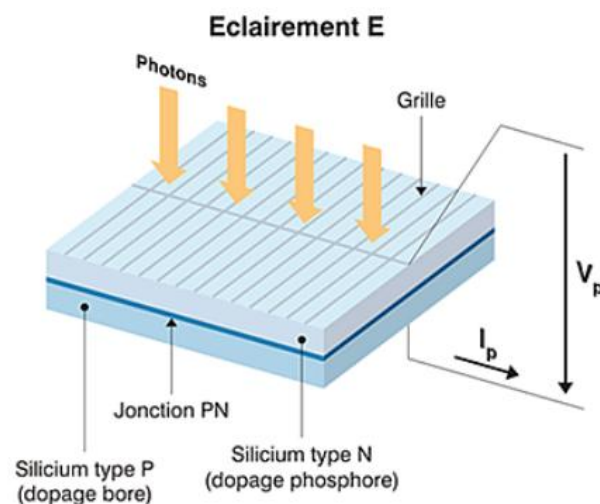


Figure I. 2 : Représentation d'une jonction PN sous l'éclairement

I.6.1 Principe de la conversion photovoltaïque :

Les cellules solaires exploitent l'effet photovoltaïque pour produire et déplacer des charges électriques positives et négatives au sein de matériaux semi-conducteurs sous l'action de la lumière, transformant ainsi directement l'énergie solaire en électricité. Ce semi-conducteur se compose de deux zones distinctes : l'une enrichie en électrons et l'autre en déficit d'électrons, appelées respectivement dopage N et dopage P. Lorsqu'ils sont mis en contact, les

électrons excédentaires du matériau de type N migrent vers le matériau de type P par diffusion [21].

Les zones initialement dopées de type N portent une charge positive, tandis que celles dopées de type P sont chargées négativement. Cela engendre un champ électrique entre elles, entraînant le déplacement des électrons vers la région N et des trous vers la région P, formant ainsi une jonction PN [26].

L'ajout de contacts métalliques aux régions N et P permet de constituer une diode. Lorsque le matériau est exposé à la lumière, un photon dont l'énergie est au moins égale à la largeur de la bande interdite transfère son énergie à un atome. Ce phénomène provoque l'excitation d'un électron, qui passe de la bande de valence à la bande de conduction, laissant derrière lui un trou mobile et générant une paire électron-trou.

Lorsqu'une charge est appliquée aux bornes d'une batterie, les électrons de la région N circulent vers la région P en passant par un circuit externe, où ils se recombinent avec les trous. Cette circulation génère une différence de potentiel, permettant ainsi au courant électrique de s'établir [21].

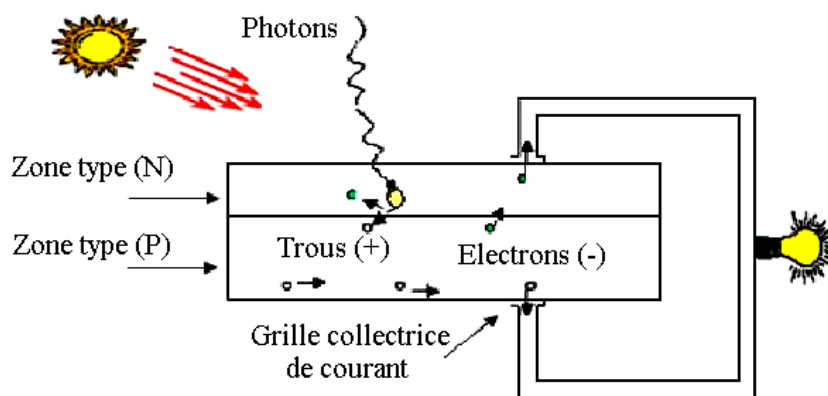


Figure I. 3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Un ensemble de cellules constitue un panneau solaire, et plusieurs modules assemblés forment un générateur solaire. Ces modules peuvent être connectés entre eux en série ou en parallèle pour optimiser la production d'énergie.

Dans le domaine du photovoltaïque, la connexion en parallèle est une méthode utilisée pour accroître la puissance du système. Un module solaire, lorsqu'il est relié à un récepteur,

fonctionne grâce à l'énergie solaire. Ce système s'accompagne généralement de dispositifs de protection, de régulateurs, de systèmes de stockage d'énergie (batteries), ainsi que d'appareils de contrôle et de mesure, et d'un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif [27].

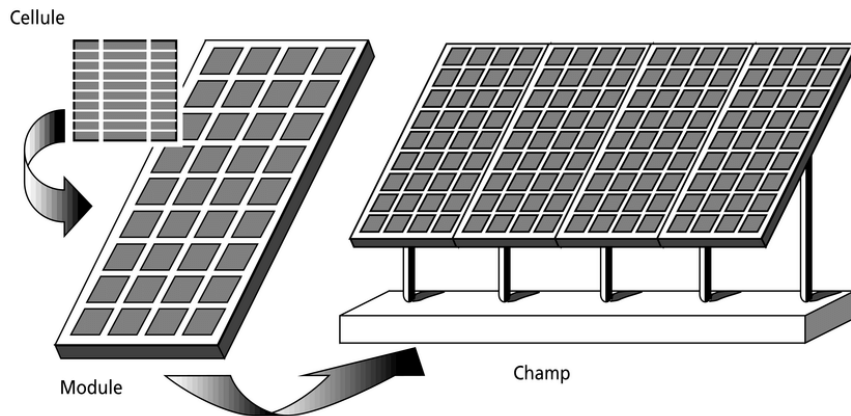


Figure I. 4 : Structure Hiérarchique d'un Système Photovoltaïque

I.6.2 Types des cellules photovoltaïques :

Il existe plusieurs types de cellules solaires en silicium, le matériau semi-conducteur le plus couramment utilisé dans leur fabrication [28]. Ces cellules se distinguent principalement par leur rendement énergétique et leur coût de production, qui varient en fonction de leur technologie et de leur conception.

- **Cellules amorphes :**

Les cellules amorphes ne possèdent pas de structure cristalline. Leur productivité et leur efficacité sont moindres par rapport aux autres types, ce qui entraîne un faible rendement. Elles sont principalement employées dans des produits de consommation courante, comme les calculatrices solaires (Figure I.9) (c).

- **Cellules monocristallines :**

Les cellules les plus performantes incluent celles en silicium monocristallin, qui présentent le rendement de conversion le plus élevé (Figure I.9) (a).

▪ Cellules polycristallines :

La conception des cellules en silicium polycristallin est plus simple que celle des autres types de cellules. Elles offrent des coûts de fabrication plus bas, mais leur rendement est également moindre (Figure I.9) (b).

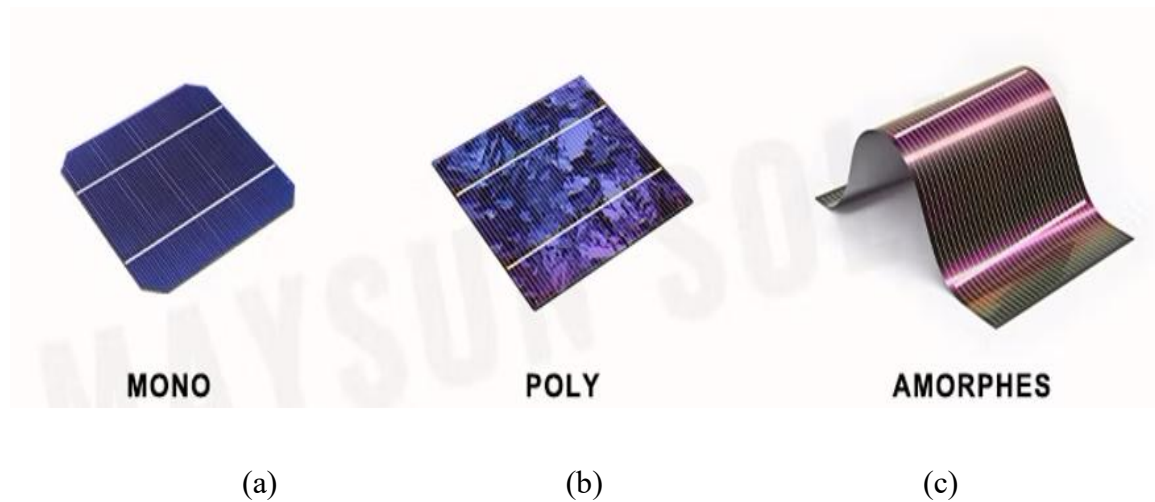


Figure I. 5 : Typologie des Cellules Photovoltaïques

Types	Monocristallin	Polycristallin	Amorphe
Rendement	13 à 17%	11 à 15%	6 à 10%

Tableau I. 1:Rendement des types de silicium

I.7 Les Modules photovoltaïques :

Un module photovoltaïque est un assemblage de cellules de base interconnectées, dont certaines forment des chaînes prêtes à l'emploi. Il assure deux fonctions principales :

La première consiste à organiser les cellules de manière à obtenir les caractéristiques courant-tension adaptées à l'application visée. Les modules peuvent être connectés en série pour augmenter la tension de fonctionnement ou en parallèle pour accroître le courant.

La seconde fonction est de protéger les cellules contre les agressions extérieures et d'allonger leur durée de vie. Pour cela, la chaîne cellulaire est encapsulée dans de l'EVA (éthylène-acétate de vinyle), ce qui la protège des rayons UV et de l'humidité. La face avant du module est recouverte d'un verre trempé offrant une transmission lumineuse élevée et une bonne résistance mécanique, tandis que la face arrière est protégée par un film en Tedlar ou en polyéthylène. Enfin, l'ensemble est intégré dans un cadre métallique robuste, garantissant une stabilité mécanique optimale [21].

I.8 Modélisation de Schéma bloc d'une système GPV :

Une cellule photovoltaïque constitue une source d'énergie non linéaire, dont le courant et la tension de sortie varient en fonction de l'éclairement solaire E et de la température T . Ainsi, la prévision des performances d'une cellule photovoltaïque requiert l'élaboration d'un modèle mathématique permettant d'analyser son comportement sous différentes conditions météorologiques (luminosité, température). De nombreuses recherches se concentrent sur le développement de modèles mathématiques destinés à simuler les caractéristiques courant-tension (I , V) des cellules photovoltaïques [29][30]. Dans cette section, nous examinerons quelques modèles de cellules photovoltaïques issus de la littérature existante, avant de détailler les ajustements apportés au modèle de batterie afin de mieux représenter la relation courant-tension d'un générateur photovoltaïque.

I.8.1 Cas d'une cellule idéale :

Dans des conditions idéales, une cellule photovoltaïque basée sur une jonction PN exposée à l'éclairement solaire et connectée à une charge peut être modélisée par un générateur de courant I_{ph} $I_t = \frac{NkT}{q}$ en parallèle avec une diode. Celle-ci délivre un courant conformément au schéma illustré par (Figure I.6), représentant le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [31].

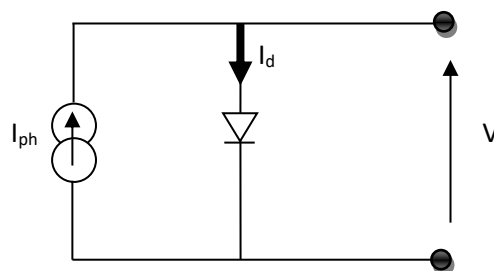


Figure I. 6 : Schéma équivalent d'une cellule idéale

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (I.1)$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{cc} avec $V_{pv}=0$, courant de court-circuit obtenu en court ci cuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{cc} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (I.2)$$

E : L'éclairement absorbé par la cellule

E_{ref} : L'éclairement de référence (1000 w/m²)

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.3)$$

I_d : Le courant circulant dans la diode.

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

$$I_t = \frac{NkT}{q} \quad (I.4)$$

N : Facteur d'idéalité de la photopile

K : Constant de Boltzmann (1,38.10⁻²³J/K)

q : Charge de l'électron (1,6.10⁻¹⁹C)

I.8.2 Cas d'une cellule réelle :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle prend en compte les effets résistifs parasites dus au processus de fabrication, comme illustré sur (Figure I.1). Ce schéma est composé d'une diode d représentant la jonction, d'une source de courant I_{ph} décrivant le photo-courant, d'une résistance série R_s traduisant les pertes par effet Joule, ainsi que d'une résistance shunt R_{sh} représentant le courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière, généralement bien plus élevée que R_s [32].

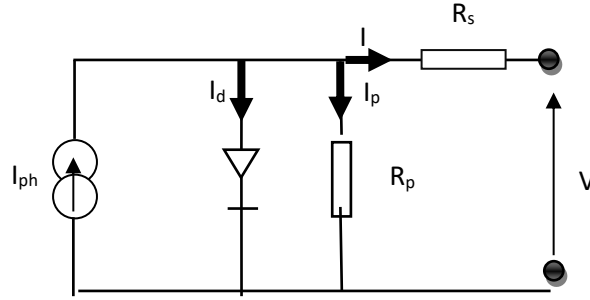


Figure I. 7 : Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Dans notre étude, nous avons adopté le modèle mathématique à exponentiel simple pour représenter le module solaire.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.5)$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.6)$$

$$I_0 = I_{0r} \left(\left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{E_g}{B_k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} - 1 \right) \quad (I.7)$$

T : Température de la jonction des cellules PV [°K]

T_n : Température de référence des cellules PV [°K]

n : facteur d'idéalité de la jonction

E_g : Énergie de gap [ev]

V_{pv} : La tension de sortie

I_p : Le courant circulant dans la résistance parallèle R_p

R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

En substituant les équations (I.6 ; I.7) dans l'équation (I.5) le courant I_{pv} devient Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{v_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t}} - 1 \right] - \frac{v_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t} \quad (I.8)$$

I.8.3 Schéma bloc du GPV sous MATLAB :

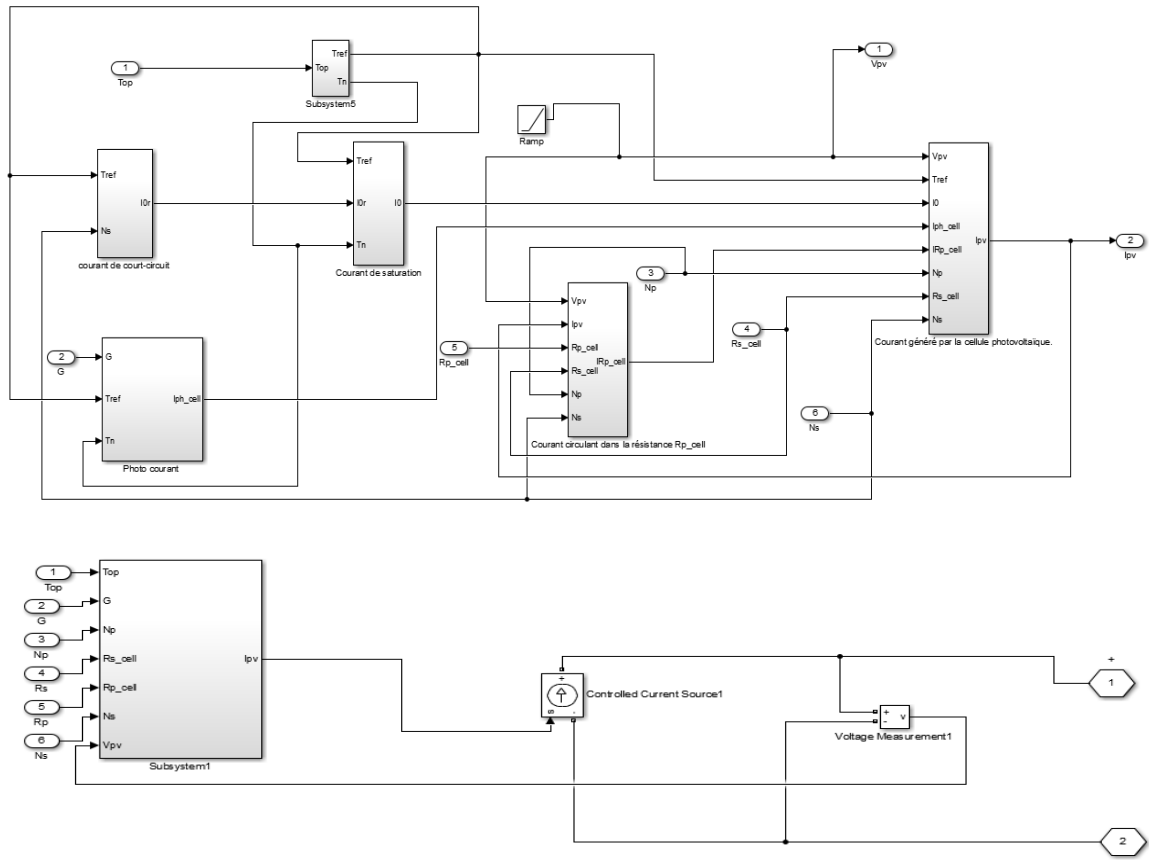


Figure I. 8 : Schéma bloc du GPV dans l'environnements MATLAB / SIMULINK

Les (figures I.10 et I.11) mettent en évidence les caractéristiques non linéaires d'une cellule photovoltaïque pour un éclairement et une température donnée.

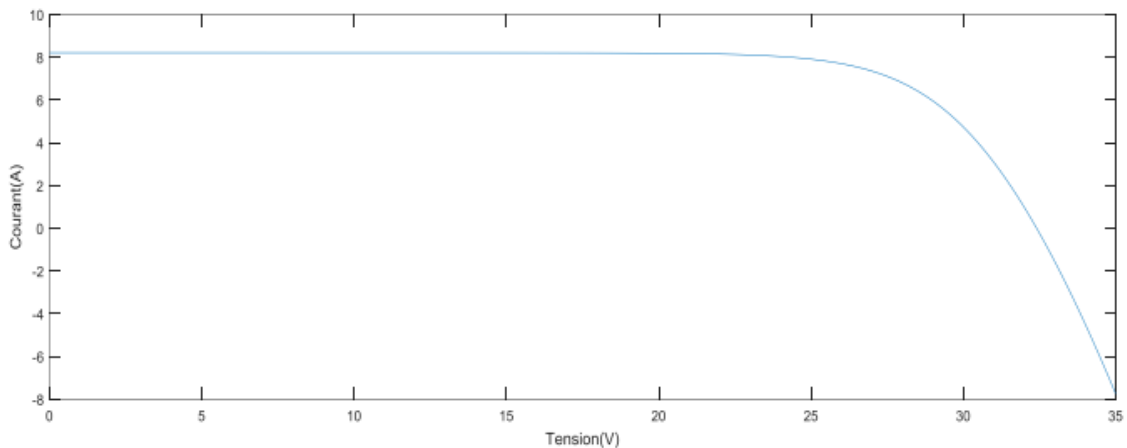


Figure I. 9 : Caractéristique I-V d'une cellule PV

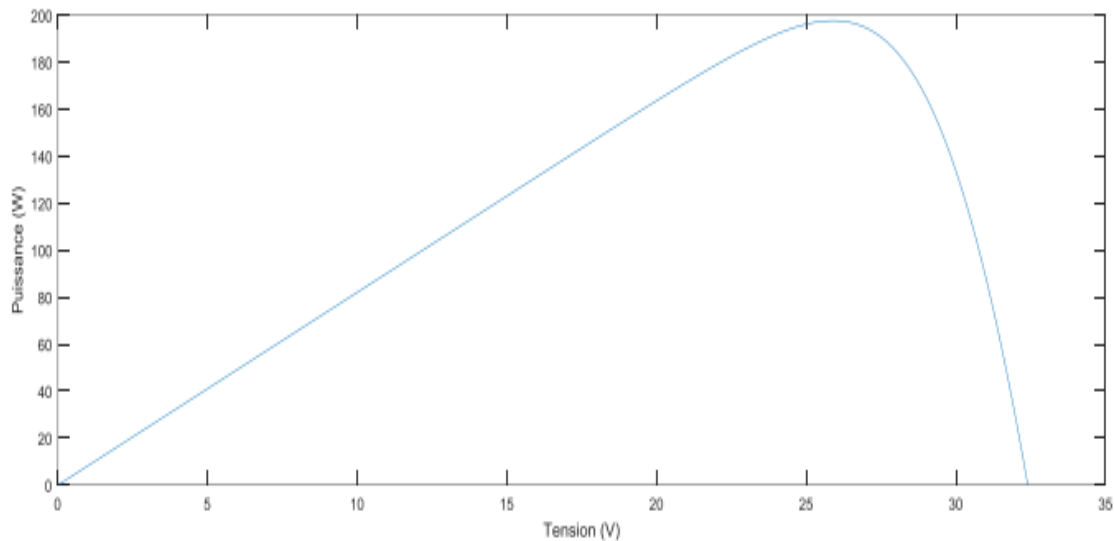


Figure I. 10 : Caractéristique P-V d'une cellule PV

I.9 L'influence de la température et de l'éclairement d'une cellule photovoltaïque :

I.9.1 L'influence de la température :

L'influence de la température est un facteur clé dans la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques. En effet, les cellules étant exposées au rayonnement solaire, elles subissent un échauffement. De plus, une partie de l'énergie absorbée n'étant pas convertie en électricité, elle se dissipe sous forme de chaleur. Ainsi, la température de la cellule (T_c) est systématiquement plus élevée que la température ambiante (T_a).

$$T_c = T_a + E_m/800 (T_U - 20) \quad (I.9)$$

La (Figure I.12) illustre la diminution significative de la tension d'une cellule photovoltaïque avec l'élévation de la température. Plus la température augmente, plus les performances de la cellule se dégradent. En revanche, le courant connaît une légère augmentation en intensité, bien que cet effet demeure négligeable au point de puissance maximale [33].

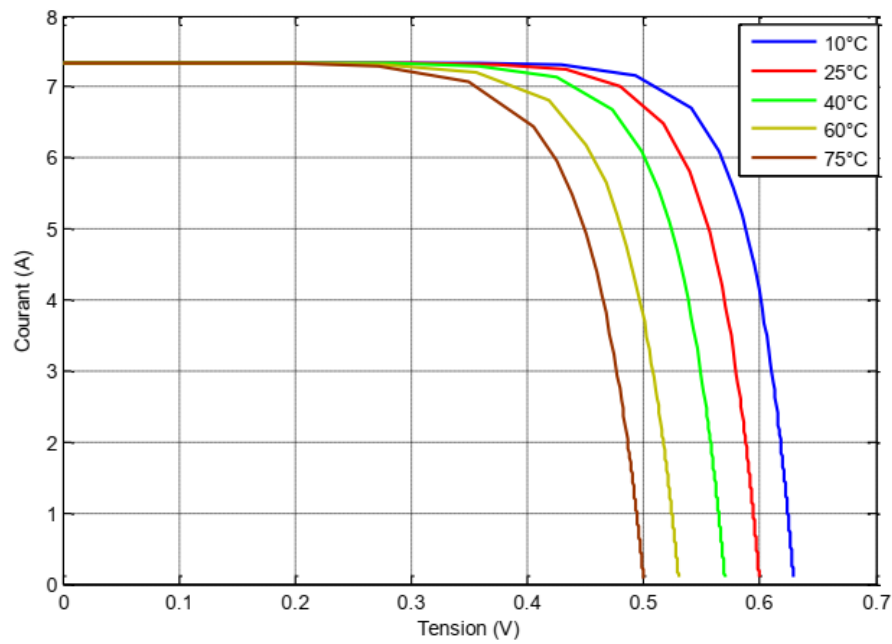


Figure I. 11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule sous la variation de la température.

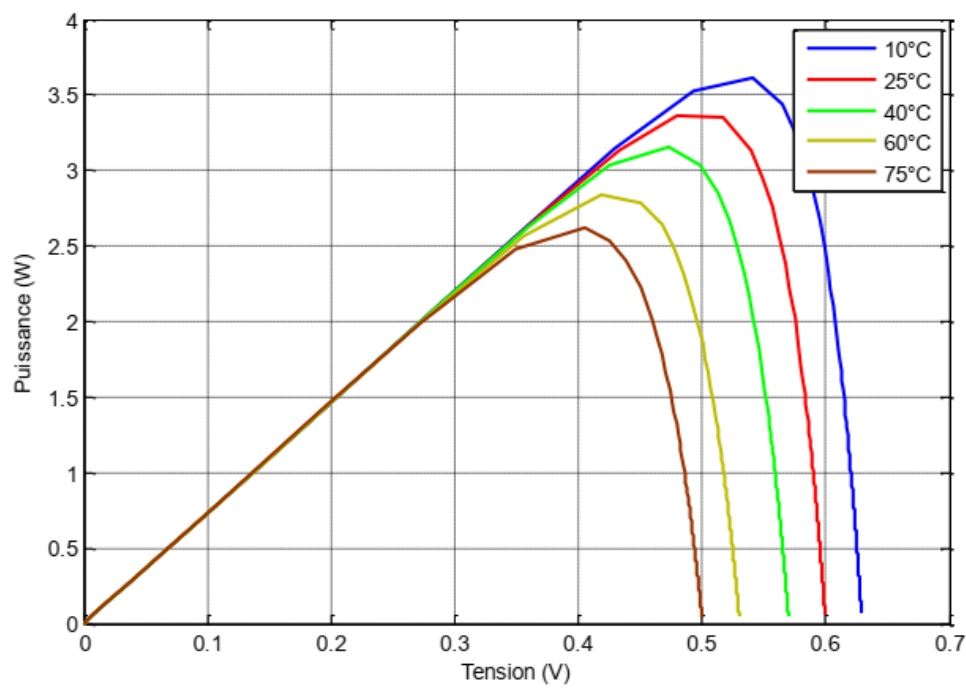


Figure I. 12 : Caractéristique puissance-tension d'une cellule sous la variation de la température.

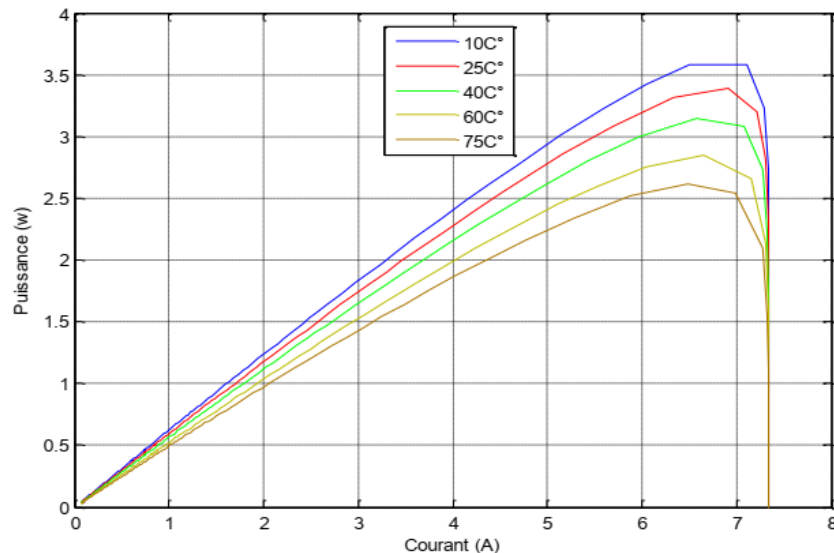


Figure I. 13 : Caractéristique puissance-courant d'une cellule sous la variation de la température.

L'interprétation des résultats:

(Figure I.12) : À mesure que la température augmente, la tension de sortie chute fortement. Cela est dû au faible potentiel de diffusion des porteurs de charge dans la cellule.

(Figure I.13) : Le courant augmente légèrement avec la température car le flux de photons reste constant, mais cet effet est faible et peut être négligé au point d'énergie maximale.

(Figure I.14) : La puissance maximale diminue avec la température en raison de la chute de tension. Le point de puissance maximale se déplace vers une tension inférieure.

Résultat : La température dégrade les performances des cellules photovoltaïques, principalement par chute de tension, ce qui entraîne une puissance de sortie plus faible, malgré un courant légèrement plus élevé. La gestion thermique est donc essentielle dans la conception des systèmes photovoltaïques.

I.9.2 L'influence de l'éclairement :

L'énergie électrique générée par une cellule dépend de l'intensité de l'éclairement reçu sur sa surface. La figure (I.14) illustre la relation entre le courant et la tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, en maintenant une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. On observe que le courant est proportionnel à l'intensité du rayonnement, tandis que la tension varie très peu en réponse aux changements d'éclairement.

En plus des courbes représentant la relation entre la puissance et la tension ainsi que la puissance et le courant en fonction d'éclairement, dans les figures (I.15), (I.16)

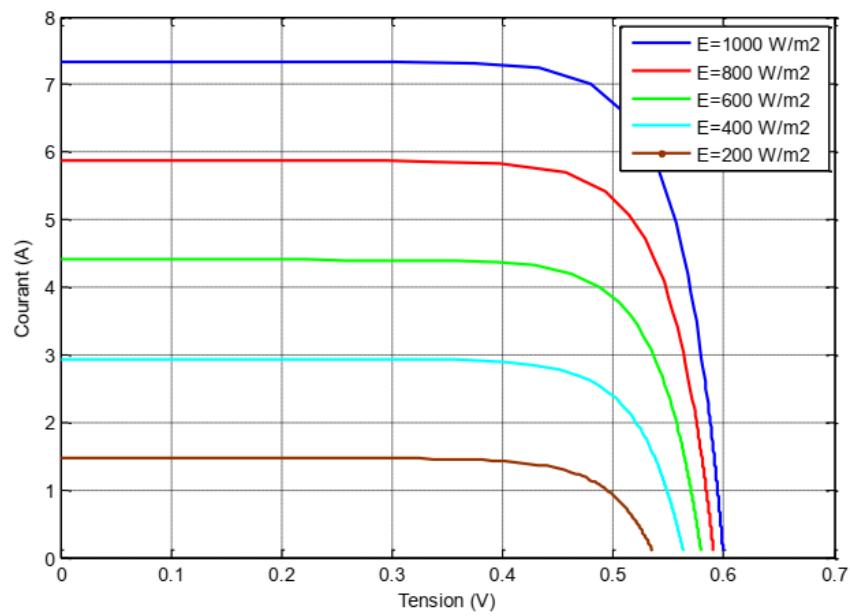


Figure I. 14 : Caractéristique courant-tension d'une cellule sous la variation l'éclairement

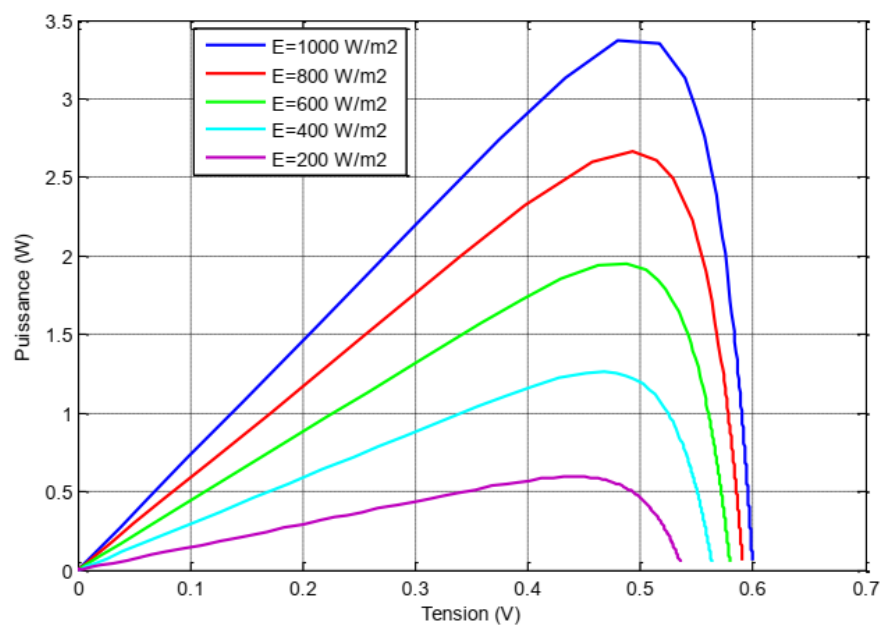


Figure I. 15 : Caractéristique courant-tension d'une cellule sous la variation l'éclairement

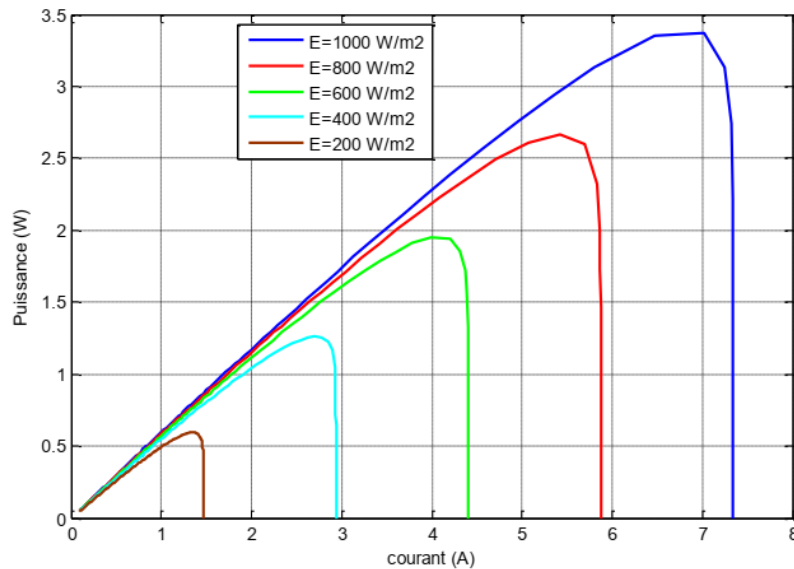


Figure I. 16 : Caractéristique puissance-courant d'une cellule sous la variation l'éclairement

L'interprétation des résultats:

(Figure I.14) : Le courant augmente proportionnellement à l'éclairage, car davantage de photons génèrent davantage de paires électron-trou. En revanche, le potentiel électrique varie légèrement, car il dépend principalement de la température et des propriétés internes de la cellule.

(Figures I.15 et I.16) : La puissance maximale augmente avec l'éclairage, car elle est le produit d'un courant plus élevé à une tension presque constante. Le point de puissance maximale se déplace vers des valeurs de courant plus élevées, mais la tension reste à peu près stable.

Résultat : l'éclairage a un fort effet sur le courant (et donc la puissance), mais peu d'effet sur la tension. Une exposition accrue au soleil augmente directement la production d'énergie dans la cellule.

I.9.3 Influence du facteur d'idéalité :

Le facteur d'idéalité (n) d'une cellule photovoltaïque est un paramètre clé qui reflète la qualité des jonctions et des mécanismes de recombinaison des porteurs de charge. Il influence directement les performances de la cellule, notamment la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le rendement de conversion et la réponse aux conditions d'illumination et de température.

I.9.3.1 Effets du Facteur d'Idéalité sur les Performances de la Cellule :

Influence sur la tension en circuit ouvert (V_{oc}) : Une augmentation du facteur d'idéalité réduit V_{oc} , ce qui dégrade l'efficacité de la cellule.

Impact sur le courant de court-circuit (I_{sc}) : Bien que le facteur d'idéalité affecte surtout V_{oc} , une augmentation importante peut aussi impacter I_{sc} , notamment en présence de recombinaisons en volume.

Effet sur le rendement global : Un facteur d'idéalité élevé est souvent corrélé à une augmentation des pertes par recombinaison, réduisant ainsi l'efficacité de la cellule [36].

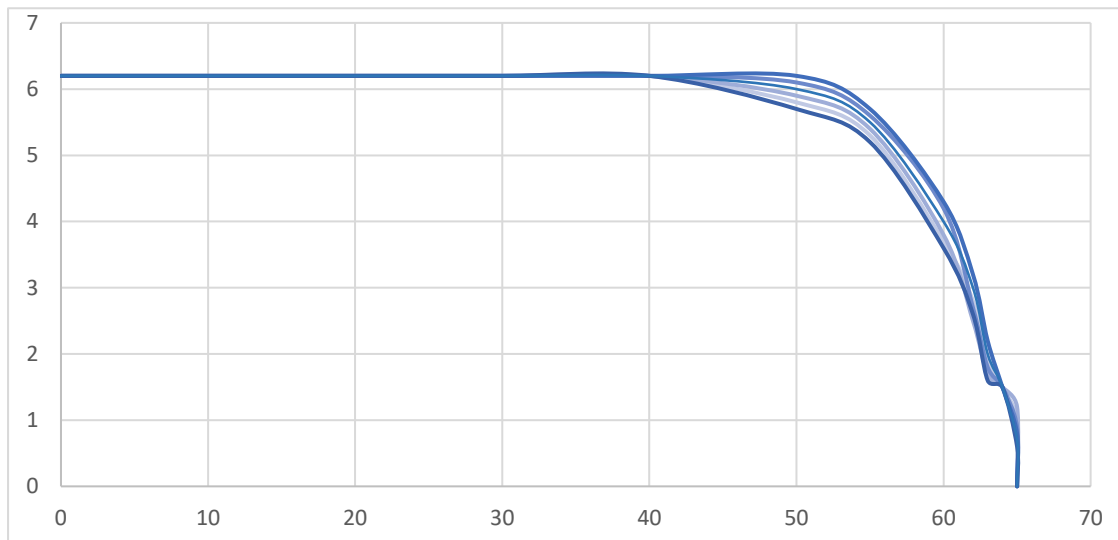


Figure I. 17 : Caractéristique I (V) d'un module pour divers facteurs de qualité

I.10 Générateur photovoltaïque :

Les cellules solaires sont généralement connectées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre afin de former un module photovoltaïque. Un générateur PV est composé de plusieurs modules interconnectés, constituant ainsi une unité capable de produire une puissance continue élevée, adaptée aux équipements électriques courants. Afin d'augmenter la tension et l'intensité en sortie du générateur, les modules PV sont généralement assemblés en configuration série-parallèle. Ces modules interconnectés sont fixés sur des supports métalliques et inclinés selon un angle optimal déterminé en fonction de l'emplacement géographique. L'ensemble ainsi formé est couramment appelé champ de modules [38].

I.10.1 Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque :

Les générateurs photovoltaïques ont des caractéristiques courant-tension non linéaires et ont un point Puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairage et température. Par conséquent, le point de fonctionnement du générateur PV peut varier entre

ces points Correspond aux valeurs extrêmes du courant de court-circuit et de la tension à vide. Le module est composé de 54 cellules monocristallines connectées en série ($N_s=54$). Rappelons que ces paramètres sont donnés pour des conditions de référence, soit $G_{ref}=1000 \text{ W/m}^2$ et $T_{ref}=25^\circ\text{C}$ [21].

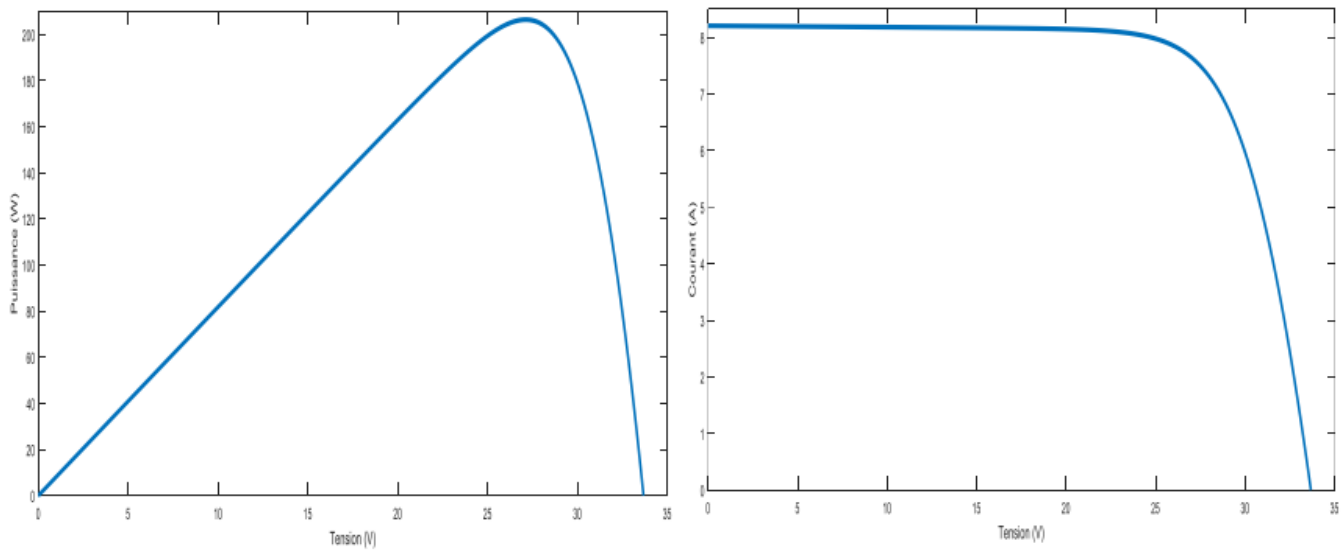


Figure I. 18 : Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque

I.11 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque :

I.11.1 Avantages :

- Énergie renouvelable : Exploite une source inépuisable, le soleil.
- Réduction des factures d'électricité : Permet de produire et consommer sa propre énergie.
- Rentabilité à long terme : L'investissement est amorti en plusieurs années grâce aux économies et aux aides financières.
- Faible entretien : Nécessite peu d'entretien, principalement un nettoyage périodique.
- Impact écologique réduit : Diminue l'empreinte carbone et limite l'utilisation des énergies fossiles.
- Indépendance énergétique : Réduit la dépendance aux fournisseurs d'électricité et aux fluctuations des prix de l'énergie.
- Valorisation immobilière : Peut augmenter la valeur d'un bien immobilier.

- Possibilité de revente de surplus : Permet de revendre l'électricité non consommée à un fournisseur.

I.11.2 Inconvénients :

- Coût initial élevé : Investissement de départ important pour l'achat et l'installation.
- Dépendance à l'ensoleillement : Production variable selon la météo et la saison.
- Baisse de rendement avec le temps : Efficacité des panneaux diminue légèrement au fil des années.
- Stockage de l'énergie coûteux : Les batteries solaires restent chères et ont une durée de vie limitée.
- Espace nécessaire : Nécessite une surface de toiture suffisante et bien orientée.
- Impact environnemental des panneaux : Leur fabrication et leur recyclage nécessitent des ressources et de l'énergie.
- Autorisation et réglementation : Certaines installations peuvent être soumises à des démarches administratives complexes.

I.12 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous présentons le principe des cellules photovoltaïques, leur mode de fonctionnement ainsi que quelques notions générales sur l'énergie solaire.

Enfin, nous soulignons que des études récentes ont mis en évidence l'influence majeure de l'intensité lumineuse et de la température sur la production d'énergie maximale. En effet, les cellules photovoltaïques ne peuvent générer qu'une quantité d'énergie maximale déterminée par la tension, le courant et la puissance.

CHAPITRE II : ÉTAGE D'ADAPTATION ET TECHNIQUES MPPT CLASSIQUES

II.1 Introduction :

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner avec une large plage de tensions et de courants, mais il n'atteint sa puissance maximale que pour des valeurs bien précises de ces deux grandeurs. En effet, la courbe caractéristique $I(V)$ du générateur dépend à la fois de l'ensoleillement et de la température. Ces conditions climatiques variables provoquent des fluctuations du point de puissance maximale.

Pour compenser ces variations, on insère généralement entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés, capables d'ajuster en permanence le fonctionnement au point de puissance optimale. Ces dispositifs, appelés MPPT (Maximum Power Point Tracking), assurent le couplage entre le générateur photovoltaïque et le récepteur en contraignant le premier à fournir sa puissance maximale.

II.2 Étage d'adaptation (DC/DC) :

Les générateurs photovoltaïques présentent une caractéristique courant-tension ($I-V$) non linéaire, fortement influencée par le niveau d'ensoleillement et la température des cellules. Par ailleurs, selon la charge connectée au générateur, un écart significatif peut apparaître entre la puissance maximale que celui-ci pourrait fournir et la puissance réellement transmise à la charge lorsqu'il est en mode de connexion directe.

Pour extraire en permanence la puissance maximale disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et la transférer efficacement à la charge, on utilise généralement une étape d'adaptation entre le générateur PV et la charge, comme illustré à la (Figure II.1).

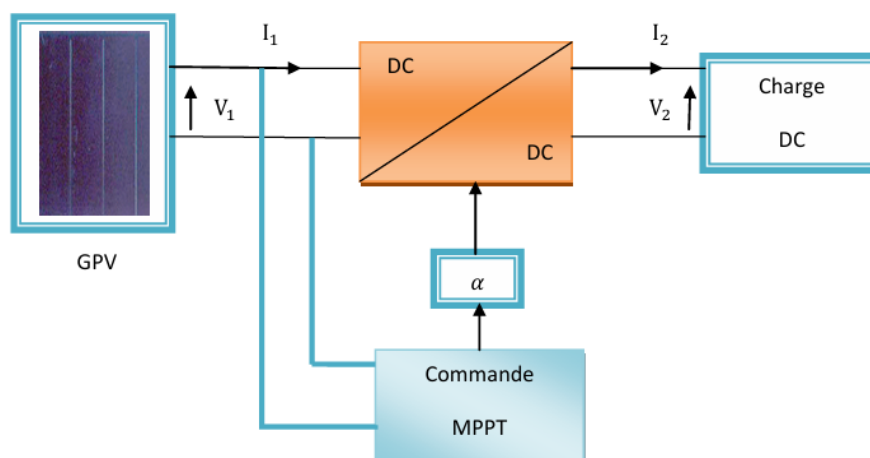


Figure II. 1 :Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque avec commande MPPT

Cette phase fait office d'interface entre le chargeur et le générateur, en se concentrant sur le transfert de la puissance produite par le générateur vers la charge, à l'aide d'une commande. Cette commande est assurée par un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui met à jour en temps réel le point de fonctionnement du générateur afin d'en extraire la puissance maximale.

❖ Fonctionnement d'un GPV en connexion directe:

permet au générateur de fonctionner à sa puissance optimale, notée P_{max} ($P_{max} = V_{opt} \times I_{opt}$), où V_{opt} et I_{opt} correspondent respectivement à la tension et au courant optimaux pour une courbe I-V donnée. Elle garantit également que la tension ou le courant délivré à la charge reste adapté à ses caractéristiques propres.

Afin de maintenir le fonctionnement des générateurs photovoltaïques au point de puissance maximale le plus souvent possible, on utilise généralement des convertisseurs statiques pour assurer l'adaptation entre la source et la charge. Le convertisseur DC-DC permet ainsi aux modules photovoltaïques de fonctionner à leur point de puissance optimale, quelles que soient les conditions d'éclairement ou les variations de la charge.

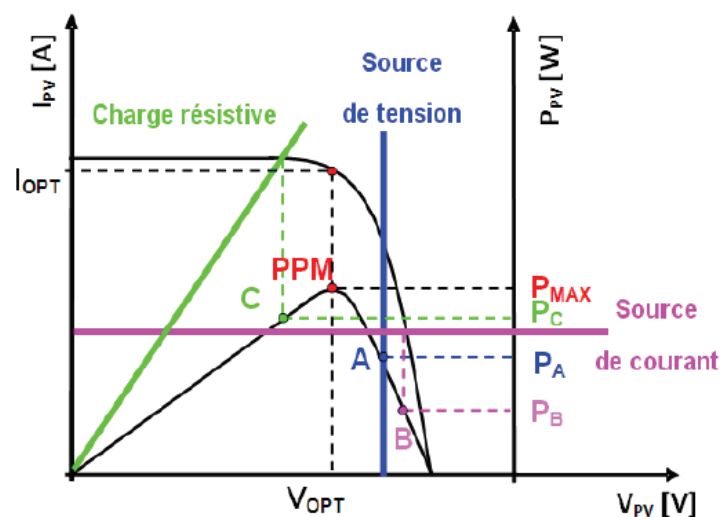


Figure II. 2 : Comportement d'un GPV avec différents types de charges en connexion directe

II.2.1 Convertisseur abaisseur (Buck) :

Le convertisseur Buck, également appelé hacheur série, est un type d'alimentation à découpage permettant de transformer une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure [39].

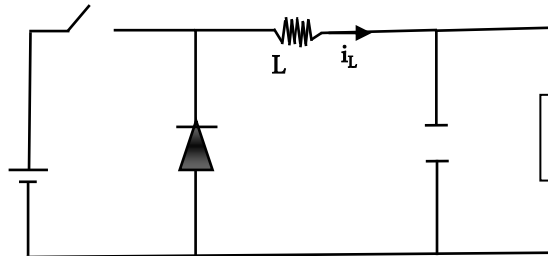


Figure II. 3 : Circuit électrique de base du convertisseur Buck

L'équation caractéristique de courant de l'inductance est donnée par :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i - V_s}{L} \quad (\text{Error! No text of specified style in document. . 1})$$

L : Représente l'inductance en [H]

Le processus de commutation dépend de la position de l'interrupteur. Durant la première phase, d'une durée de $(u t)$, l'inductance se charge en énergie. Lors de la seconde phase, d'une durée de

$(1 - DT) T$, cette énergie est restituée par l'inductance et transférée à la charge.

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{-V_s}{L} \quad (\text{Error! No text of specified style in document. . 1})$$

Les courbes de courant et de tension illustrant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont présentées dans la figure suivante :

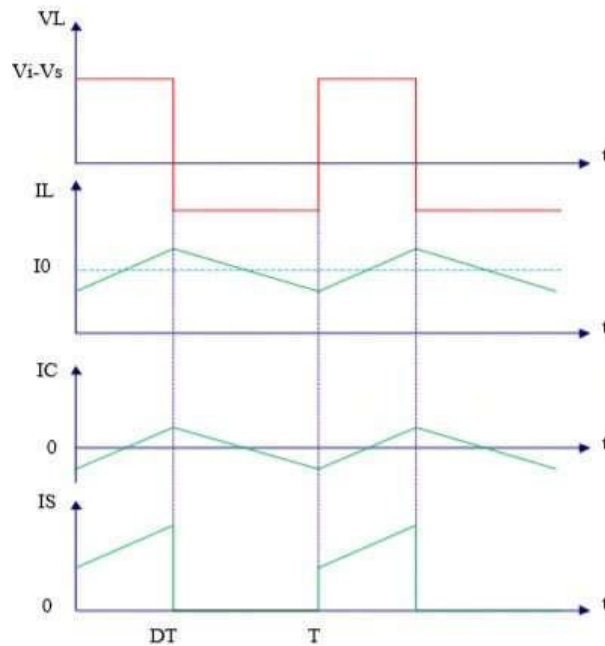


Figure II. 4 :Caractéristiques tension-courant d'un convertisseur Buck

II.2.2 Convertisseur élévateur (Boost) :

Lorsqu'il est nécessaire d'augmenter la tension d'une alimentation en courant continu, on peut recourir à un hacheur shunt élévateur, également appelé hacheur survolteur. Ce convertisseur DC-DC, appartenant à la famille de l'électronique de puissance, utilise un ou plusieurs interrupteurs pour moduler l'énergie. La commutation s'effectue à très haute fréquence, ce qui permet de générer une tension moyenne supérieure à la tension d'entrée.

La figure suivante présente la forme la plus simple d'un hacheur élévateur :

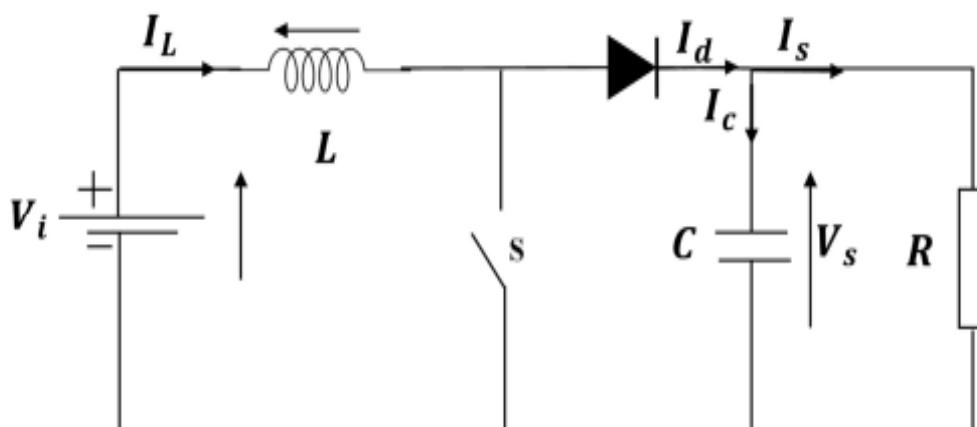


Figure II. 5 :Circuit électrique de base du hacheur dévolteur

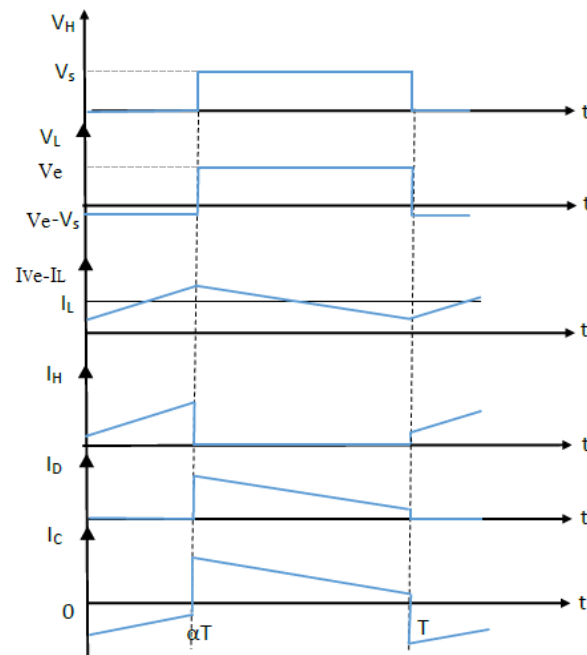


Figure II. 6 : Caractéristique de la tension dans un hacheur boost

II.2.3 Convertisseur abaisseur-élevateur (Buck-Boost) :

Le convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage capable de fournir une tension de sortie soit inférieure, soit supérieure à la tension d'entrée. Cette variation dépend directement de la valeur du rapport cyclique.

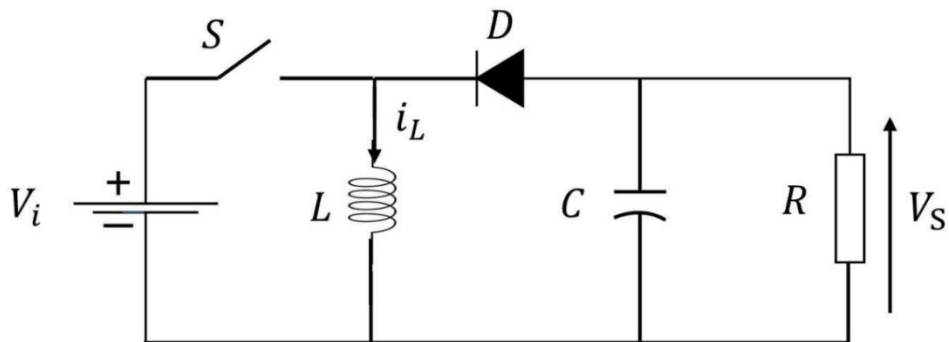


Figure II. 7 : Circuit électrique de base du convertisseur abaisseur-élevateur

Dans ce cas, l'équation de tension aux bornes de la charge décrit le fonctionnement La conduction continue est donnée par :

$$V_s$$

$$= \frac{DT}{1 - DT} V_i$$

(Error! No text of specified style in document. — 3)

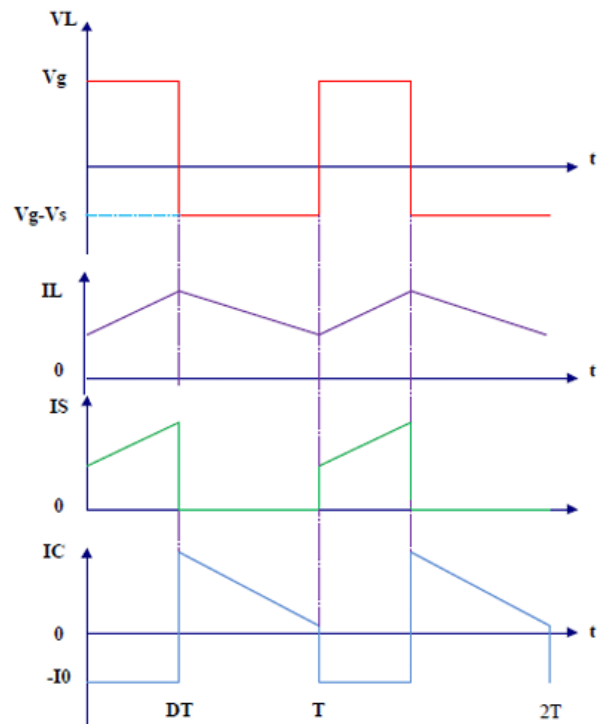


Figure II. 8 : Caractéristiques courant-tension du convertisseur abaisseur-élevateur. [40]

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

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour produire de l'électricité, et la technique MPPT (suivi du point de puissance maximale) est intégrée au système de commande afin d'optimiser l'extraction de l'énergie solaire. Ce système ajuste automatiquement le fonctionnement du hacheur pour garantir un rendement maximal, même en cas de variations climatiques. Il peut ainsi améliorer l'efficacité du système jusqu'à 30 % par rapport à une régulation Classique[22].

Bien que les systèmes photovoltaïques soient largement répandus, leur principal inconvénient reste leur faible rendement. Pour améliorer l'efficacité de ces systèmes, il est donc essentiel d'utiliser des contrôleurs de suivi du point de puissance maximale (MPPT). De nombreuses méthodes de MPPT ont ainsi été développées et continuent d'être perfectionnées en permanence.

Parmi les principales méthodes MPPT, on retrouve la perturbation et observation (P&O) [41, 42–43], la conductance incrémentale (IC) [44–45], l'escalade de colline (Hill Climbing, HC) [46–47], les réseaux de neurones [50], les approches basées sur la logique floue [49–49], la commande en mode glissant [50–51], le backstepping [56], ainsi que les techniques hybrides combinant le mode glissant et le backstepping [52–53], ou encore les algorithmes génétiques [54–55].

La performance de ces méthodes dépend de plusieurs critères, tels que le type de capteur utilisé, la complexité de l'algorithme, le coût de mise en œuvre, le rendement obtenu, les éventuelles oscillations autour du point de puissance maximale, la rapidité de convergence, la capacité à suivre correctement les variations d'irradiation et/ou de température, ainsi que la faisabilité matérielle.

Au cours des dernières années, de nombreuses méthodes ont été développées pour assurer la commande MPPT. Ces approches se répartissent généralement en deux grandes catégories : les méthodes directes et les méthodes indirectes.

II.4 Techniques MPPT classiques :

II.4.1 Méthode de la tension constante :

❖ Principe de fonctionnement de la méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT)

Cette méthode repose sur le principe selon lequel la tension du générateur photovoltaïque à la point de puissance maximale est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert (V_{oc}). Le coefficient de proportionnalité k_1 dépend de la technologie des cellules photovoltaïques, du facteur de forme de la méthode, ainsi que des conditions météorologiques.

❖ Calcul du coefficient de proportionnalité k_1

$$k_1 = \frac{v_{mpp}}{v_{oc}} \cot e < \quad (II.4)$$

La tension à circuit ouvert du générateur photovoltaïque est mesurée et mémorisée en interrompant temporairement le fonctionnement du système, cette opération étant réalisée à intervalles réguliers. Le point de puissance maximale (MPP) est ensuite estimé à l'aide de l'équation (II.1), et la tension de fonctionnement est ajustée en conséquence.

❖ Défis et limitations

Bien que cette méthode soit relativement simple à mettre en œuvre, le principal défi réside dans le choix d'une valeur optimale pour le coefficient k_1 , qui peut varier en fonction des conditions et des technologies utilisées.

❖ Avantages et inconvénients de la méthode

Ainsi, bien que cette méthode présente une certaine imprécision, elle a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et peu coûteuse. De plus, l'interruption temporaire du service qu'elle nécessite reste acceptable dans les systèmes équipés de dispositifs de stockage, où la déconnexion des panneaux solaires passe inaperçue pour l'utilisateur [57].

II.4.2 Méthode de l'incrémentation de la conductance (IncCond) :

La méthode de la conductance incrémentale a été développée pour pallier les limites de la méthode P&O, notamment en cas de variations rapides des conditions climatiques. Elle repose sur l'annulation de la dérivée de la puissance par rapport à la tension.

Le principe s'appuie sur le comportement de la courbe caractéristique de puissance du générateur photovoltaïque (GPV) : la pente de cette courbe est nulle au point de puissance maximale (MPP), positive lorsque le point de fonctionnement se situe à gauche du MPP, et négative lorsqu'il se trouve à droite, comme illustré à (Figure II.9).

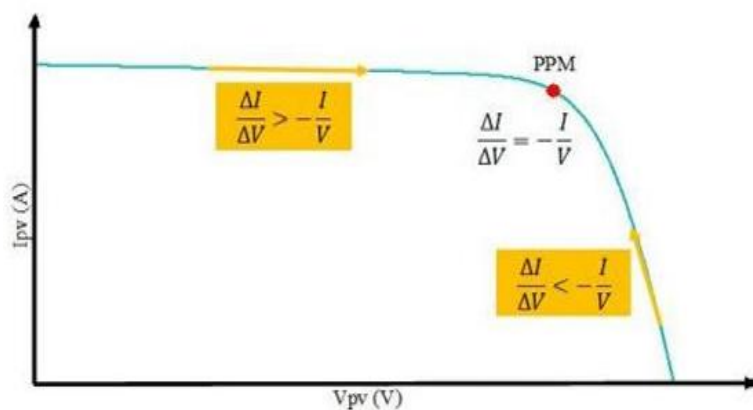


Figure II. 9 :Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond

- Si $\frac{dP}{dV} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche de PPM.
- Si $\frac{dP}{dV} = 0$, le point de fonctionnement est sur la PPM.
- Si $\frac{dP}{dV} < 0$, le point de fonctionnement est à droite de PPM.

La puissance du GPV est donnée par

$$p = v * I$$

(Error! No text of specified style in document. . 5)

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} &= \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \\ &\cong I \\ &+ V \frac{\Delta P}{\Delta V} \end{aligned} \quad (\text{Error! No text of specified style in document. . 6})$$

$$\begin{aligned} P_{PV} = P_{max} &\Leftrightarrow I + V \frac{dI}{dV} = 0 \Leftrightarrow \frac{dI}{dV} \\ &= -\frac{I}{V} \end{aligned} \quad (\text{Error! No text of specified style in document. . 7})$$

Donc, l'équation (II-24) peut être écrite comme suit :

- $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$, alors le point de fonctionnement est sur la PPM.
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$, alors le point de fonctionnement est à gauche de PPM
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$, alors le point de fonctionnement est à droite de PPM.

La conductance et l'incrément de la conductance sont notées respectivement G et ΔG et sont données par :

$$\begin{aligned} G \\ = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \end{aligned} \quad (\text{Error! No text of specified style in document. . 8})$$

$$\begin{aligned} \Delta G \\ = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \end{aligned} \quad (\text{Error! No text of specified style in document. . 9})$$

Le point de puissance maximale (PPM) peut être atteint en comparant, à chaque instant, la valeur de la conductance instantanée G à celle de la conductance incrémentale ΔG . Si $\Delta G > -G$, le rapport cyclique est diminué ; en revanche, si $\Delta G < -G$, le rapport cyclique est augmenté [58]. Ce processus se répète de manière itérative jusqu'à atteindre le PPM.

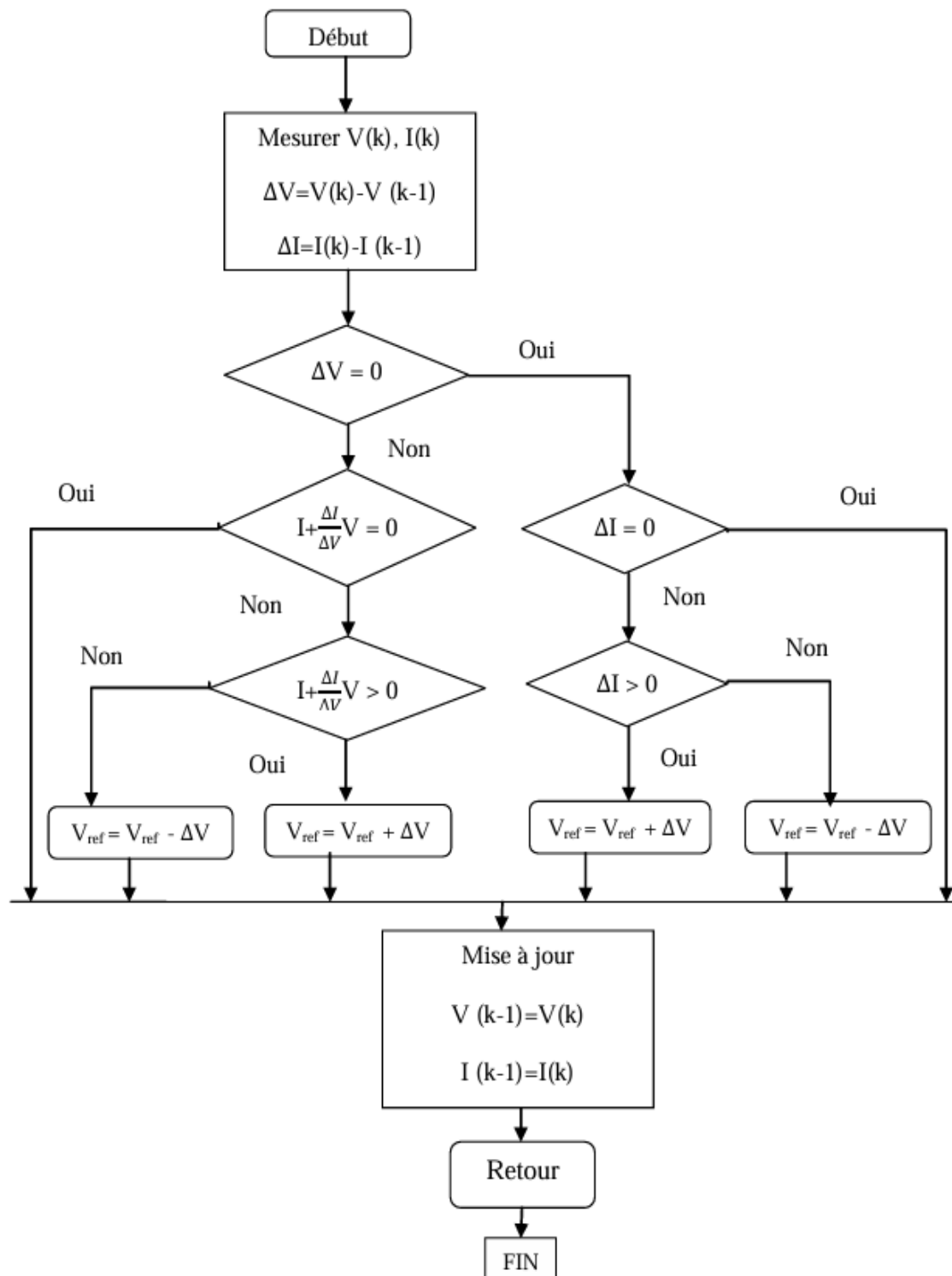


Figure II. 10 :Algorithme de la méthode IncCond

II.4.3 Méthode de perturbation et observation (P&O) :

L'algorithme Perturbe and Observe (P&O) est l'un des plus largement utilisés dans la littérature, en particulier en raison de sa simplicité de mise en œuvre, ce qui le rend très courant en pratique.

Le principe de la méthode perturbe and Observe (P&O) consiste à modifier légèrement la tension V_{pv} autour de sa valeur initiale, puis à observer la variation de la puissance P_{pv} qui en résulte. Comme illustré à (Figure II.11), si une perturbation de la tension entraîne une augmentation de la puissance ($dP/dV > 0$), cela signifie que le point de fonctionnement se rapproche du point de puissance maximale (MPP), et l'algorithme poursuivra la perturbation dans la même direction. En revanche, si la puissance diminue ($dP/dV < 0$), cela indique un éloignement du MPP, et l'algorithme inversera alors la direction de la perturbation suivante [59].

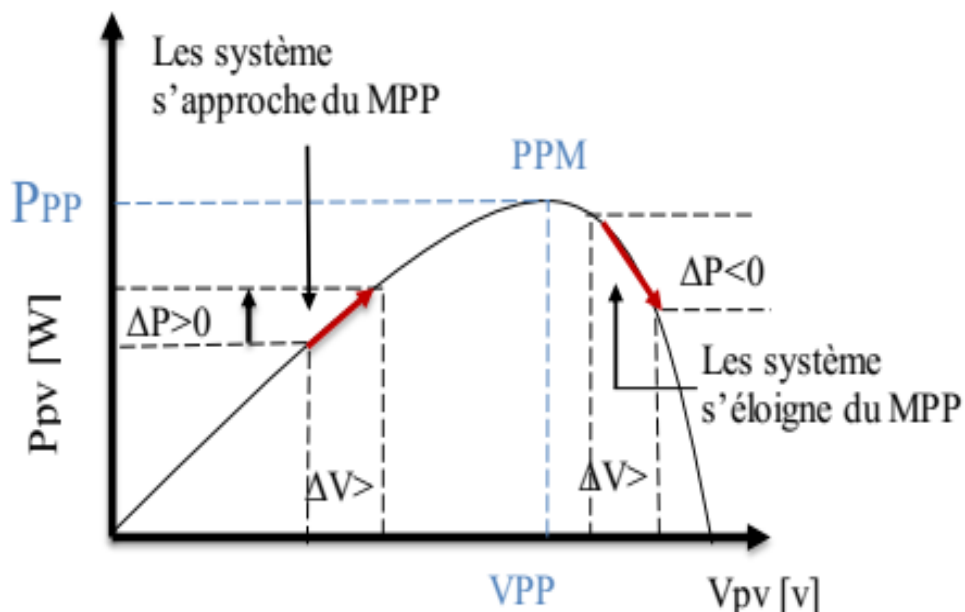


Figure II. 11 : Recherche du PPM par la méthode (P&O)

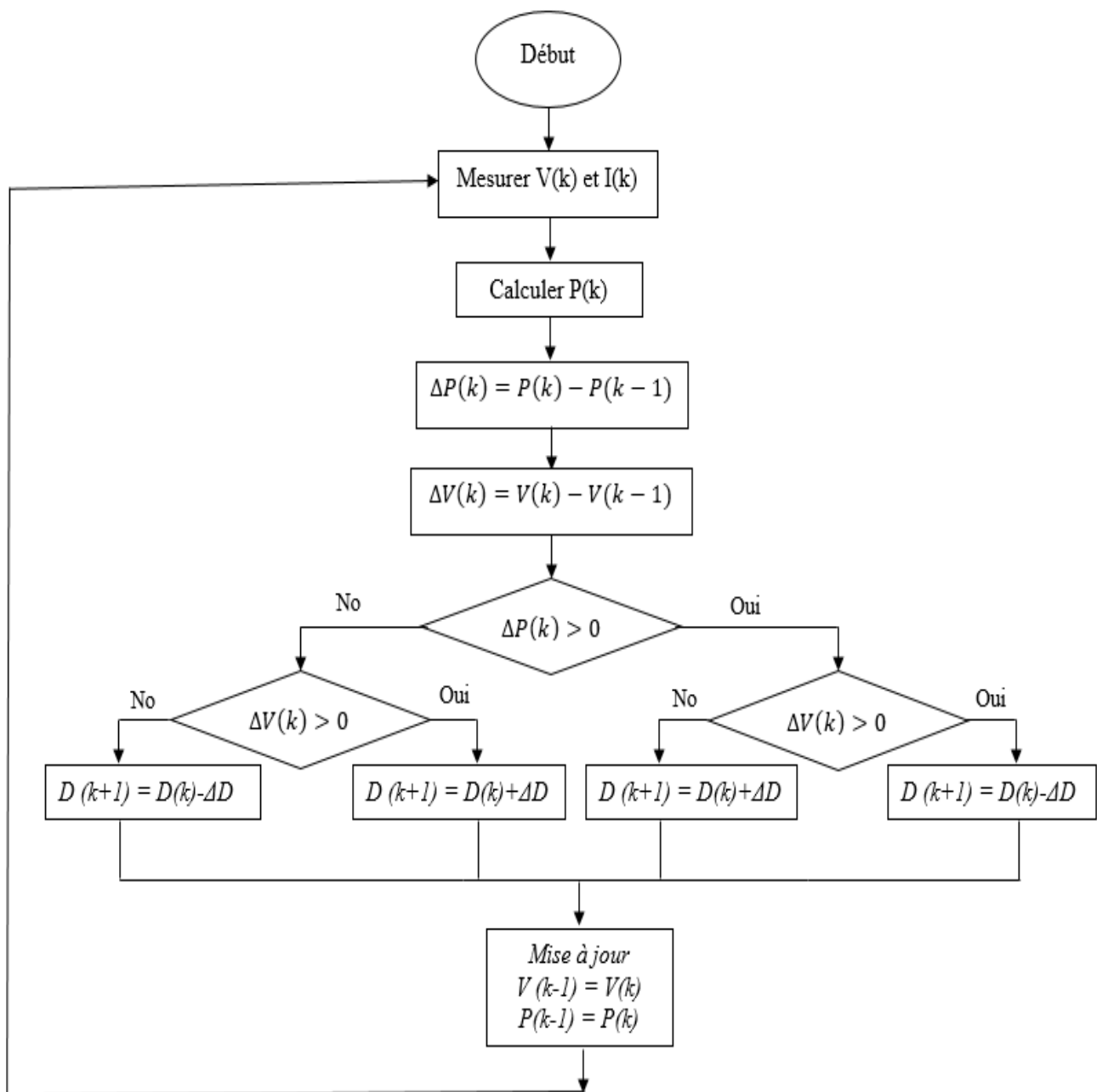


Figure II. 12 : L'algorithme de P&O classique

II.4.3.1 Avantage de la méthode P&O :

En ce qui concerne la méthode P&O, plusieurs avantages peuvent être soulignés :

- Elle présente une structure de commande simple, ce qui facilite sa mise en œuvre [61].
- Elle nécessite un nombre réduit de paramètres à mesurer, ce qui allège le système de détection.
- Son efficacité en termes de suivi du point de puissance maximale est comparable à celle de la méthode de la conductance incrémentale dans certaines conditions [60].

II.4.3.2 Inconvénients de la méthode P&O :

L'algorithme P&O présente cependant deux inconvénients majeurs :

- En cas de variations soudaines de l'ensoleillement, il peut temporairement s'éloigner du point de puissance maximale (PPM), voire perdre définitivement le suivi.
- Des oscillations persistantes autour du PPM sont également observées. Une solution pour les atténuer consiste à réduire l'amplitude du pas de perturbation (ΔV), mais cela ralentit la vitesse de convergence.
- Ainsi, un compromis doit être trouvé entre la précision du suivi et la rapidité de réponse du système.

II.5 Implémentation de l'algorithme P&O sous MATLAB :

II.5.1 Réalisation de l'algorithme sous forme de fonction :

Le système photovoltaïque est composé de panneaux photovoltaïques de 200 W. Diverses simulations ont été exécutées sur MATLAB SIMULINK pour évaluer les performances du contrôleur.

Parametres	Valeurs
Inductance L	$2e^{-2}H$
Capacité C_{pv}	$5e^{-3}F$
Capacité C_{dc}	$2e^{-4}H$

Tableau II. 1 : Paramètres de hacheur boost

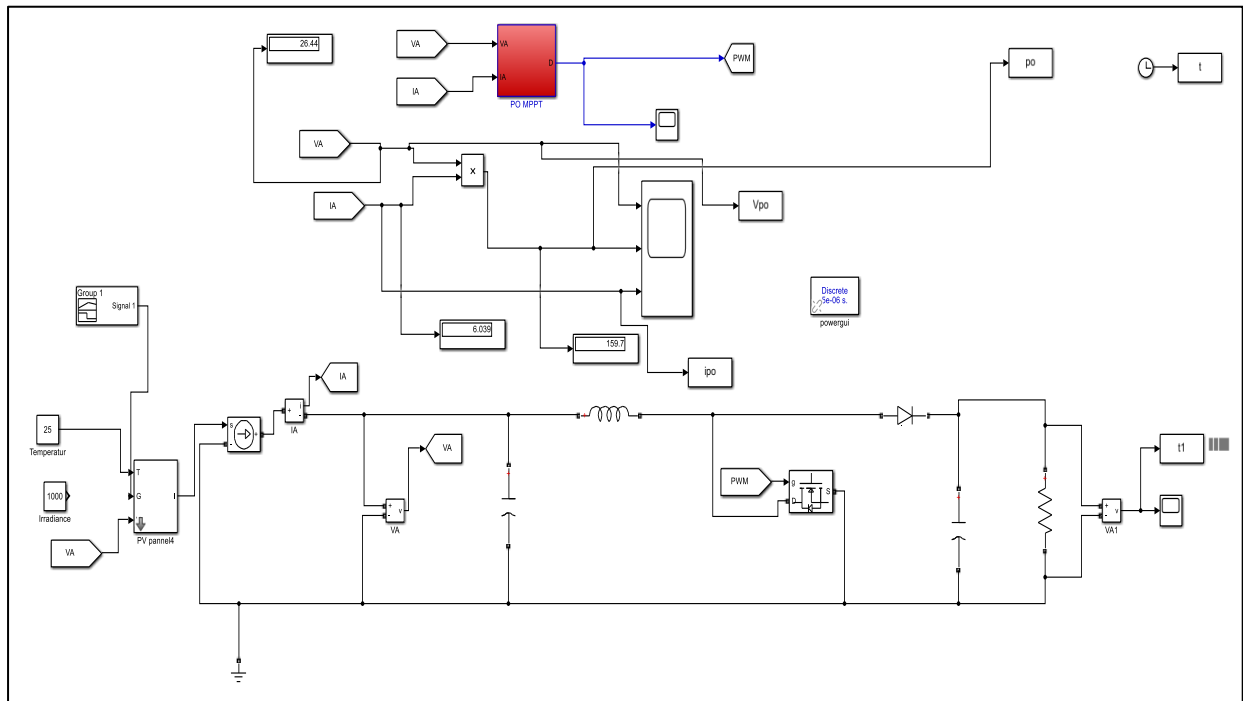


Figure II. 13 : Schéma bloc du système photovoltaïque avec MPPT-P&O dans SIMULINK/MATLAB

II.5.2 Résultats de simulation :

L'influence de de MPPT sous des conditions variables :

Pour évaluer les performances de la commande MPPT-P&O sous différentes conditions environnementales, on effectue le test suivant : Ensoleillement variable et température constante. Afin de montrer du soleil G sur la puissance, nous maintenons la température à une valeur constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et la quantité de lumière solaire change rapidement. Cette (Figure II.14) montre la section traversa de la lumière solaire pris en compte. Il faut noter que d'une durée de 3 secondes, la courbe comprendre des changements rapidement entre 500 W/m^2 et 1000 W/m^2 afin de tester l'algorithme MPPT de type P&O.

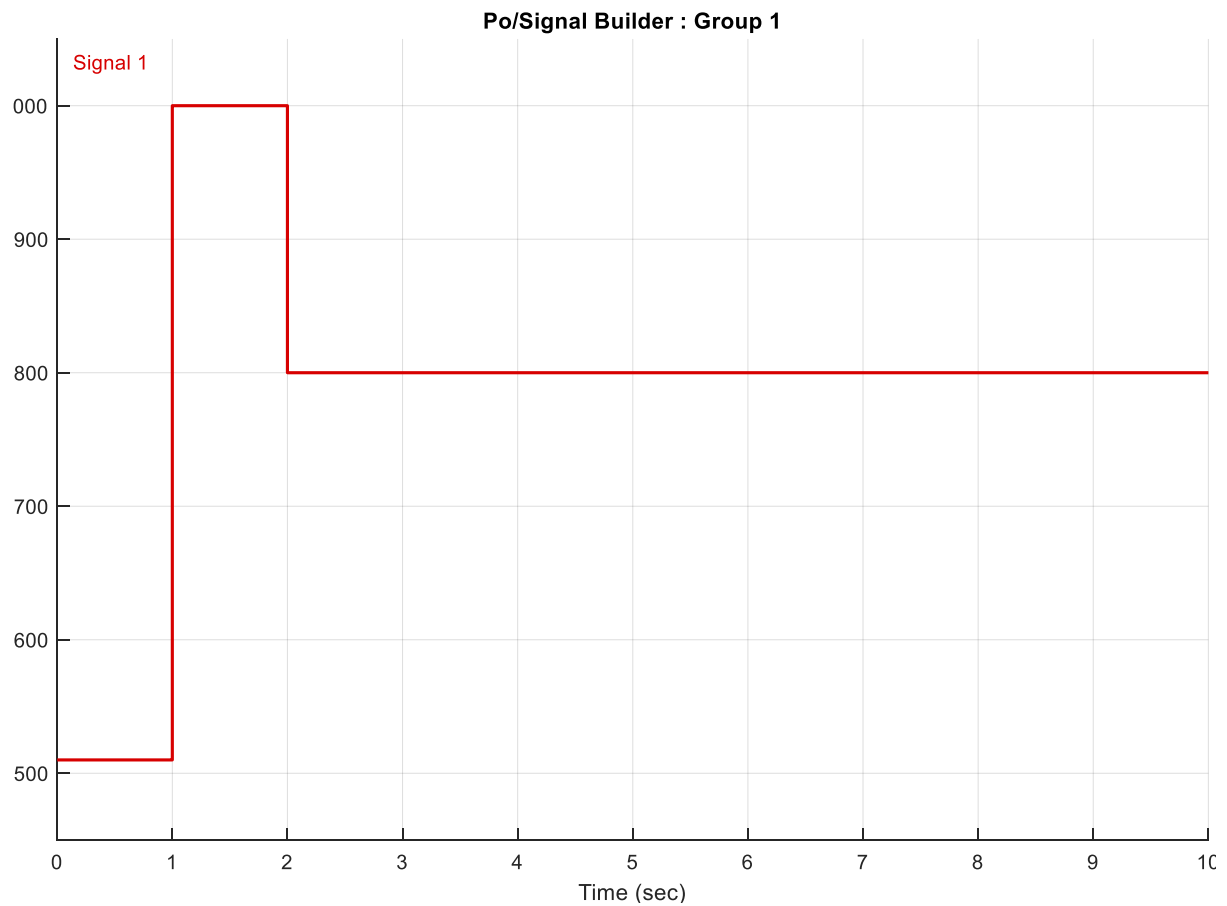


Figure II. 14 : la variation de l'éclairement

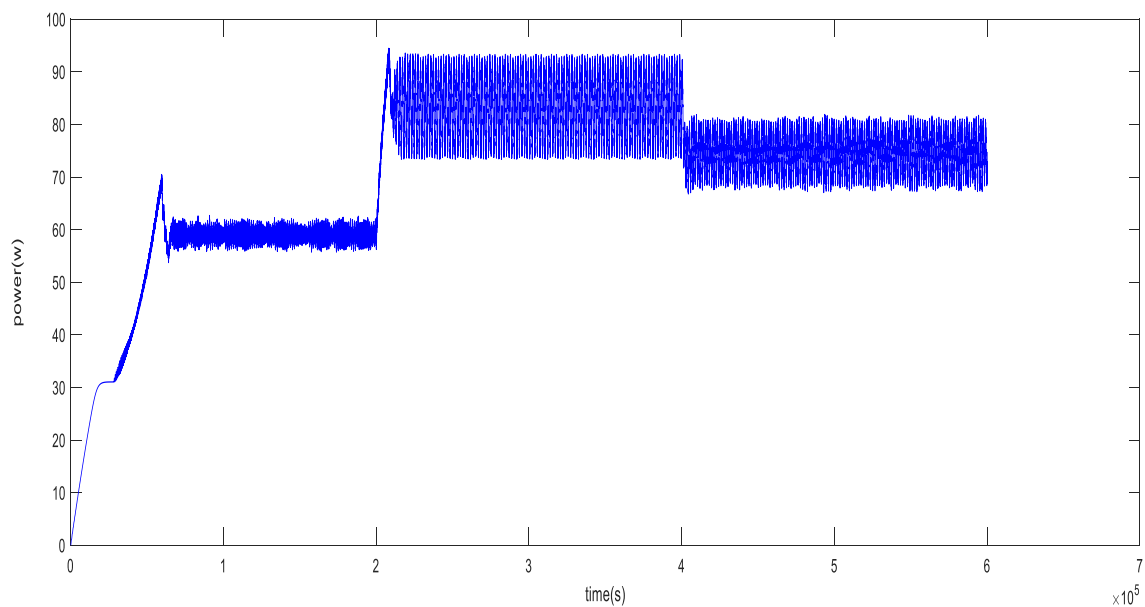


Figure II. 15 :Résultats de simulation de panneau PV avec le convertisseur DC/DC et la charge

Les graphes suivants montrent la recherche du point de puissance maximale pour une variation de temps d'ensoleillement en fonction de la tension du panneau par la méthode P&O.

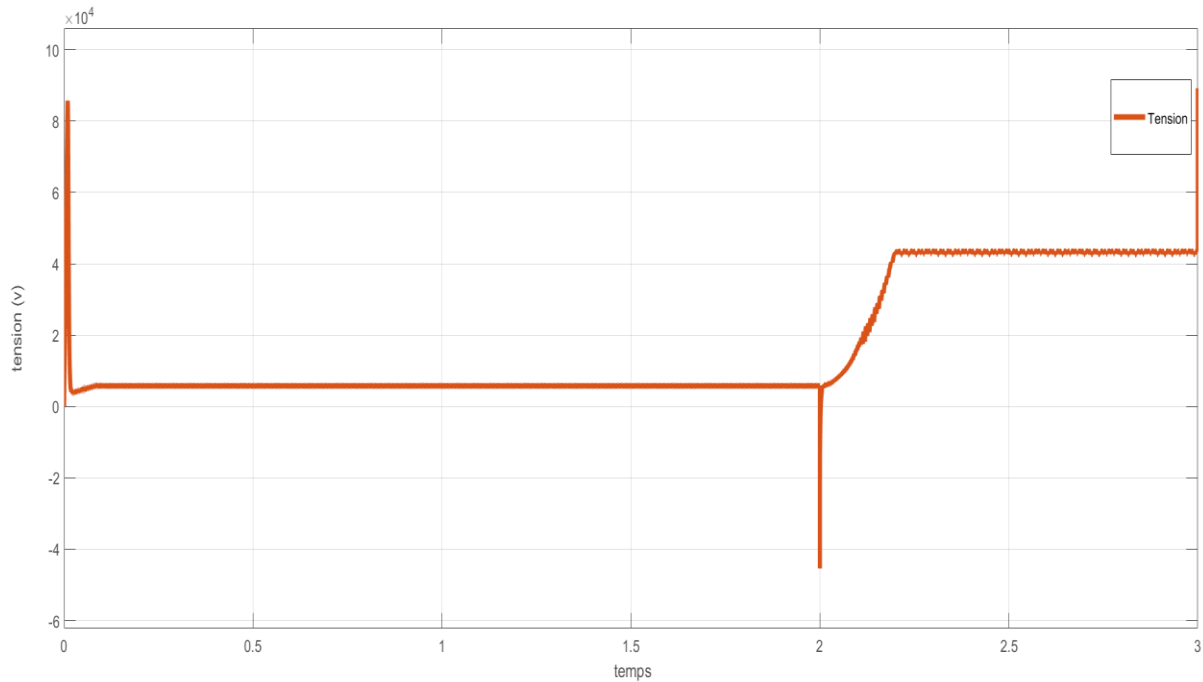


Figure II. 16 : Courbe de tension de sortie P&O

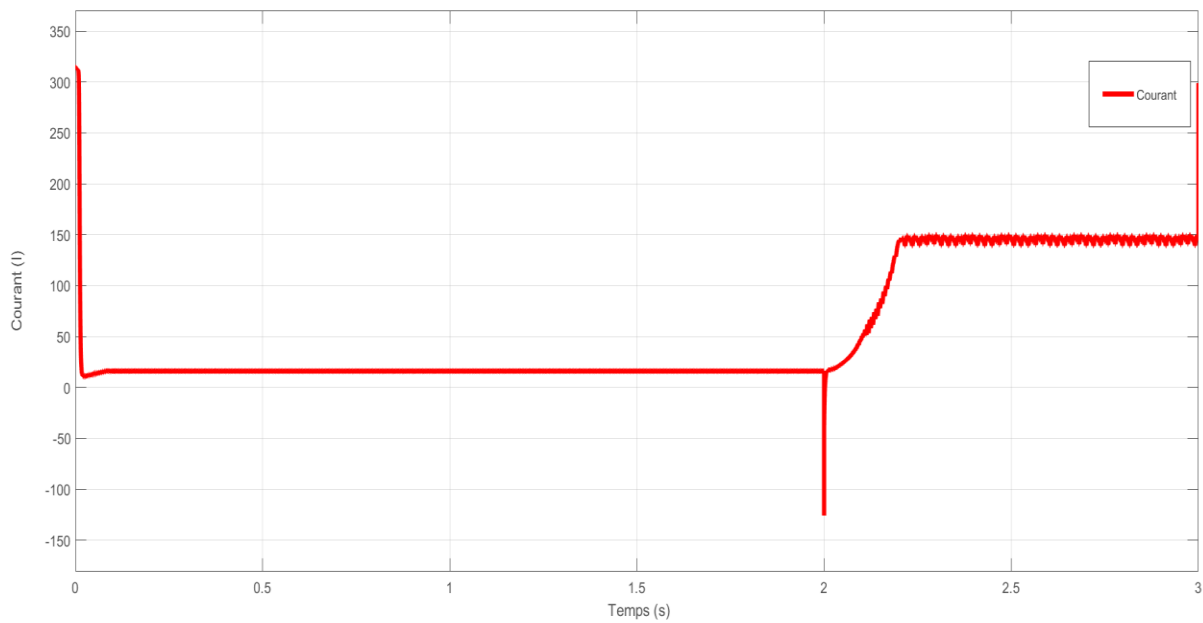


Figure II. 17 : Courbe de courant de sortie P&O

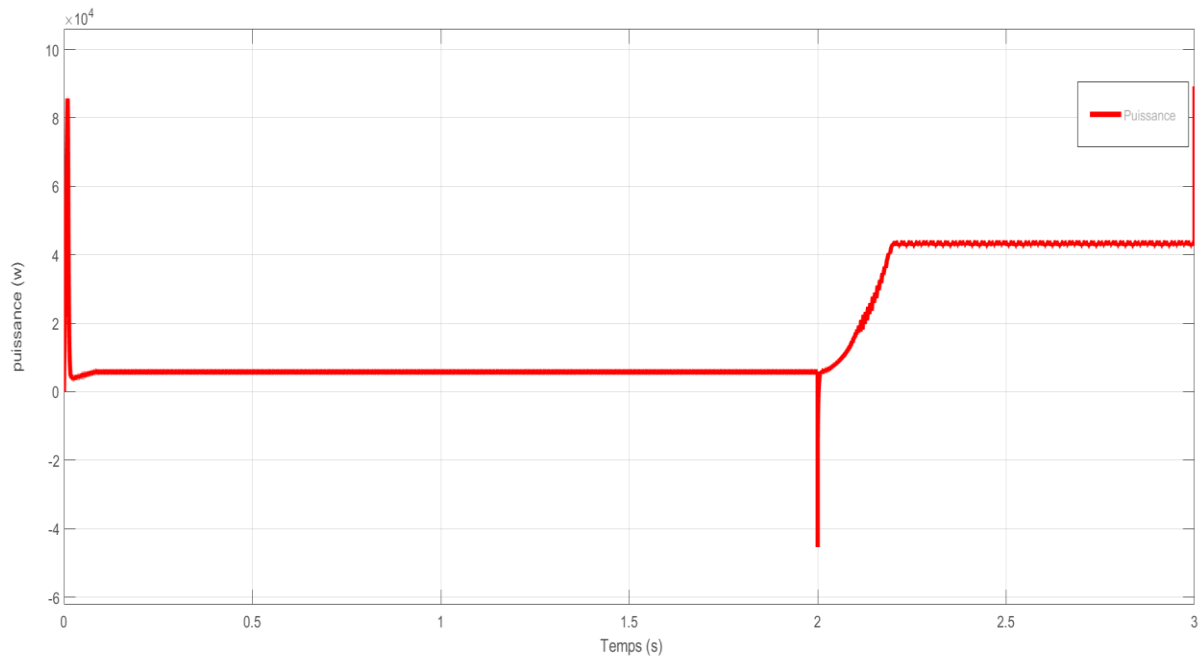


Figure II. 18 : Courbe de puissance de sortie P&O

On suppose une augmentation de la température de 25°C à 45°C à instant $t = 3$ s, les résultats de simulation sont représentés sur la figure (II.19) et (II.20) et (II.21).

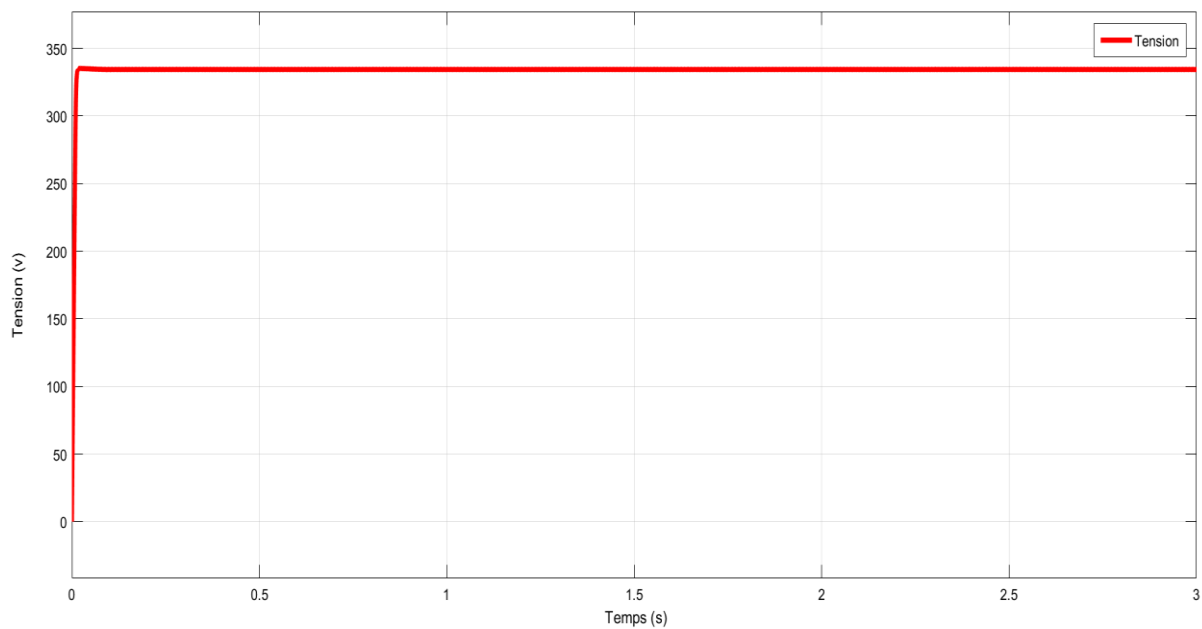


Figure II. 19 : Courbe de tension de sortie P&O

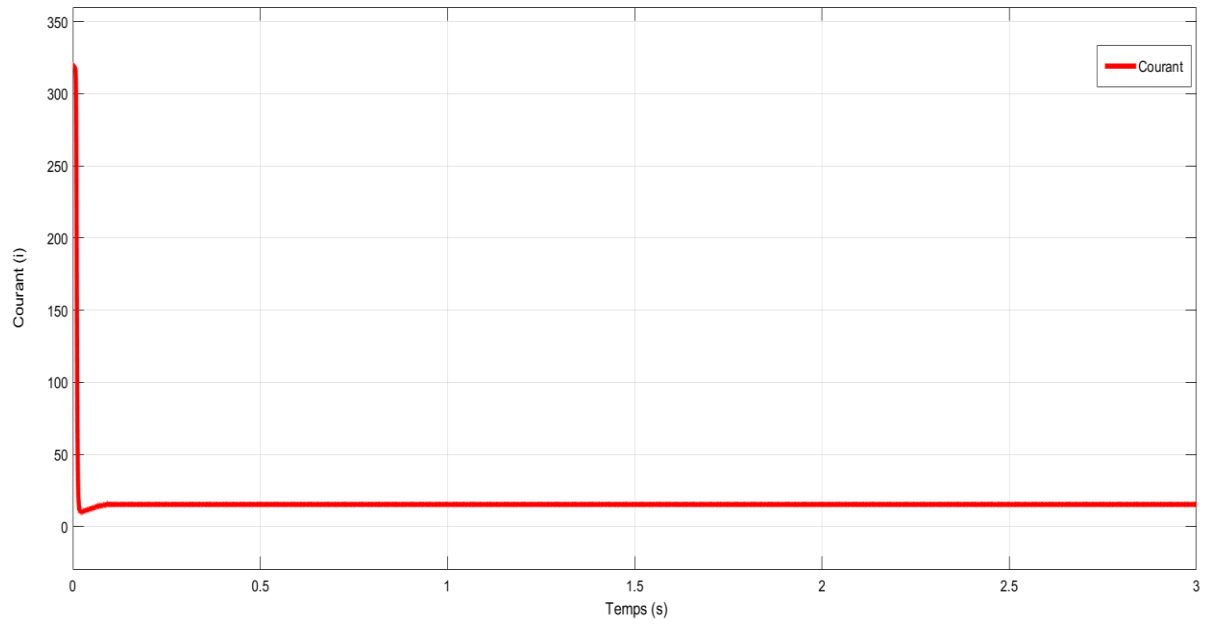


Figure II. 20 : Courbe de courant de sortie P&O

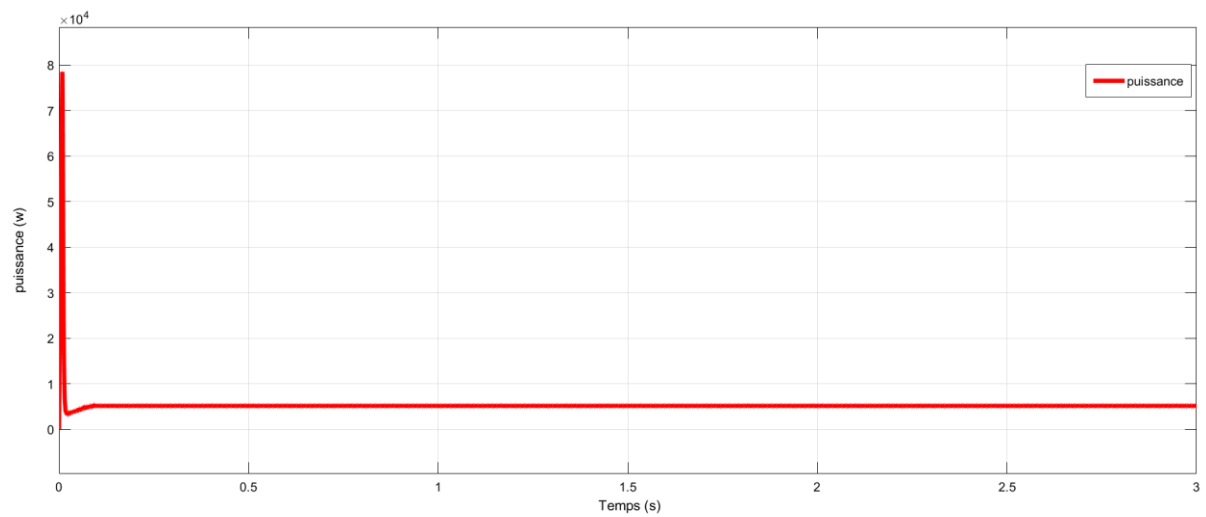


Figure II. 21 : Courbe de puissance de sortie P&O

II.6 Conclusion :

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque à un rendement optimal nécessite l'insertion de convertisseurs statiques (généralement un convertisseur DC-DC) entre le générateur et la charge. Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale (MPP), des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs minimisent l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques.

Dans ce chapitre, nous présentons certains types de convertisseurs DC-DC, une impulsion largement utilisée dans les systèmes PV est introduite pour faire correspondre la source avec la charge, puis nous introduisons l'algorithme classique pour trouver le point à la puissance maximale PPM "Perturbation & Observation ".

Enfin, nous avons simulé le système PV pour évaluer les performances de la commande MPPT-P&O sous différentes conditions environnementales.

**CHAPITRE III : OPTIMISATION
PAR ESSAIM PARTICULAIRE
(PSO) COMME TECHNIQUE MPPT**

III.1 Introduction :

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont une source prometteuse d'énergie renouvelable, mais leurs caractéristiques dynamiques et non linéaires nécessitent le développement de méthodes efficaces pour suivre le point de puissance maximale (MPPT). Avec l'augmentation de l'intégration de ces systèmes dans le réseau électrique, l'amélioration de leurs performances devient de plus en plus cruciale. Les systèmes photovoltaïques sont constitués de panneaux disposés de manière à minimiser l'impact de l'ombre, de la poussière et de la chaleur sur leur performance, ce qui nécessite l'utilisation d'algorithmes MPPT pour ajuster continuellement le point de fonctionnement en réponse aux variations environnementales [62-63].

Une approche efficace consiste à utiliser des algorithmes méta-heuristiques, tels que l'optimisation par essaim de particules (PSO), qui peuvent traiter des espaces de recherche complexes. Les recherches montrent que des algorithmes comme le PSO surpassent les méthodes traditionnelles (telles que P&O) en termes de précision et de stabilité dans les systèmes photovoltaïques, notamment dans les conditions d'ombrage partiel [64].

Bien que les méthodes traditionnelles comme P&O soient simples et faciles à mettre en œuvre, elles rencontrent des défis comme la lente convergence et l'instabilité près du point de puissance maximale. Par conséquent, les algorithmes tels que le PSO sont plus efficaces pour améliorer les performances des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau [65-66].

III.2 Historique sur la méthode PSO :

L'optimisation par Essaim de particule (OEP) ou bien (PSO Particle swarm optimization), a été inventée par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995. Au départ J. Kennedy et R. Eberhart cherchaient à simuler la capacité des oiseaux à voler de façon synchrone et leur aptitude à changer brusquement de direction tout en restant en une formation optimale. Le modèle qu'ils ont proposé a ensuite été étendu en un algorithme simple et efficace d'optimisation.

III.3 Principe de la méthode PSO :

Cette technique est basée sur le comportement social des animaux en essaim. Le comportement des bancs de poissons et des nuées d'oiseaux est l'exemple le plus fréquemment utilisé.



(A)



(B)

Figure III. 1 :Groupe de : (A) oiseaux, (B) poissons

L'essaim de particules est constitué d'un ensemble d'unités simples appelées particules. Chaque particule représente une solution potentielle au problème étudié, et elle est caractérisée par une position $x_i(t)$ et une vitesse $v_i(t)$, c'est-à-dire son déplacement. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de retenir sa meilleure performance précédente P_{op-i} (en termes de position et de vitesse), ainsi que la meilleure performance atteinte par l'ensemble de l'essaim P_{op-g} . Lors de son déplacement, la trajectoire de la particule est influencée par plusieurs composantes, à savoir :

Composante d'inertie : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.

Composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.

Composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par les autres particules. [67] (Figure III.1) Le déplacement de la particule est exprimé par les équations suivantes

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad , \quad \text{telque} : i \in \{1, \dots, n_p\} \quad (\text{III. 1})$$

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 [P_{op-i} - x_i(t)] + c_2 \cdot r_2 [P_{op-g} - x_i(t)] \quad (\text{III. 2})$$

Avec : $x_i(t)$: la position de la particule i à l'instant t .

$x_i(t+1)$: la position de la particule i à l'instant $t+1$.

$v_i(t)$: la vitesse de la particule i à l'instant t .

$v_i(t+1)$: la vitesse de la particule i à l'instant $t+1$.

$Pop-i$: la meilleure position locale (de la particule i).

$Pop-g$: la meilleure position globale (de toutes les particules de l'essaim).

w : coefficient d'inertie (Constante).

r_1 et r_2 : nombres aléatoires entre 0 et 1.

c_1 et c_2 : coefficients d'accélération (constantes).

np : nombre des particules dans l'espace de recherche

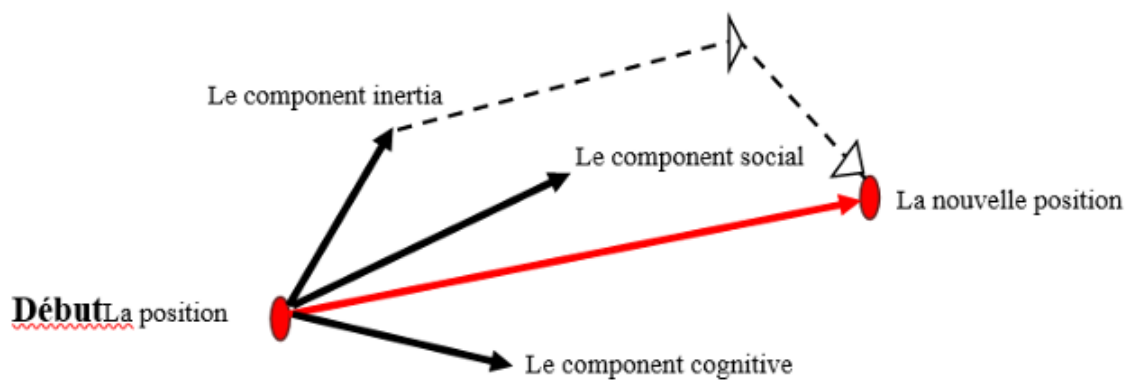


Figure III. 2 : Mouvement de particule.

III.4 Application de PSO comme technique MPPT :

III.4.1 Formalisation du problème :

Dans un espace de recherche de dimension D , nous définissons un essaim de particules de taille N (taille de la population). La particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur de position

$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ et par sa vitesse $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objective de ce point. Cette particule conserve en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que nous notons $Pbest_i = (Pbest_{i1}, Pbest_{i2}, \dots, Pbest_{iD})$. La meilleure position atteinte par l'essaim est notée $Gbest = (Gbest_1, Gbest_2, \dots, Gbest_D)$. Dans notre cas, nous nous intéressons uniquement à l'essaim entièrement connecté, c'est-à-dire que toutes les particules partagent l'information ; chaque particule connaît la meilleure position déjà visitée par n'importe quelle particule de l'essaim. Cette version de l'algorithme est appelée version globale de l'optimisation

par essaim de particules (*Gbest*), où toutes les particules de l'essaim sont considérées comme proches de la particule *i*.

❖ Les étapes de l'algorithme :

Au début de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire ou uniforme dans l'espace de recherche du problème. Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace en combinant linéairement les trois composantes mentionnées précédemment. En effet, à l'itération (*t*+1), le vecteur de vitesse et le vecteur de position sont calculés à partir de l'équation (III.1) et de l'équation (III.2) respectivement.

$$v_{ij}^{t+1} = wv_{ij}^t + c_1r_{1ij}^t(pbest_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2r_{2ij}^t(Gbest_j^t - x_{ij}^t) \quad (III. 3)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (III. 4)$$

❖ Explication des symboles :

W est une constante, appelée coefficient d'inertie ; *c*₁ et *c*₂ sont deux constantes, appelées coefficients d'accélération et *r*₁ et *r*₂ sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans [0, 1], à chaque itération *t* et pour chaque dimension *j*.

Ainsi, l'algorithme PSO se résume dans les étapes suivantes :

- Initialisation de chaque particule de la population en sélectionnant aléatoirement des valeurs pour son vecteur de position *x_i* et sa vitesse *v_i*
- Répétition
- Calcul de la valeur du fitness de chaque particule *i*;
- Mise à jour des meilleures positions locales pour chaque particule *i*;
- Mise à jour de la meilleure position globale de l'essaim;
- Calcul de la vitesse et mettez à jour la position de chaque particule selon les équations (III.1) et (III.2). Jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

III.4.2 Adaptation de PSO pour le suivi du point de puissance maximale

L'algorithme d'optimisation par essaims de particules (Particle Swarm Optimization) est une technique d'optimisation puissante inspirée du comportement social des oiseaux à la recherche de la nourriture en essaim [68], [69].

Cette technique s'appuie sur le concept de coopération entre plusieurs agents biologiques (oiseux, poissons, ...etc.), devant atteindre un objectif commun, dans un environnement donné. Les agents, appelés particules, se déplacent dans un espace à plusieurs dimensions en recherchant des sites intéressants (optimaux) par rapport à leurs objectifs communs.

Dans ce travail de thèse, l'application de l'algorithme d'optimisation PSO est décrite par les étapes suivantes :

Etape 1 : initialisation des paramètres de l'algorithme PSO.

Etape 2 : Définir les bornes de l'espace de recherche des coefficients de pondération.

Etape 3 : Initialisation d'un ensemble aléatoire de solutions. Les solutions sont générées à partir de l'équation suivante :

$$X_1^i = X_{min}^i + rand(i, n_\mu) \times (X_{max}^i - X_{min}^i) \quad (III. 5)$$

Où $i = 1, \dots, n_\mu$ et $rand()$ est un nombre aléatoire qui prend des valeurs entre 0 et 1.

Etape 4 : Calcul de la fonction objective.

Etape 5 : Mise à jour des valeurs $Gbest_j^t$ et $Pbest_{ij}^t$

Etape 6 : Mise à jour de la vitesse de chaque particule selon l'équation

$$V_{k+1}^i = w \times V_k^i + C_1 \times rand() \times (Pbest_k^i - X_k^i) + C_2 \times rand() \times (Gbest_k^i - X_k^i) \quad (III. 6)$$

Etape 7 : Mise à jour de la position de chaque particule selon l'équation

$$X_{k+1}^i = X_k^i + V_{k+1}^i \quad (III. 7)$$

Etape 8 : Répéter les étapes 4 à 7 jusqu'à atteindre le nombre d'itérations prédéfinies. Les gains de commande et d'observateur sont alors obtenus à la dernière itération.

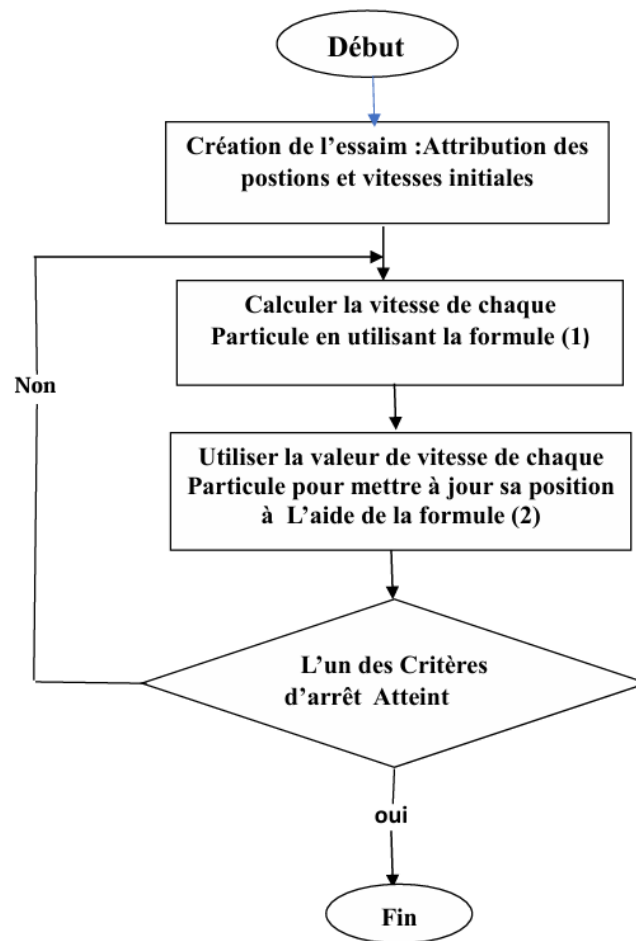


Figure III. 3 : Organigramme de principe de PSO

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) a été appliqué pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans un système photovoltaïque, sous des conditions climatiques idéales (25°C et 1000 W/m²), ainsi qu'en présence d'un ombrage partiel.

Les résultats de simulation ont montré que l'algorithme PSO est capable de suivre le point de puissance maximale avec une grande efficacité, une rapidité de réponse et une bonne précision, contribuant ainsi à l'amélioration des performances du système photovoltaïque.

L'algorithme a également démontré sa flexibilité et sa capacité à s'adapter aux variations soudaines des conditions environnementales, ce qui renforce sa fiabilité en tant que solution efficace pour une exploitation optimale de l'énergie solaire dans différentes conditions de fonctionnement.

Ces résultats soulignent l'importance de l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle et des approches métaheuristiques pour améliorer la performance des systèmes d'énergie renouvelable, et ouvrent la voie à des applications futures plus avancées dans ce domaine.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Introduction :

Ce chapitre présente une analyse comparative approfondie des performances des algorithmes MPPT *Perturb and Observe* (P&O) et *Particle Swarm Optimization* (PSO) dans le contexte des systèmes photovoltaïques (PV). Alors que le P&O est largement utilisé pour sa simplicité, il présente des limitations en termes de précision et de stabilité. Le PSO, en tant que méthode méta-heuristique, offre une alternative prometteuse pour surmonter ces défis. L'objectif est d'évaluer ces deux méthodes en termes de réponse dynamique, efficacité sous conditions variables, stabilité et vitesse de convergence, en s'appuyant sur des résultats de simulation et des études récentes.

IV.2 Comparaison des performances de P&O et PSO :

IV.2.1 Réponse dynamique :

La réponse dynamique désigne la capacité de l'algorithme à réagir rapidement aux variations soudaines de l'irradiation solaire. [70]

❖ Algorithme (P&O) :

- Ajuste la tension du générateur photovoltaïque par de petites perturbations.
- Cette approche peut provoquer un retard dans le suivi du point de puissance maximale en cas de changements rapides de l'ensoleillement.

❖ Algorithme (PSO) :

- Utilise un ensemble de particules pour explorer l'espace de recherche.
- Il est capable de localiser plus rapidement le nouveau point de puissance optimale global.

IV.2.2 Efficacité sous conditions variables :

L'efficacité dans ce contexte fait référence à la capacité de l'algorithme à extraire la puissance maximale, même en présence de perturbations telles que :

- Des variations soudaines de l'ensoleillement.
- Un ombrage partiel affectant les panneaux photovoltaïques.

❖ Algorithme PSO :

- Très efficace dans des conditions complexes.

- Capable de converger vers le point de puissance maximale global (MPP global).
- Évite les faux optima locaux.
- Maintient une efficacité de suivi élevée, même en cas d'ombrage partiel.

❖ Algorithme P&O :

- Risque de rester bloqué sur un maximum local au lieu d'atteindre le vrai MPP.
- Ce comportement entraîne une extraction d'énergie inférieure par rapport au PSO

IV.2.3 Stabilité et vitesse de convergence :

La stabilité et la vitesse de convergence sont des critères essentiels pour évaluer les algorithmes de suivi du MPP.

❖ Algorithme P&O :

- Présente des oscillations persistantes autour du MPP en régime stable.
- Pour réduire ces oscillations, il est possible de diminuer l'amplitude de la perturbation, mais cela ralentit la convergence vers le nouveau point optimal.
- Il offre une convergence rapide, mais avec un suivi instable près du MPP.

❖ Algorithme PSO :

- Améliore la stabilité du suivi par rapport au P&O.
- Atteint le MPP avec une stabilité accrue, mais son temps de convergence est généralement plus long que celui du P&O.

IV.3 Résultats de simulation :

Le but de ces essais est de vérifier le fonctionnement de chaque technique et comparer les performances de chaque méthode.

IV.3.1 Environnement stable :

Nous avons procédé à la simulation du système ci-dessous, sous les conditions standard (température 25°C et un éclairement 1000 w/m²).

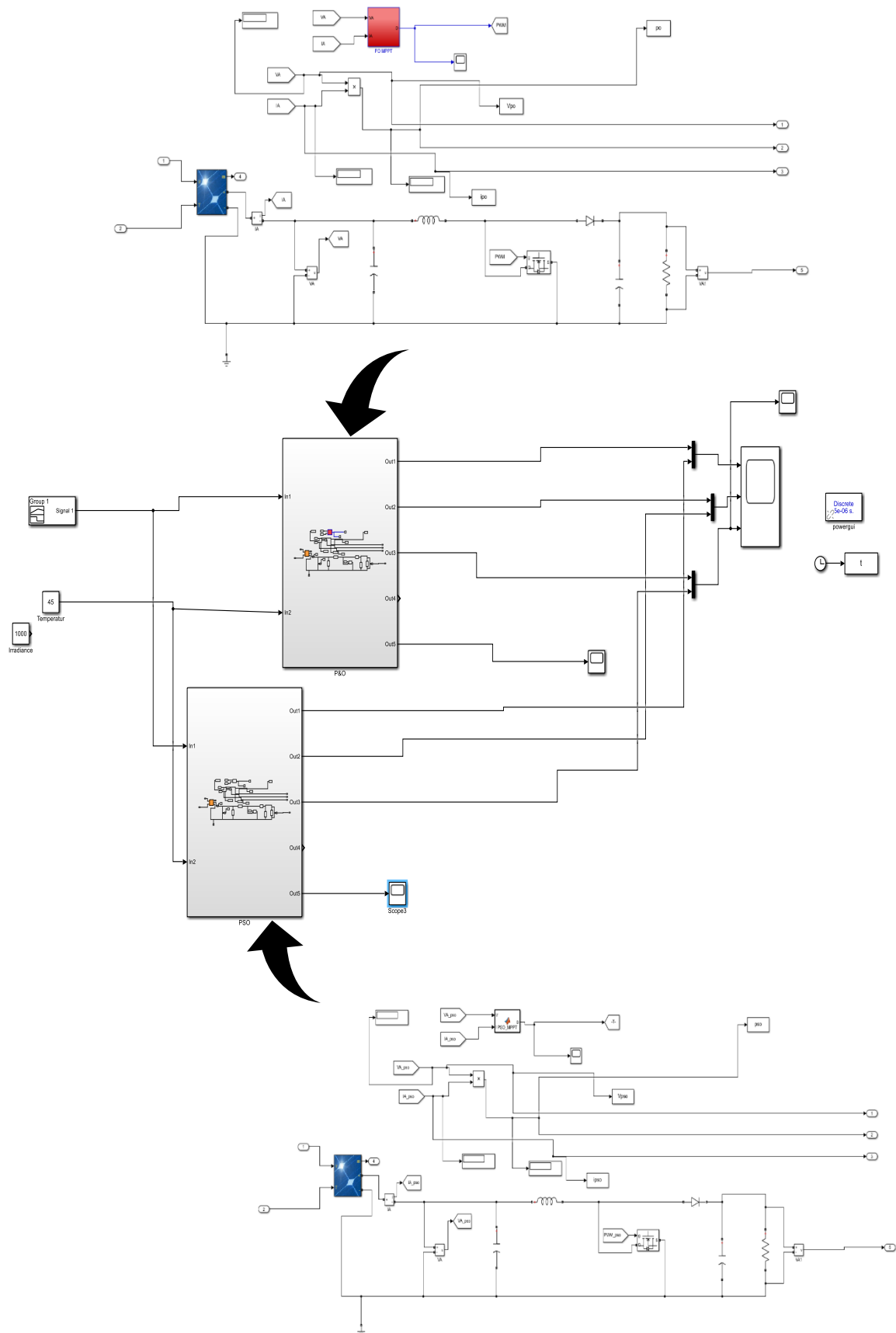


Figure IV. 1 : Schéma bloc du système photovoltaïque avec MPPT-P&O/PSO dans SIMULINK/MATLAB

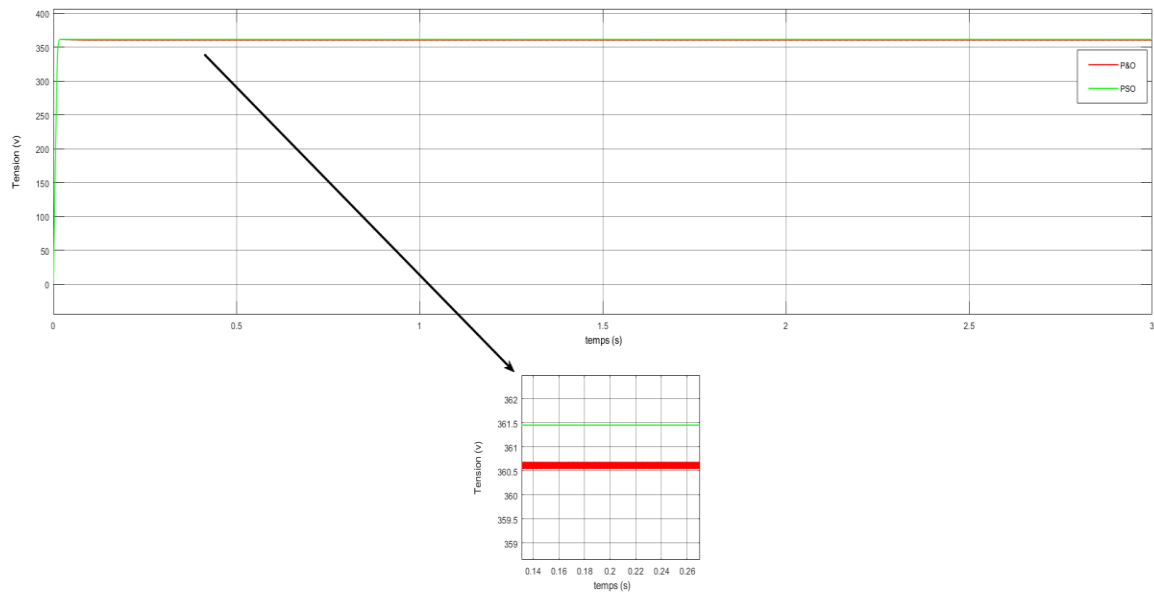


Figure IV. 2 : les allures des Tension

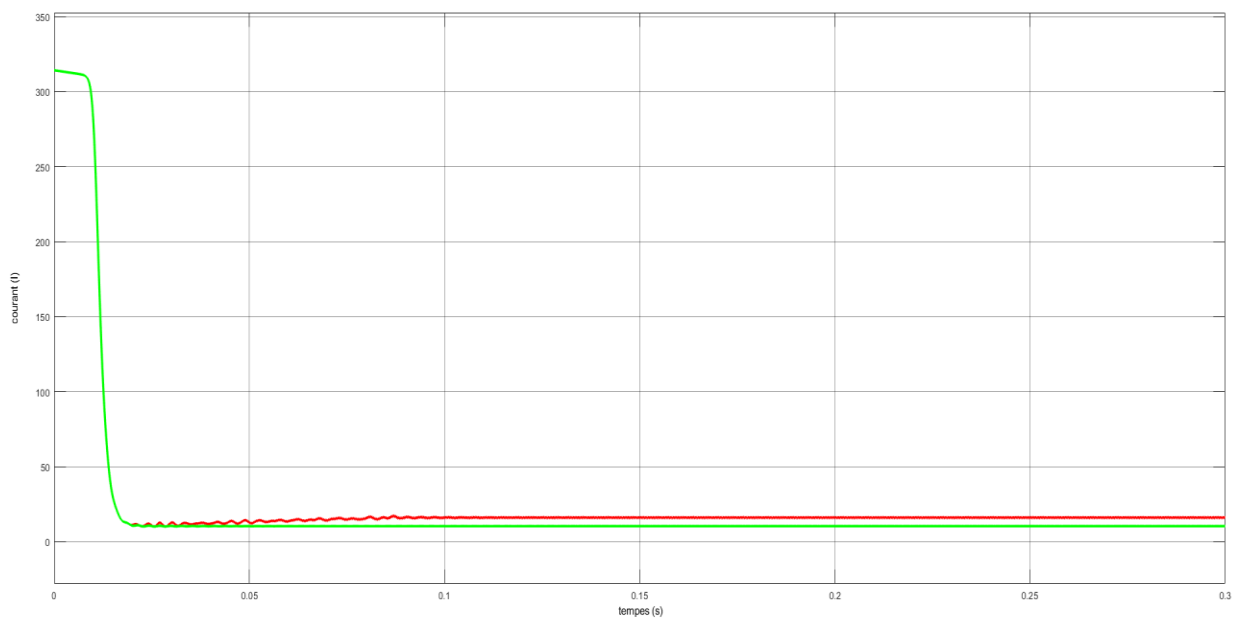


Figure IV. 3 : les allures des Tension

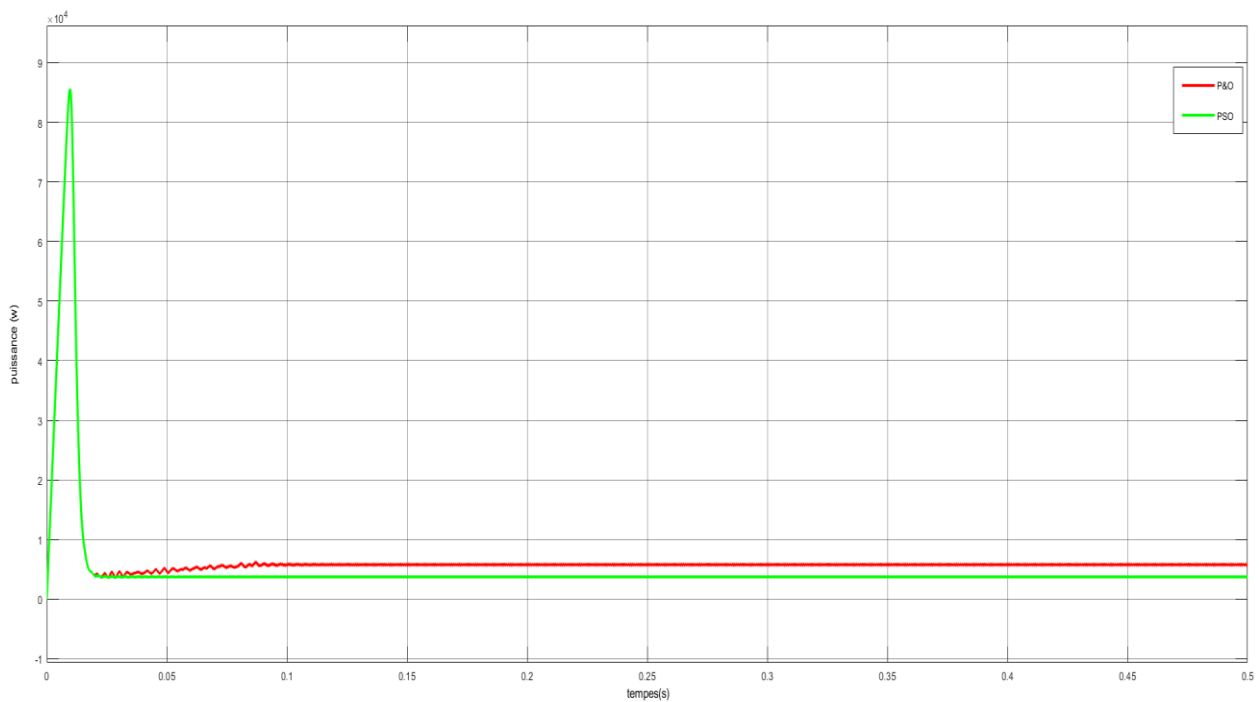


Figure IV. 4 : les allures des puissances

IV.3.2 Fonctionnement de MPPT sous des conditions variables :

Pour explorer le comportement du système face aux changements de l'éclairement, nous procédons comme suit : Comme vous pouvez le voir sur la figure (III-6), je l'ai testé et il a changé très rapidement. Lumière du soleil (500W/m^2 - 800W/m^2 - 1000W/m^2 , $T=45^\circ\text{C}$)

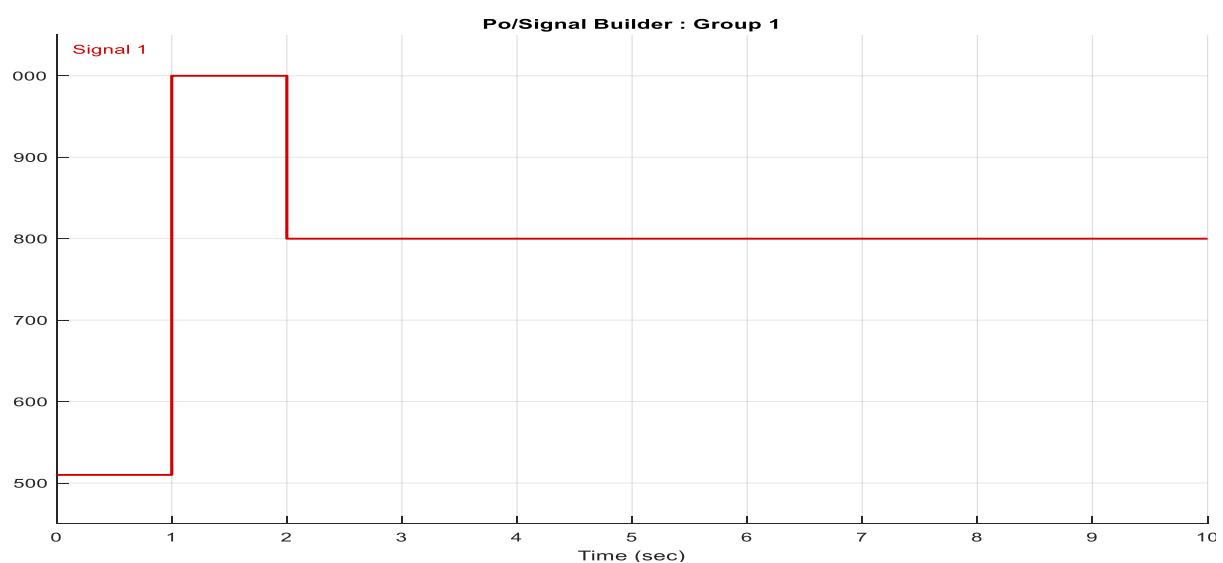


Figure IV. 5 : la variation de l'éclairement

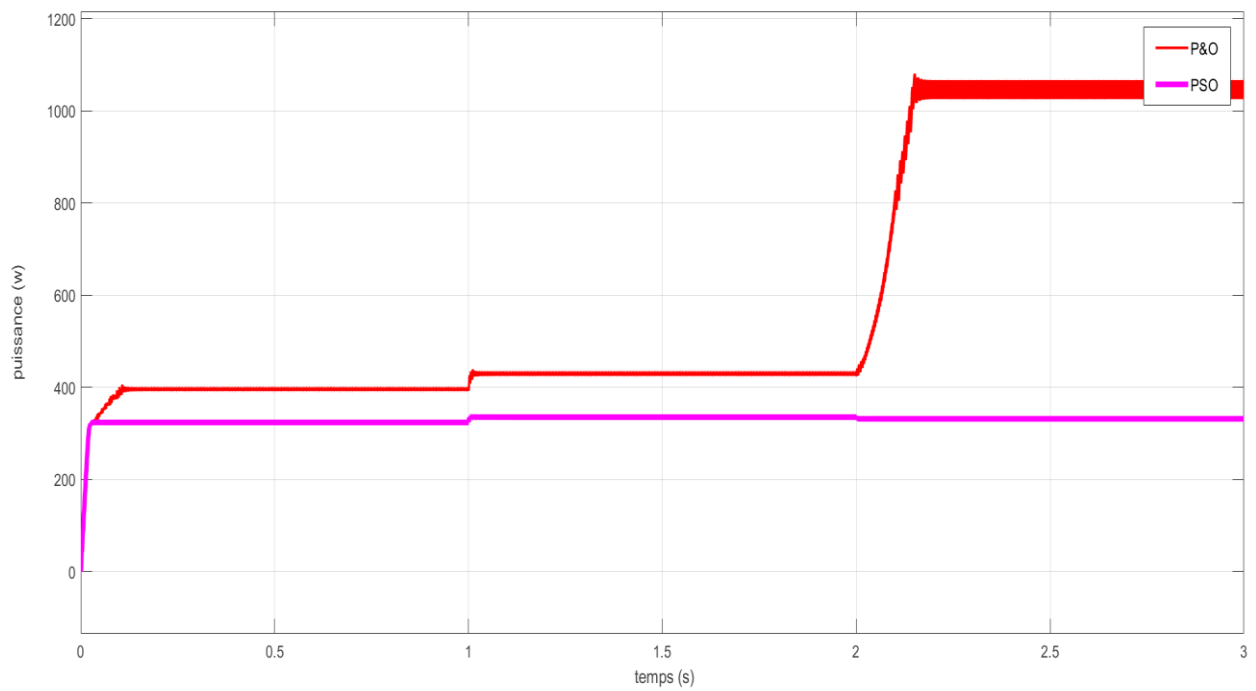


Figure IV. 6 : Variation de la puissance du panneau PV de commande P S O et P&O

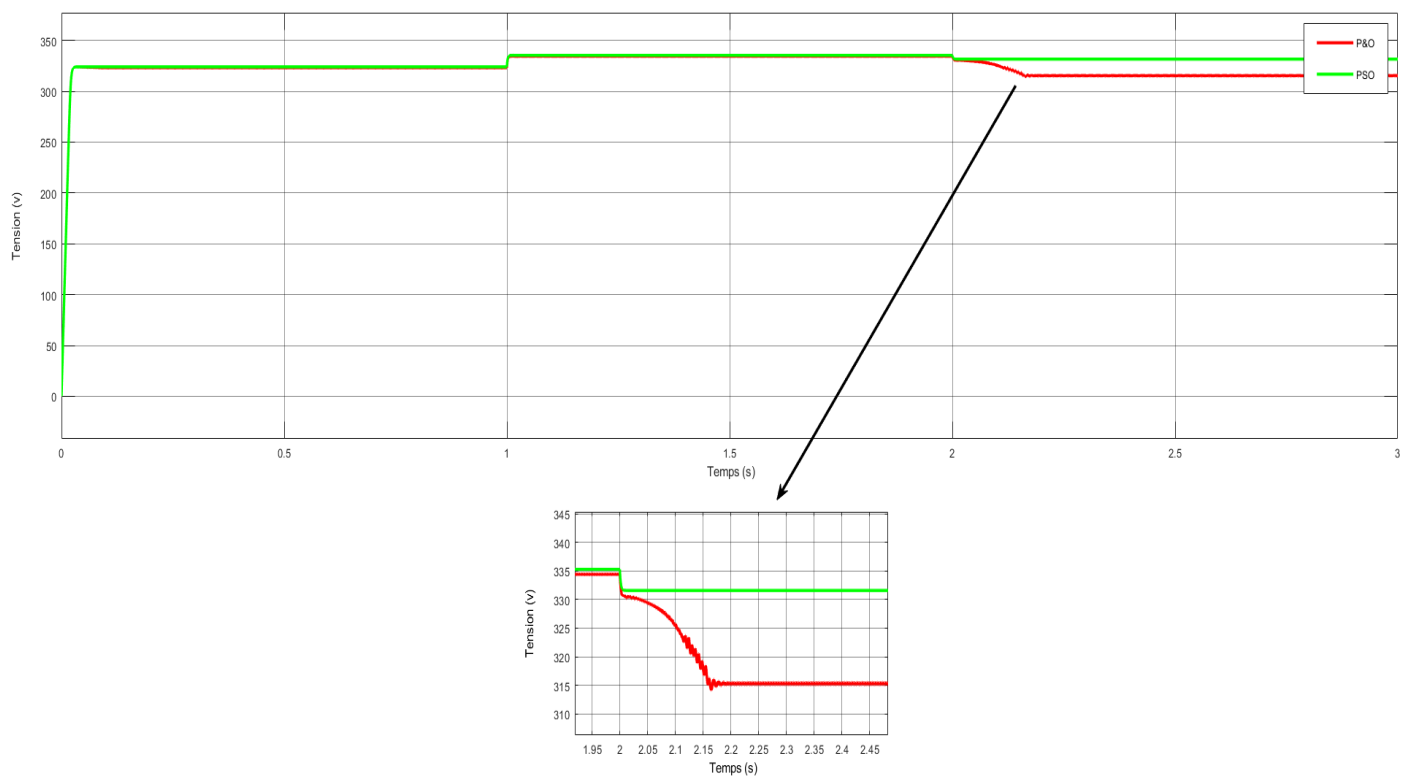


Figure IV. 7 : les allures des Tension sous conditions variable

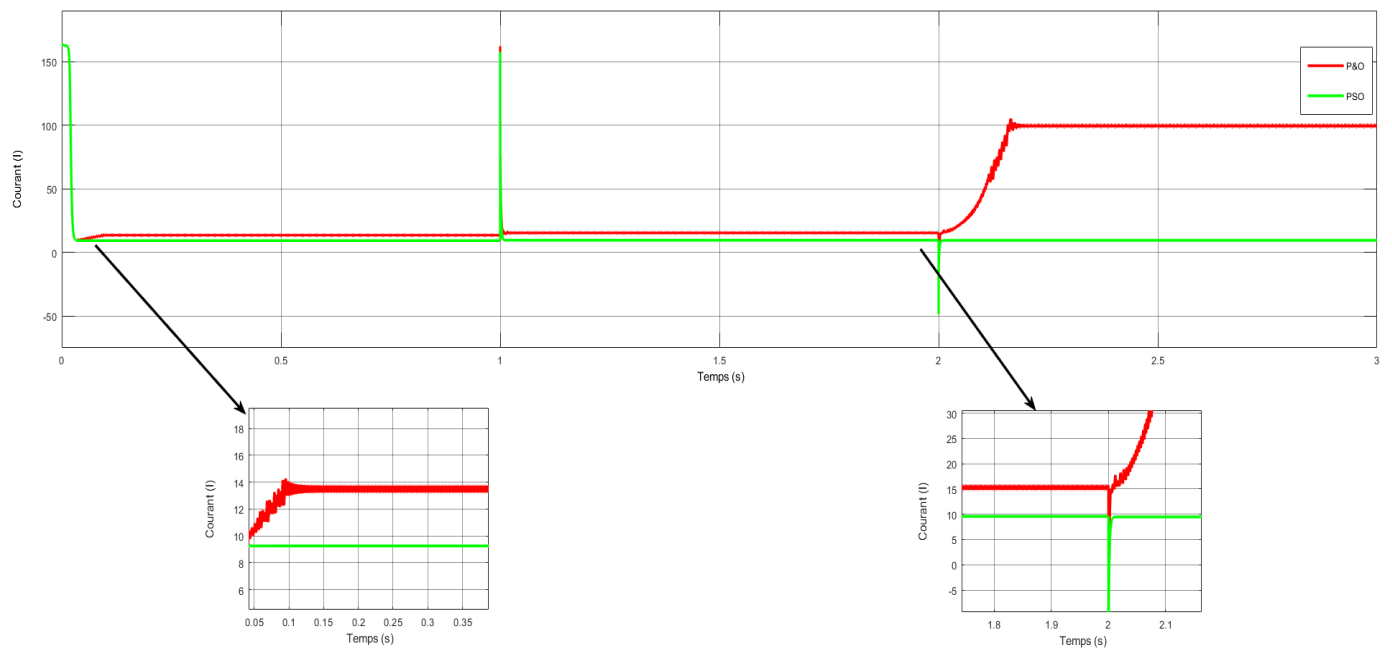


Figure IV. 8 : les allures des courant sous conditions variable

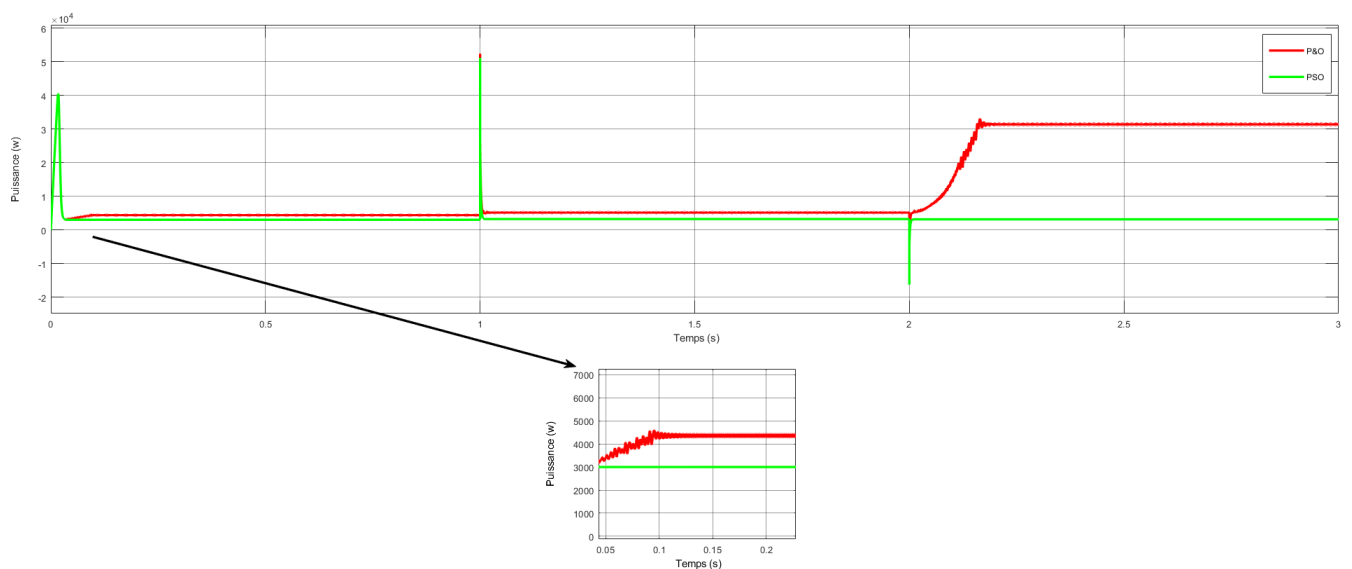


Figure IV. 9 : les allures des puissances sous conditions variable

IV.4 Analyse des résultats :

❖ Algorithme P&O :

Les résultats de tension, courant et puissance montrent que l'algorithme P&O provoque des oscillations notables autour du point de puissance maximale (MPP), en particulier lors de variations soudaines de l'irradiance. On observe des fluctuations périodiques de la tension et du courant, ce qui affecte la stabilité de la puissance délivrée.

Ces oscillations entraînent une perte partielle d'énergie, réduisant ainsi l'efficacité globale du système photovoltaïque.

De plus, l'algorithme nécessite plusieurs cycles de perturbation pour atteindre le point de fonctionnement optimal, ce qui se traduit par un temps de réponse plus long.

❖ Algorithme PSO :

En revanche, les résultats liés à l'algorithme PSO indiquent que la tension et le courant se stabilisent rapidement autour du MPP, sans oscillations significatives. Cette stabilité se reflète directement dans la puissance extraite, qui reste plus constante et plus élevée en moyenne. Cela témoigne de la précision et de l'efficacité du PSO dans le suivi du point de puissance maximale. De plus, le nombre d'itérations nécessaires pour atteindre le MPP est inférieur à celui requis par P&O, ce qui montre un temps de réponse plus court et une meilleure performance énergétique.

IV.5 Discussion comparative des deux méthodes :

La comparaison théorique et pratique révèle un compromis clair entre simplicité et performance. La méthode P&O conserve l'avantage d'une implémentation simple et peu coûteuse. Elle requiert seulement quelques mesures (tension et courant PV) et des calculs élémentaires, ce qui la rend facile à intégrer dans des systèmes embarqués à ressources limitées.

Cependant, cette simplicité conduit à des limites marquées : oscillations de puissance et lenteur de suivi en conditions variables. En contraste, la PSO nécessite des ressources de calcul plus importantes (gestion de populations de particules, fonctions d'évaluation), et son réglage requiert de sélectionner plusieurs paramètres d'essai. Cette complexité rend l'implémentation plus lourde. Néanmoins, son gain en précision et stabilité justifie son usage dans les systèmes exigeant une maximisation de la production. Des études ont montré que le PSO surpasse les méthodes traditionnelles, dont P&O, en termes de performance de suivi.[71]

IV.6 Conclusion :

En conclusion, l'étude comparative montre que le PSO offre des performances de suivi supérieures au P&O dans le cadre étudié.

Le PSO permet d'atteindre et de maintenir le point de puissance maximale avec une meilleure précision et une grande stabilité, en particulier en cas de variation rapide d'irradiance.

La méthode P&O, bien que plus simple et moins coûteuse à mettre en œuvre, souffre d'oscillations inévitables et d'une convergence plus lente vers le MPP.

Le choix entre les deux algorithmes dépendra donc du contexte : pour des systèmes soumis à de forts changements d'ensoleillement et exigeant une extraction énergétique maximale, la PSO est préférable.

Pour des applications plus basiques où la simplicité prime, le P&O peut rester une solution acceptable.

Ce bilan final permet d'éclairer les décisions de conception du contrôleur MPPT selon les exigences de performance et de coût.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion générale

Grâce à sa position géographique privilégiée, l'Algérie figure parmi les pays les plus ensoleillés de la planète. Le vaste désert du Sahara lui confère un potentiel solaire exceptionnel, faisant de l'énergie solaire l'une des principales ressources renouvelables disponibles dans le pays. Toutefois, l'exploitation efficace de cette ressource passe par une meilleure compréhension de son caractère aléatoire, notamment les variations de l'irradiation solaire dues aux conditions climatiques changeantes.

Dans ce contexte, les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans une démarche d'amélioration des performances des systèmes photovoltaïques (PV) utilisant la technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking). L'objectif est de garantir en permanence la production de la puissance maximale possible, en optimisant la chaîne de conversion de l'énergie. En effet, les générateurs photovoltaïques présentent un comportement non linéaire à travers leurs caractéristiques courant-tension (I-V), avec un seul point de fonctionnement optimal qui dépend directement des conditions d'ensoleillement et de température. D'où la nécessité d'un pilotage précis et continu via une commande adaptée, afin de maintenir le générateur dans sa zone de rendement maximal et assurer ainsi une conversion énergétique efficace.

Et pour mettre en œuvre cette amélioration, cet article a étudié la modélisation et la simulation du contrôle MPPT avec Particle Swarm Optimization (*PSO*).

Le premier chapitre a fourni des informations générales sur les systèmes photovoltaïques et a expliqué comment les cellules solaires sont utilisées pour convertir le rayonnement solaire en énergie électrique. J'ai expliqué le principe de la conversion photoélectrique et la chaîne de conversion photoélectrique. Il a été constaté que les performances des modules photovoltaïques sont fortement affectées par les conditions climatiques, en particulier le rayonnement solaire et la température. Pour faire fonctionner le générateur solaire avec un rendement optimal, un transformateur électrostatique doit être connecté entre le générateur et le récepteur. Les contrôleurs MPPT sont souvent utilisés pour s'assurer que les systèmes PV fonctionnent à leur point de puissance maximum. Ces contrôleurs sont conçus pour le suivi PPM afin de réduire l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance de référence variable maximale en fonction des conditions météorologiques.

Conclusion Générale

Le chapitre 2 décrit brièvement la technique de suivi du point de puissance maximale MPPT pour assurer le fonctionnement du système PV à PPM. Initialement, deux méthodes traditionnelles ont été introduites :

Conduction incrémentielle (IncCond) et Perturbation et observation (P&O). Le principal problème avec la technique P&O est l'écart par rapport au véritable point de puissance maximale lorsque l'éclairage fluctue soudainement. Cependant, l'algorithme IncCond est plus complexe que l'algorithme P&O et prend plus de temps à s'exécuter. Ces deux techniques introduisent des fluctuations autour de PPM. Cela signifie que le système est toujours à la recherche de PPM. Par conséquent, il est possible d'utiliser une version avancée de Robuste Control, l'approche Particle Swarm Optimization (*PSO*), pour surmonter les problèmes posés par les méthodes conventionnelles ci-dessus. Nous présentons la modélisation des cellules, des générateurs photovoltaïques et des convertisseurs contrôlés par le schéma de suivi de puissance maximale. Il introduit une méthode qui est un algorithme de perturbation et d'observation, et plusieurs types de convertisseurs DC-DC (convertisseur boost) pour adapter les alimentations et les charges. Un système PV a été simulé pour évaluer les performances du contrôleur MPPT P&O dans diverses conditions environnementales.

Dans le chapitre 3, une méthode avancée a été proposée pour la commande MPPT des systèmes photovoltaïques, basée sur l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization). Cette approche intelligente permet au système de fonctionner de manière stable autour du point de puissance maximale (MPP), tout en offrant une grande robustesse face aux variations d'ensoleillement et de température. Elle permet également de réduire les oscillations observées au niveau de la tension de sortie du convertisseur.

Ce chapitre s'est focalisé sur l'application de l'algorithme PSO au problème de régulation dans les systèmes photovoltaïques. Après avoir présenté les fondements théoriques de cette méthode métaheuristique, nous avons décrit sa mise en œuvre pour optimiser le transfert d'énergie dans la chaîne de conversion. L'algorithme PSO a été utilisé pour rechercher en temps réel le point de puissance maximale, en adaptant dynamiquement le rapport cyclique du convertisseur DC-DC.

Les paramètres du système ont été ajustés en fonction d'un ensemble d'équations non linéaires, en tenant compte à la fois des caractéristiques du générateur photovoltaïque et des contraintes de fonctionnement du convertisseur. La méthode a été testée par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats ont montré que l'utilisation de PSO permet

Conclusion Générale

d'atteindre des performances élevées en matière de précision, de rapidité de réponse et de stabilité du signal de commande

Chapitre 4 : Comparaison entre l'algorithme PSO et la méthode P&O pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT)

Dans ce chapitre, nous avons mené une analyse comparative entre l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire (PSO) et la méthode classique Perturb and Observe (P&O), l'une des techniques les plus répandues dans les systèmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) appliqués aux installations photovoltaïques. Cette comparaison a pour objectif d'évaluer les performances des deux approches en termes de précision, de rapidité de réponse, de stabilité, ainsi que de comportement face aux variations des conditions de fonctionnement.

Après avoir simulé le système et examiné les résultats, nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

- Le rôle du convertisseur DC-DC est de faire correspondre l'alimentation (GPV) et la charge pour obtenir un transfert de puissance maximal. Ceci est rendu possible en ayant le point de fonctionnement à ou très proche de MPP dans toutes les conditions de fonctionnement (irradiance, température, propriétés, charge, etc.) ;
- Un fonctionnement relativement satisfaisant du système PV est obtenu en utilisant le contrôle MPPT.
- Une grande précision et de bons résultats ont été obtenus grâce à l'utilisation de l'algorithme PSO

Enfin, nous voudrions suggérer quelques points de vue pour améliorer cet humble travail :

- Autres méthodes MPPT : logique floue, commande par mode glissant ... ;

L'implémentation pratique

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] E. Saloux, “Optimisation structurelle des systèmes énergétiques.” École Polytechnique de Montréal, 2014.
- [2] S. Abada, “Etude et optimisation d’un générateur photovoltaïque pour la recharge d’une batterie avec un convertisseur sepic.” Université Laval, 2011.
- [3] M. Amarouayache, “Contribution à l’optimisation d’une chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque.” Ph. D. thesis, Constantine 1 University, 2014.
- [4] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, “Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system,” *IEEE Trans. power Electron.*, vol. 16, no. 1, pp. 46–54,
- [5] B. Yang, W. Li, Y. Zhao, and X. He, “Design and analysis of a grid-connected photovoltaic power system,” *IEEE Trans. power Electron.*, vol. 25, no. 4, pp. 992–1000, 2009.
- [6] R. Khanna, Q. Zhang, W. E. Stanchina, G. F. Reed, and Z.-H. Mao, “Maximum power point tracking using model reference adaptive control,” *IEEE Trans. power Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 1490–1499, 2013.
- [7] C. Konstantopoulos and E. Koutroulis, “Global maximum power point tracking of flexible photovoltaic modules,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 2817–2828, 2013.
- [8] S. Petibon, “Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques.” Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2009.
- [9] Aicha ROUABAH, HANANOU, and Fatiha, “Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque,” *Mémoire master, Univ. Ouargla*, 2014.
- [10] M. Becquerel, “Mémoire sur les effets électriques produits sous l’influence des rayons solaires,” *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l’Académie des sciences*, vol. 9, pp. 561–567, 1839.
- [11] J. Thibaud, “Les spectres gamma caractéristiques et leur effet photoélectrique,” 1925.
- [12] A. Sorokin, S. Bobashev, T. Feigl, K. Tiedtke, H. Wabnitz, and M. Richter, “Photoelectric effect at ultrahigh intensities,” *Physical review letters*, vol. 99, no. 21, p. 213002, 2007.
- [13] D. M. Chapin, C. Fuller, and G. Pearson, “A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power,” *Journal of Applied Physics*, vol. 25, no. 5, pp. 676–677, 1954.
- [14] V. M. Puri and F. Costello, “Domestic solar energy systems for Delaware,” tech. rep., Delaware Univ., Newark (USA). Dept. of Biological Sciences, 1973.

Références bibliographiques

- [15] J. Arnett, L. Schaffer, J. Rumberg, and R. Tolbert, "Design, installation and performance of the arco solar one-megawatt power plant," in *5th Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 314–320, 1984.
- [16] R. Miles, K. Hynes, and I. Forbes, "Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues," *Progress in crystal growth and characterization of materials*, vol. 51, no. 1-3, pp. 1–42, 2005.
- [17] Ekwateur. (n.d.). *L'énergie solaire : comment ça marche ?* Récupéré le [2.20.2025], à partir de https://ekwateur.fr/blog/transition-energetique/energie-solaire/?utm_source=chatgpt.com.
- [18] T. Esum, J. W. Kimball, P. T. Krein, P. L. Chapman, and P. Midya, "Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control," *IEEE Trans. power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1282–1291, 2006.
- [19] L. F. BENDJOUDI Faouzi, "Etude et Conception D'un Système de Pompage Photovoltaïque Avec Stockage Electrochimique," 2014.
- [20] B. Equer, "le pompage photovoltaïque manuel de cours," *énergie Sol. photovoltaïque ellipses*, vol. 18, 1993.
- [21] Benkhira Aboutahar Elmouatassim, Salmi Ahmed, "Commande avancée d'un système photovoltaïque," Mémoire master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2023.
- [22] C. Cabal, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque." Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.
- [23] R. Faranda and S. Leva, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS Trans. power Syst.*, vol. 3, no. 6, pp. 446–455, 2008.
- [24] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, and B. Chikh-Bled, "'etude de la jonction pn d'un semiconducteur à l'équilibre thermodynamique'," *Journal of Electron Devices*, vol. 5, pp. 122–126, 2007.
- [25] M. Taherbaneh, G. Farahani, and K. Rahmani, "Evaluation the accuracy of one-diode and two-diode models for a solar panel based open-air climate measurements," *Solar Cells-Silicon Wafer-Based Technologies*, vol. 4, pp. 201–228, 2011.
- [26] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system," *IEEE Trans. power Electron.*, vol. 16, no. 1, pp. 46–54, 2001.
- [27] O. Boukli-Hacene, "Conception et realisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleur gestion énergétique." 2011.

Références bibliographiques

- [28] M. Bouafia and L. Deblaoui, “Modélisation et simulation d’une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d’Indium et de Gallium (CIGS),” *Mémoire Master Prof. Univ. Kasdi Merbah. Ouargla*, 2012.
- [29] B. DENDIB, “Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïques : étude comparative.” Thèse, Université Ferhat Abbès-Sétif, 2017.
- [30] S. Diaf, “Intégration des systèmes à sources renouvelables d’énergie pour la production décentralisée d’électricité en site isolé.” Alger, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2009.
- [31] M. Z. F.Z. Zerhoun, "Optimisation d’un système à énergie verte avec validation pratique," revue des énergies renouvelables, vol. 11, no. N°1, p. 41–49, 2008.
- [32] A. Saadi, "Etude comparative entre les techniques d’optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [33] S. Brigand, « principe du photovoltaïque », complément technique 2008, www.Editionsdumondeur.com
- [34] Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons.
- [35] Green, M. A. (1982). *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Prentice-Hall.
- [36] Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons.
- [37] Honsberg, C., & Bowden, S. (2020). *Photovoltaics: Devices, Systems and Applications*.
- [38] YAHYA, A. Ould Mohamed, MAHMOUD, A. Ould, et YOUM, I. « Etude et modélisation d’un générateur photovoltaïque » *Revue des énergies renouvelables*, 2008, vol. 11, no 3, p. 473-483.
- [39] S. Hegedus and A. Luque, “Handbook of photovoltaic science and engineering,” 2003.
- [40] A. Belkaid, “conception et implémentation d’une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome.” 2018
- [41] A. AZIZI, “Modélisation et optimisation d’un système de production d’énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride.” Université de Annaba-Badji Mokhtar, 2019.
- [42] L. Abbassen, “Etude de la connexion au réseau électrique d’une centrale photovoltaïque.” Université Mouloud Mammeri, 2011.

- [43] B. Fatima, “Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l’intégration d’un générateur PV à stockage dans un réseau électrique,” *Univ. Abdelhamid Ibn Badis Most.*, 2018.
- [44] D. Salim, “Simulation d’un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone,” *Univ. Ferhat Abbas Sétif*, 2011.
- [45] S. Hegedus and A. Luque, “Handbook of photovoltaic science and engineering,” 2003.
- [46] A. Belkaid, “conception et implémentation d’une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome.” 2018.
- [47] A. Rufer and P. Barrade, “Cours d’électronique de puissance-Conversion DC/DC,” *Ec. Polytech. Fédérale Lausanne (EPFL), Lausanne, Suisse*, 2001.
- [48] Z. Seyfeddine and O. M. Mohamed, “Etude et simulation d’un hacheur Boost pour suivre le point de puissance maximal (MPPT)”.
- [49] H. C. Lasgaa, “Commande d’un convertisseur DC-DC dans les applications de pile à combustible”.
- [50] S. Messalti, “A new neural networks MPPT controller for PV systems,” in *IREC2015 the sixth international renewable energy congress*, 2015, pp. 1–6.
- [51] A. Harrag and S. Messalti, “Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 1247–1260, 2015.
- [52] A. Loukriz, S. Messalti, and A. Harrag, “Design, simulation, and hardware implementation of novel optimum operating point tracker of PV system using adaptive step size,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 101, pp. 1671–1680, 2019.
- [53] A. Loukriz, M. Haddadi, and S. Messalti, “Simulation and experimental design of a new advanced variable step size Incremental Conductance MPPT algorithm for PV systems,” *ISA Trans.*, vol. 62, pp. 30–38, 2016.
- [54] A. Harrag and S. Messalti, “New Combined Fuzzy-IC Variable Step Size MPPT Reducing Steady State Oscillations,” in *International Conference in Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*, 2018, pp. 376–383.
- [55] T. Logeswaran and A. SenthilKumar, “A review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems under uniform and non-uniform irradiances,” *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 228–235, 2014.

Références bibliographiques

- [56] A. D. Martin and J. R. Vazquez, "MPPT algorithms comparison in PV systems: P&O, PI, neuro-fuzzy and backstepping controls," in *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015, pp. 2841–2847.
- [57] Touil Nacer Eddine, Ghenbazi Slimane, "Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque," Mémoire master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [58] T. Noguchi, S. Togashi, and R. Nakamoto, "Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 217–223, 2002.
- [59] F. Cheddadi, I. Boumhidi, and S. Sefriti, "Comparaison entre la Commande MPPT par mode glissant et la Perturbation et Observation pour les systèmes Photovoltaïques," in *IMAT3E'18 International Meeting on Advanced Technologies in Energy and Electrical Engineering*, 2018.
- [60] H. Boumaaraf, "Modélisation et commande numérique d'un système photovoltaïque connecté au réseau." Alger, 2010.
- [61] H. BOUZERIA, "Modélisation et commande d'une chaine de conversion photovoltaïque." Université de Batna 2, 2016.
- [62] S. Xu, R. Shao, B. Cao, and L. Chang, "Sinwgle-phase grid-connected PV system with golden section search-based MPPT algorithm," *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 25–36, Dec. 2021, <https://doi.org/10.23919/CJEE.2021.000035>.
- [63] X. Li, H. Wen, Y. Hu, Y. Du, and Y. Yang, "A Comparative Study on Photovoltaic MPPT Algorithms Under EN50530 Dynamic Test Procedure," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 4, pp. 4153–4168, Apr. 2021, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3024211>.
- [64] L. Liu, C. Huang, J. Mu, J. Cheng, and Z. Zhu, "A P&O MPPT With a Novel Analog Power-Detector for WSNs Applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, no. 10, pp. 1680–1684, Oct. 2020, <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2940212>.
- [65] M. J. Alshareef, "An Effective Falcon Optimization Algorithm Based MPPT Under Partial Shaded Photovoltaic Systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 131345–131360, 2022, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3226654>.
- [66] K. Y. Yap, C. R. Sarimuthu, and J. M.-Y. Lim, "Artificial Intelligence Based MPPT Techniques for Solar Power System: A review," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 6, pp. 1043–1059, Nov. 2020, <https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000159>.

Références bibliographiques

- [67] : Hadji Slimane, « Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque », Electronique, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018, Thèse de doctorat.
- [68] A. P. Engelbrecht. Computational intelligence. An introduction. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2007.
- [69] J. Kennedy, R.C. Eberhart. Particle swarm optimization. In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV, pp. 1942-1948, Piscataway, NJ, 1995.
- [70] https://www.researchgate.net/publication/378606665_PERFORMANCE_ANALYSIS_OF_PO_AND_PSO_MPPT_ALGORITHMS_FOR_PV_SYSTEMS_UNDER_PARTIAL_SHADING
- [71] https://www.researchgate.net/publication/374961697_Comparative_Study_of_MPPT_Algorithms_PO_INC_and_PSO_for_PV_System_Optimization
- [72] A. Boudia, “Contribution à l’étude d’un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec un système de stockage à base d’une inductance supraconductrice (SMES).” Univ M’sila, 2020.

ANNEXES

ANNEXES

Équations de base du PSO :

$$v_{ij}^{t+1} = wv_{ij}^t + c_1r_{1ij}^t(pbest_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2r_{2ij}^t(Gbest_j^t - x_{ij}^t) \quad (III.3)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (III.4)$$

Caractéristiques des panneaux solaires utilisés :

Maximum power P_{max}	200 W
Maximum power voltage V_{mp}	26.3 V
Maximum power curent I_{mp}	7.61 A
Short circuit curent I_{sc}	8.21 A
Open circuit voltage V_{oc}	32.9 V
Celles per module	54