

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

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département ELECTRONIQUE

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : ELECTRONIQUE

Spécialité : Industrie Electronique

Par

➤ **Abderrahim BENMEDDAH**

➤ **Khaled LAIDI**

Intitulé

*Optimisation de l'algorithme MPPT pour un système photovoltaïque en
intégrant de nouvelles techniques d'intelligence artificielle*

Soutenu le : 28 / 06 / 2025

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. BENDIB Sara</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BOUDRAA khadidja</i>	<i>MAA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. ZEROUGUI Raouf</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Louange à Dieu qui nous a accordé la force, la patience et la persévérance pour mener à bien ce travail et franchir cette étape importante de notre parcours universitaire.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrante M.BOUDRAA khadidja pour son accompagnement, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce mémoire. Sa bienveillance et ses orientations précieuses ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à tous les enseignants du département de Industrie Electronique, pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont transmis durant nos années de Master.

Nous exprimons toute notre gratitude à nos familles respectives, en particulier à nos parents, pour leur soutien moral, leurs sacrifices et leurs prières constantes. Leur confiance en nous a été une source inestimable de motivation. Nous remercions aussi nos camarades, collègues et amis pour leur aide, leurs encouragements et les bons moments partagés, qui ont rendu ce parcours plus agréable.

Enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail, veuillez recevoir l'expression de notre profonde reconnaissance.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes parents, Pour leur amour infini, leurs sacrifices silencieux et leur soutien inébranlable. Ce mémoire est le fruit de leur patience et de leurs prières.

À ma famille, Pour leur tendresse, leur compréhension et leur encouragement tout au long de mon parcours.

À mes enseignants, Pour leur professionnalisme, leur encadrement précieux et la qualité du savoir qu'ils m'ont transmis avec passion.

À mes amis, Pour leur présence rassurante, leur soutien moral et les instants sincères partagés durant ces années.

Et tout particulièrement, À l'Union Générale des Étudiants Libres (UGEL), dont j'ai eu l'honneur d'être un militant actif.

À tous les frères et sœurs de lutte au sein du bureau du wilaya de Bordj Bou Arreridj,

merci pour les moments de fraternité, d'apprentissage, et pour l'esprit d'engagement que nous avons partagé.

Ce travail est aussi l'écho de nos convictions, de notre militantisme étudiant et de notre volonté commune de servir l'université algérienne.

Avec toute ma gratitude et mon profond respect.

-Abderrahim BENMEDDAH-

Dédicaces

*À ceux dont les prières ont été le secret de ma réussite,
À ceux qui ont veillé pour moi et supporté les difficultés de la vie avec patience et
résignation...*

*À ceux qui ont semé dans mon cœur l'amour de l'ambition et planté dans mon
esprit les graines de l'espoir...*

*À mes chers parents, je dédie ce travail en signe de loyauté et de profonde
gratitude.*

*À ma famille, soutien indéfectible et source inépuisable d'amour et
d'encouragement.*

*À mes enseignants,
qui n'ont jamais ménagé leurs efforts pour me transmettre leur savoir et leurs
conseils, et qui ont été des phares éclairant mon chemin vers la connaissance.*

*À mes amis et compagnons de route,
qui ont partagé avec moi joies et épreuves, et m'ont toujours soutenu dans les
moments difficiles.*

*Et à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont encouragé, ne serait-ce que par une
bonne parole...*

*Je dédie le fruit de ce travail en reconnaissance à tous ceux qui ont contribué, de
près ou de loin, à la réalisation de cet accomplissement.*

- Laidi KHALED -

Résumé

L'objectif principal de ce travail de Master est d'optimiser le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans un système photovoltaïque. Il s'appuie sur l'intégration d'algorithmes d'intelligence artificielle tels que PSO, FLC et ANN, afin de maximiser l'efficacité énergétique dans diverses conditions de fonctionnement. Les performances de ces techniques sont comparées à celles de la méthode classique P&O. Les algorithmes sont implémentés et testés dans un environnement Simulink, à travers plusieurs scénarios : variation de l'irradiance et changement de charge. Les approches intelligentes se distinguent par une meilleure réactivité, stabilité et précision. Les résultats obtenus confirment la pertinence des techniques d'intelligence artificielle pour le pilotage optimal des systèmes photovoltaïques.

Mots clés : Photovoltaïque, Hacheur Boost, MPPT, P&O, Intelligence artificielle(AI), PSO, FLC, ANN, MATLAB/Simulink.

المخلص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحسين تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) في نظام شمسي ضوئي. يعتمد هذا العمل على دمج خوارزميات الذكاء الاصطناعي مثل PSO، FLC و ANN بهدف تعظيم الكفاءة الطاقوية في ظروف تشغيل مختلفة. يتم مقارنة أداء هذه التقنيات مع الطريقة الكلاسيكية P&O. تم تنفيذ واختبار الخوارزميات في بيئة Simulink من خلال عدة سيناريوهات: تغيير الإشعاع الشمسي وتغيير الحمولة. تتميز التقنيات الذكية بسرعة الاستجابة، والثبات، والدقة. تؤكد النتائج المحصل عليها فاعلية تقنيات الذكاء الاصطناعي في التحكم الأمثل للأنظمة الكهروضوئية.

كلمات البحث: الطاقة الشمسية الضوئية، محول بوست (Hacheur Boost)، تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT)، طريقة P&O، الذكاء الاصطناعي (AI)، خوارزمية PSO، المنطق الضبابي (FLC)، الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، برنامج MATLAB/Simulink.

Abstract

The main objective of this Master's work is to optimize the Maximum Power Point Tracking (MPPT) in a photovoltaic system. It relies on the integration of artificial intelligence algorithms such as PSO, FLC, and ANN to maximize energy efficiency under various operating conditions. The performance of these techniques is compared to the conventional P&O method. The algorithms are implemented and tested in a Simulink environment through several scenarios, including irradiance variation and load changes. Intelligent approaches demonstrate better responsiveness, stability, and accuracy. The results confirm the relevance of artificial intelligence techniques for the optimal control of photovoltaic systems.

Keywords: Photovoltaic, Boost Converter, MPPT, P&O, Artificial Intelligence (AI), PSO, FLC, ANN, MATLAB/Simulink

Table des matières

Liste des Figures	1
Liste des Tableau	2
Liste des Abréviation	3
Introduction Générale.....	5
CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques et le MPPT.....	7
I.1 Introduction	7
I.2 Energie Solaire	7
I.3 Système photovoltaïque	8
I.4 Classification des systèmes photovoltaïques.....	9
I.4.1 Système isolé ou autonome	9
I.4.2 Système raccordé au réseau.....	10
I.5 principe de conversion photovoltaïque	10
I.5.1 Absorption de la lumière et création d'une paire électron-trou	10
I.5.2 Séparation de la paire électron-trou sous l'effet d'un champ électrique induit	11
I.5.3 Transport des charges vers les électrodes.....	11
I.5.4 Collecte des charges et génération du courant électrique	11
I.6 Panneau photovoltaïque.....	12
I.6.1 Caractéristique électrique d'un panneau photovoltaïque.....	12
I.6.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	14
I.6.3 Classification de cellules solaires	15
I.6.4 Rendement des cellules.....	18
I.7 Convertisseur statique (les hacheur)	18
I.7.1 Définition	18
I.7.2 Principe de fonctionnement des hacheurs DC/DC	18
I.7.3 Hacheur Boost	19
I.8 Principes de Fonctionnement des Algorithmes MPPT Classiques	21
I.8.1 Principes de Fonctionnement	21
I.8.2 Influence des variations climatiques sur les Systèmes Photovoltaïques.....	22
I.9 Les Techniques Classiques de MPPT	22
I.9.1 Méthode Perturb & Observe (P&O)	22
I.9.2 Méthode de la Conductance Incrémentale (INC)	25
I.9.3 Méthode de la Tension de Circuit Ouvert (Voc)	28
I.10 Comparaison et Performances des Techniques Classiques	30
I.10.1 comparaison des méthodes MPPT	30
I.10.2 Critères de sélection d'un algorithme MPPT	30
I.11 Limites des Techniques Classiques et Perspectives d'Amélioration	31
I.11 Conclusion	31

CHAPITRE II : Optimisation de l'algorithme MPPT	33
II.1 Introduction	33
II.2 Concepts généraux de l'optimisation.....	33
II.2.1 Définition de l'optimisation	33
II.2.2 Quelques axes d'optimisation possibles.....	34
II.2.3 Objectifs de l'optimisation dans les systèmes PV	34
II.3 Présentation des algorithmes d'IA pour l'optimisation	35
II.3.1 définition	35
II.3.2 Classification des algorithmes d'AI pour l'optimisation	35
II.4 Logique floue (Fuzzy Logic)	36
II.4.1 Principe de base.....	36
II.4.2 Application au MPPT.....	37
II.4.3 Exemple de fonctionnement	38
II.5 Réseaux de neurones (ANN)	38
II.5.1 Principe de base.....	38
II.5.2 Application au MPPT.....	39
II.6 PSO	39
II.6.1 Principe de base.....	39
II.6.2 Application au MPPT.....	40
II.6.3 Exemple de fonctionnement	40
II.7 Comparaison des trois approches.....	41
II.8 Conclusion.....	41
Chapitre III : Simulation et analyse des performances d'un algorithme MPPT amélioré	43
III.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	43
III.2.2 Simulation du panneau Kyocera Solar KC200GT	45
III.2.3 Influence des différents paramètres	46
III. 3 Modélisation et Simulation d'un hacheur BOOST.....	48
III.3.1 Phases de fonctionnement	48
III.3. 3 Simulation du hacheur BOOST.....	49
III.4 Comparaison entre les techniques MPPT	50
III.4.1 Indicateurs de performance pour l'évaluation des algorithmes MPPT	51
III.4.2 Scénarios de test pour l'évaluation des algorithmes MPPT	51
III.4.3 Analyse comparative des méthodes MPPT	57
III.5 Conclusion.....	58
Conclusion Générale	60
Bibliographie	61

Liste des Figures

Figure II. 1 Optimisation des algorithmes MPPT : Principaux axes d'amélioration.....	34
Figure I. 1 L'énergie solaire photovoltaïque.....	7
Figure I. 3 schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC).....	8
Figure I. 4 Schéma d'un système photovoltaïque en mode autonome.....	9
Figure I. 5 Mode d'exploitation d'un système photovoltaïque connecté au réseau.....	10
Figure I. 6 Génération de la paire électron-trou.....	11
Figure I. 7 Les étages de Panneau photovoltaïque.....	12
Figure I. 8 Caractéristique électrique d'un panneau photovoltaïque.....	13
Figure I. 9 facteur de forme pour une cellule PV.....	14
Figure I. 10 Structure d'un cellule photovoltaïque.....	15
Figure I. 11 Classification de la cellule photovoltaïque fondée sur du matériau photovoltaïque.....	15
Figure I. 12 cellules photovoltaïques sont fabrique à silicium monocristallin.....	16
Figure I. 13 cellules photovoltaïques sont fabriquées à silicium polycristallin.....	16
Figure I. 14 La cellule en silicium amorphe.....	17
Figure I. 15 Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	18
Figure I. 16 Principe de base d'un hacheur.....	19
Figure I. 17 Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	19
Figure I. 18 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.....	20
Figure I. 19 Courbes I-V et P-V d'un module photovoltaïque sous différentes irradiations.....	22
Figure I. 20 la courbe de puissance-Tension de panneau solaire.....	23
Figure I. 21 Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation.....	24
Figure I. 22 Organigramme de l'algorithme de Conductance Incrémentale.....	26
Figure I. 23 Caractéristique courant-tension (IV) et puissance-tension (PV) d'un panneau photovoltaïque.....	28
Figure I. 24 Organigramme de l'algorithme FCO.....	29
Figure II. 1 Optimisation des algorithmes MPPT : Principaux axes d'amélioration.....	34
Figure III. 1 Modèle de cellule photovoltaïque idéal.....	44

Figure III. 2 Modèle de la cellule photovoltaïque réel	44
Figure III. 3 Caractéristiques du panneau KC200GT (a) Caractéristique P(V) et I(V).....	46
Figure III. 4 Influence de flux lumineux sur les caractéristiques P(v) et I(v)	47
Figure III. 5 Influence de la température sur les caractéristiques P(V) et I(V).....	47
Figure III. 6 Circuit d'un hacheur BOOST	48
Figure III. 7 Circuit idéal d'un hacheur BOOST avec interrupteur fermé.....	48
Figure III. 8 Circuit d'un hacheur BOOST avec interrupteur ouvert	49
Figure III. 9 Schéma de hacheur BOOST sous Simulink	50
Figure III. 10 Modèle Simulink d'un système photovoltaïque avec hacheur boost et intégration de plusieurs algorithmes MPPT (P&O, PSO, ANN, FLC).....	51
Figure III. 11 Comparaison des techniques MPPT dans un environnement stable.....	52
Figure III. 12 Comparaison de la puissance de sortie des différentes techniques MPPT lors d'un changement lent d'ensoleillement.....	53
Figure III. 13 Évolution de la puissance de sortie pour différentes techniques MPPT lors d'une variation brusque de l'irradiance.....	55
Figure III. 14 l'évolution de la puissance en fonction de la variation des charges pour les différentes techniques de commande MPPT	56

Liste des Tableau

Tableau I. 1 Comparaison des types de cellules solaires	17
Tableau I. 2 Différents types des cellules avec leur rendement.....	18
Tableau I. 3 Tableau comparatif des méthodes MPPT	30
Tableau II. 1 Comparaison des trois approches	41
Tableau III. 1 Paramètres du Kyocera Solar KC200GT dans S.T.C.....	45
Tableau III. 2 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 1).....	52
Tableau III. 3 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 2).....	53
Tableau III. 4 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 3).....	55
Tableau III. 5 Variation des charges	56
Tableau III. 6 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 5).....	57
Tableau III. 7 Analyse comparative des méthodes MPPT selon différents scénarios	58

Tableau III. 1 Paramètres du Kyocera Solar KC200GT dans S.T.	45
Tableau III. 2 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 1).....	52
Tableau III. 3 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 2).....	53
Tableau III. 4 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 3).....	55
Tableau III. 5 Variation des charges	56
Tableau III. 6 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 5).....	57
Tableau III. 7 Analyse comparative des méthodes MPPT selon différents scénarios	58

Liste des Abréviation

MPPT	Maximum Power Point Tracking
GPV	Générateur photovoltaïque
I_{cc}	Courant de court-circuit
V_{CO}	Tension à circuit ouvert
η	Rendement énergétique
α	le rapport cyclique
P&O	perturbation et d'observation
INC	Conductance Incrémentale
PSO	Optimisation par essais particulaires
GA	Algorithme génétique
ANN	réseaux de neurones artificiels
FLC	Fuzzy Logic Controller
I_{ph}	Courant équivalent proportionnel à l'ensoleillement reçu par le module PV
STC	Conditions de Testes Standards
V_{mpp}	Tension au point de puissance maximale
IA	Intelligence Artificielle
FCO	Fraction de la tension du circuit ouvert
C	Condensateur
L	Inductance
T	Température [°C]
P_{max}	Puissance maximale pouvant être délivrée par le système

Introduction

Générale

Introduction Générale

Face aux enjeux environnementaux croissants, la transition énergétique vers des sources renouvelables s'impose comme une priorité mondiale. L'énergie solaire photovoltaïque, en tant que ressource propre, inépuisable et de plus en plus accessible, occupe une place centrale dans cette mutation énergétique. Cependant, son efficacité dépend fortement de la capacité à suivre le point de puissance maximale (MPPT), face à un rayonnement solaire variable. L'optimisation de cette technique est donc cruciale pour améliorer le rendement des systèmes photovoltaïques[1].

Les techniques MPPT classiques comme P&O ou Conductance Incrémentale, bien que largement utilisés, montrent des limites en conditions variables[1,2]. Pour y remédier, des approches basées sur l'intelligence artificielle, telles que la logique floue, les réseaux de neurones (ANN) et les algorithmes évolutionnaires comme le PSO (Particle Swarm Optimization) et GA (Genetic Algorithm), offrent de meilleures performances en termes de rapidité, précision et robustesse.

Ce travail de fin d'études a pour objectif de concevoir, implémenter et analyser une méthode d'optimisation avancée du MPPT, en intégrant des techniques d'intelligence artificielle adaptées à un système photovoltaïque. Il s'agit non seulement de comprendre les limites des approches classiques, mais aussi de démontrer, à travers la modélisation et la simulation, la pertinence des algorithmes intelligents dans le suivi dynamique du point de puissance maximale.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le Chapitre I présente les généralités sur les systèmes photovoltaïques, leur fonctionnement, ainsi que les principes de base du suivi du point de puissance maximale (MPPT).

Le Chapitre II est consacré aux méthodes d'optimisation du MPPT, en mettant l'accent sur les approches intelligentes, notamment les algorithmes PSO, FLC et ANN.

Le Chapitre III regroupe les simulations sous Simulink et l'analyse comparative des performances de ces techniques dans différents scénarios, afin d'évaluer leur efficacité et leur pertinence.

À travers ce mémoire, nous cherchons à contribuer modestement à l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques en tirant parti des avancées récentes en intelligence artificielle.

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques et le MPPT

CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques et le MPPT

1.1 Introduction

Les systèmes photovoltaïques permettent la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Ils se composent généralement de modules solaires, de convertisseurs d'énergie et, dans certains cas, de dispositifs de stockage. Cependant, la puissance fournie par un générateur photovoltaïque dépend fortement des conditions environnementales comme l'irradiance solaire et la température. Pour exploiter au mieux l'énergie disponible, il est nécessaire d'utiliser des algorithmes de suivi du point de puissance maximale, connus sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ce chapitre présente les concepts fondamentaux liés aux systèmes photovoltaïques, leurs composants principaux. Il introduit également la notion de suivi du point de puissance maximale (MPPT), souvent intégré dans les systèmes pour améliorer l'exploitation de l'énergie solaire [1].

1.2 Energie Solaire

L'énergie solaire prend naissance au cœur du Soleil, où des réactions de fusion nucléaire libèrent une immense quantité d'énergie sous forme de rayonnement. Ce rayonnement solaire se compose de photons, les particules fondamentales qui transportent cette énergie à travers l'espace sous différentes formes : ondes radio, lumière visible, rayons gamma, etc.

Par extension, le terme « énergie solaire » désigne également l'énergie produite à partir du rayonnement solaire, qu'il s'agisse d'électricité ou de chaleur, selon les technologies employées [1,2,3].

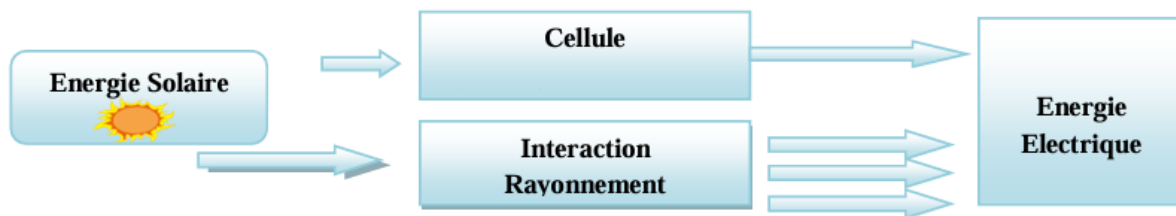


Figure I. 1 L'énergie solaire photovoltaïque

1.3 Système photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée.

Le système photovoltaïque est une technologie qui convertit directement l'énergie solaire en énergie électrique en utilisant l'effet des cellules photovoltaïques. Ce système est utilisé pour fournir de l'électricité aux maisons, aux installations industrielles, aux infrastructures publiques et même pour alimenter les réseaux électriques nationaux [3].

1.3.1 Composants du système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est composé de quatre éléments principaux [2,3]:

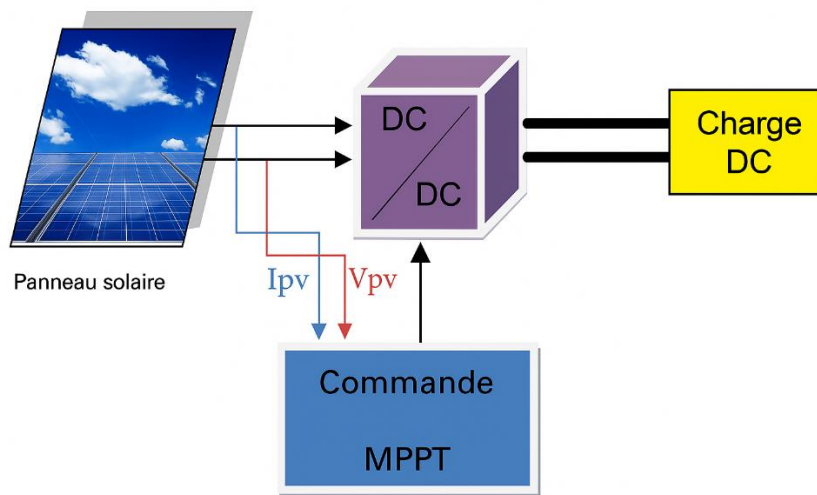


Figure I. 2 schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)

➤ **Les panneaux solaires (La source principale d'énergie)**

Composés de cellules photovoltaïques, ils convertissent la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

Ils produisent un courant continu (DC) qui doit être traité pour être adapté à l'utilisation.

➤ **Le convertisseur électrique (DC-DC)**

Il transforme le courant continu provenant des panneaux en un autre courant continu avec une tension différente (DC-DC) ou en courant alternatif (AC) selon les besoins.

Il assure l'adaptation d'impédance pour maximiser l'extraction d'énergie des panneaux solaires.

➤ **La charge électrique (Le consommateur d'énergie)**

Il peut s'agir d'appareils domestiques, d'équipements industriels ou même du réseau électrique public.

Selon l'usage, certains équipements nécessitent du courant alternatif (AC), tandis que d'autres fonctionnent avec du courant continu (DC).

➤ **Le système de commande (Unité de gestion et de surveillance)**

Il contrôle le fonctionnement du système afin d'assurer une efficacité maximale. Il surveille en permanence les conditions de fonctionnement, telles que l'intensité du rayonnement solaire et la température, et ajuste les convertisseurs en conséquence pour maintenir des performances stables.

Dans certains systèmes, des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont intégrées afin d'extraire la quantité maximale d'énergie disponible à partir des panneaux solaires [3].

1.4 Classification des systèmes photovoltaïques

1.4.1 Système isolé ou autonome

Les systèmes isolés ou autonomes fonctionnent 24h/24 exclusivement grâce à l'énergie solaire convertie en électricité, sans recourir à aucune autre source d'alimentation. Ces systèmes reposent sur plusieurs composants essentiels, mais les batteries jouent un rôle clé en permettant le stockage de l'énergie électrique. Elles assurent ainsi une alimentation continue, même en l'absence de soleil, garantissant l'autonomie du système [4].

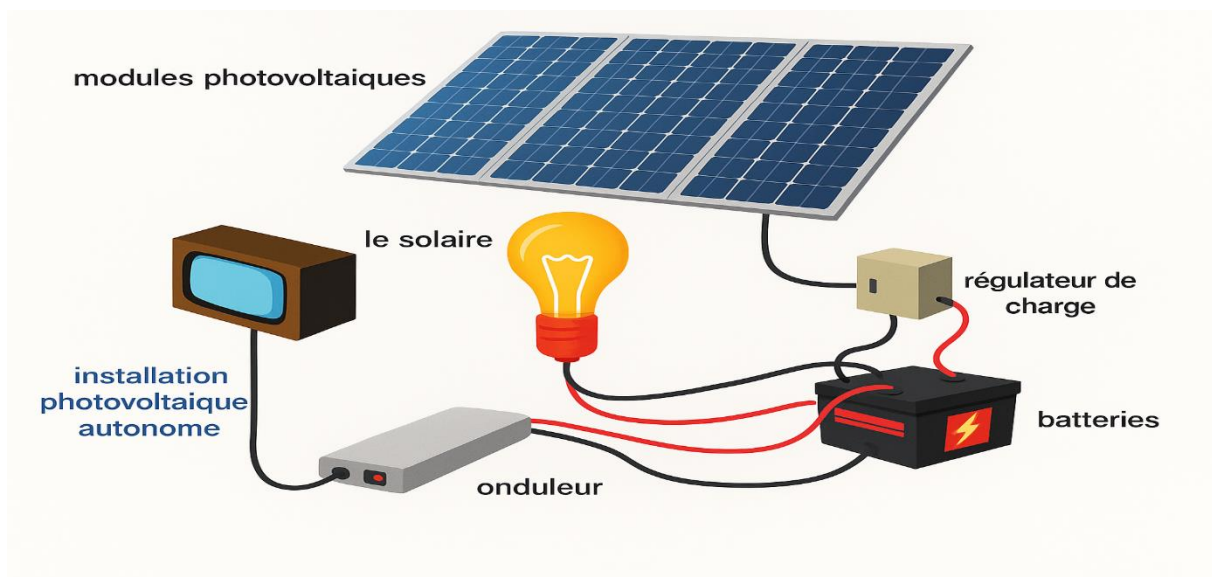


Figure I. 3 Schéma d'un système photovoltaïque en mode autonome

1.4.2 Système raccordé au réseau

Un système photovoltaïque connecté au réseau est un système directement relié au réseau électrique grâce à un onduleur.

Ce type de système présente de nombreux avantages pour le producteur/consommateur, car c'est le réseau électrique qui assure l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. Ainsi, l'énergie excédentaire peut être injectée dans le réseau, et en cas de besoin, l'utilisateur peut compléter son approvisionnement en électricité à partir du réseau public[4].

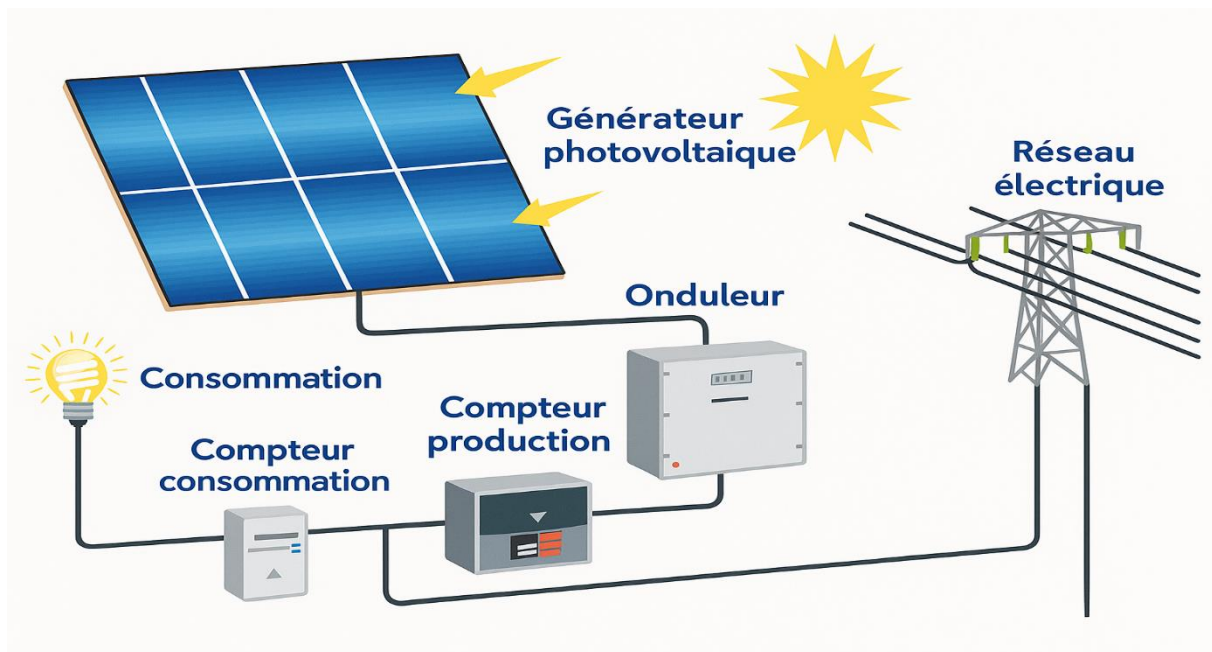


Figure I. 4 Mode d'exploitation d'un système photovoltaïque connecté au réseau

1.5 principe de conversion photovoltaïque

Lorsqu'une cellule solaire est exposée à la lumière, une série de réactions physiques se produit, conduisant à la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Voici une explication détaillée de chaque étape de ce processus [2,3,5] :

1.5.1 Absorption de la lumière et création d'une paire électron-trou

Lorsque la lumière du soleil frappe la cellule solaire, le matériau semi-conducteur (généralement le silicium) absorbe les photons lumineux. Si un photon possède une énergie suffisante, il libère un électron des atomes de silicium, laissant derrière lui un "trou" chargé positivement. Cette paire, composée d'un électron libre et d'un trou positif, est appelée "paire électron-trou".

1.5.2 Séparation de la paire électron-trou sous l'effet d'un champ électrique induit

La cellule solaire contient une jonction PN, une région où se rencontrent deux types de silicium :

- **Silicium de type P (chargé positivement)** : contient une plus grande quantité de trous positifs.
- **Silicium de type N (chargé négativement)** : contient une plus grande quantité d'électrons libres.

À l'interface entre ces deux types, un champ électrique interne se forme, repoussant les électrons vers la couche de silicium de type N et les trous vers la couche de type P. Ce mouvement crée une différence de potentiel électrique à l'intérieur de la cellule.

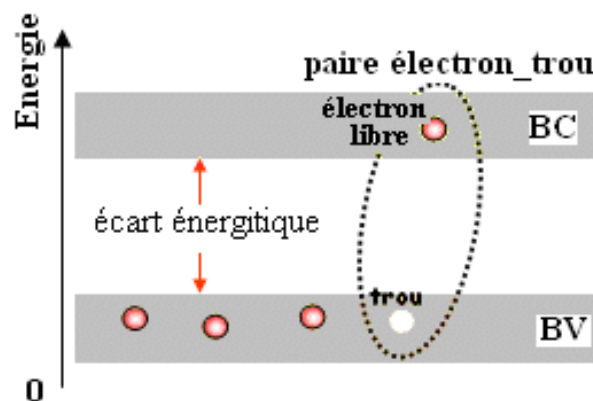


Figure I. 5 Génération de la paire électron-trou

1.5.3 Transport des charges vers les électrodes

Une fois séparés sous l'effet du champ électrique, les électrons se déplacent à travers le matériau semi-conducteur vers l'électrode négative, tandis que les trous migrent vers l'électrode positive.

1.5.4 Collecte des charges et génération du courant électrique

Lorsque les électrons atteignent l'électrode négative et les trous l'électrode positive, un circuit électrique externe permet aux électrons de circuler. Ce flux génère un courant électrique continu (DC), qui peut être utilisé directement ou converti en courant alternatif (AC) à l'aide d'un onduleur (*inverter*) pour alimenter divers appareils électriques.

1.6 Panneau photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque est un dispositif conçu pour convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Il est composé de cellules photovoltaïques, généralement fabriquées en silicium, un matériau semi-conducteur qui permet de transformer la lumière solaire en courant électrique continu [3 ,4,5] .

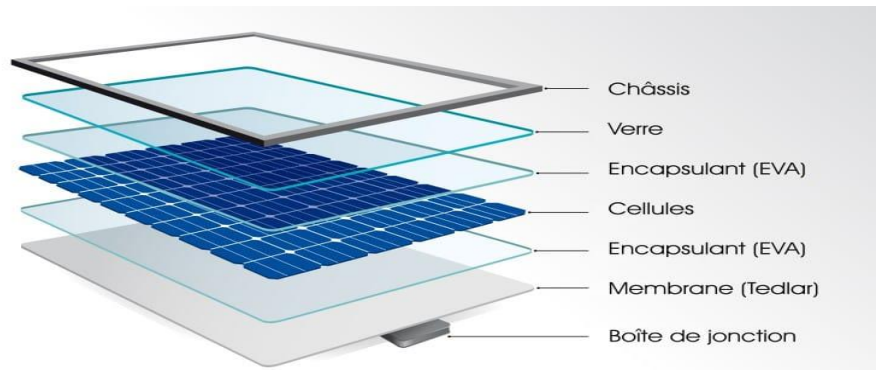


Figure I. 6 Les étages de Panneau photovoltaïque

1.6.1 Caractéristique électrique d'un panneau photovoltaïque

La figure I.8 représente la relation courant-tension (I-V) du panneau photovoltaïque (courbe rouge) ainsi que la relation puissance-tension (P-V) (courbe bleue).

A. Courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant maximal que la cellule photovoltaïque peut produire lorsque la tension est nulle (circuit fermé sans charge).

Sur le graphique, cela correspond au point le plus à gauche sur l'axe horizontal, où le courant atteint sa valeur maximale ($I_{cc}= 3A$) sans résistance externe.

B. Tension à vide (V_{oc})

C'est la tension maximale que la cellule peut atteindre lorsque le courant est nul (circuit ouvert sans circulation de courant).

Sur le graphique, cela correspond au point le plus à droite sur l'axe horizontal, où la tension atteint ($V_{oc} \approx 0.4V$) sans passage de courant.

C. Point de puissance maximale (MPP - Maximum Power Point)

Il représente le point où la production d'énergie est maximale. Il est caractérisé par le courant I_{MPP} et la tension V_{MPP} , où la puissance atteint son maximum. Sur le graphique(Figure I.8), le point MPP se situe au coude de la courbe bleue, qui représente l'endroit optimal pour

extraire l'énergie de la cellule photovoltaïque. La courbe I-V se divise généralement en deux régions :

- **Région de source de courant (partie gauche) :** Le courant reste presque constant avec la variation de la tension, ce qui signifie que le panneau fonctionne comme une source de courant.
- **Région de source de tension (partie droite) :** La tension reste élevée, mais le courant diminue fortement, indiquant que le panneau fonctionne comme une source de tension.

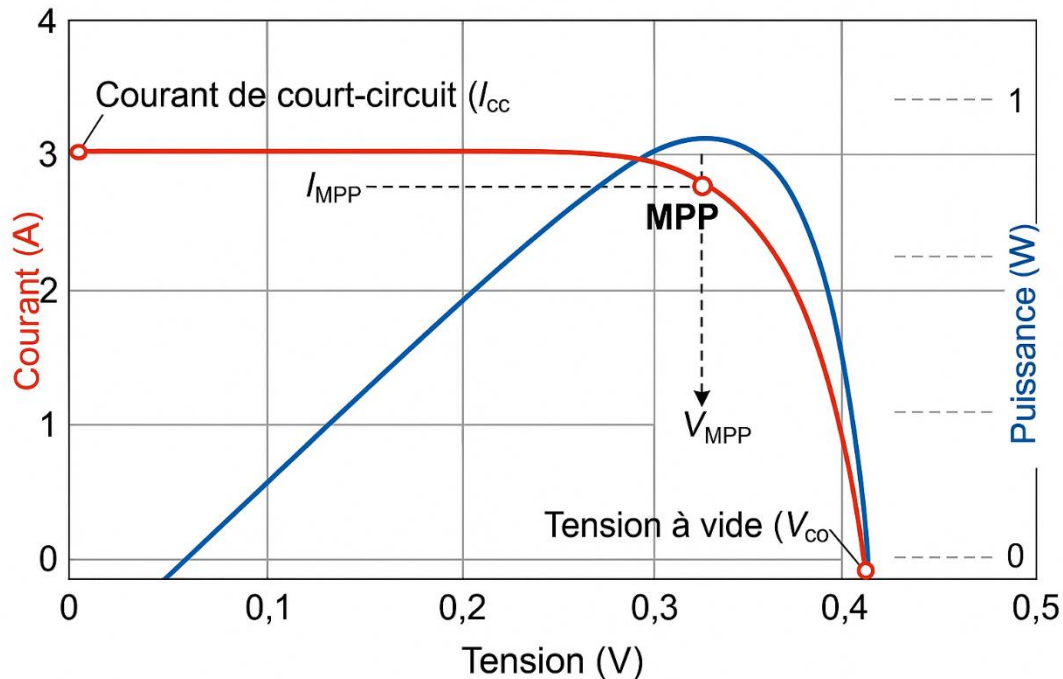


Figure I. 7 Caractéristique électrique d'un panneau photovoltaïque

D. Le rendement

Le rendement énergétique (η) d'une cellule est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale générée P_{\max} et la puissance du rayonnement solaire, qui arrive sur la cellule photovoltaïque [8] :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E.S} \quad (\text{I.1})$$

Où :

η : Rendement énergétique.

E : Éclairement (W/m^2).

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

P_{\max} : Puissance maximale (W)

E. Le facteur de forme

Il représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{co}$ comme le montre la figure (10). Ce facteur est défini par la relation suivante [6] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} \quad (I.2)$$

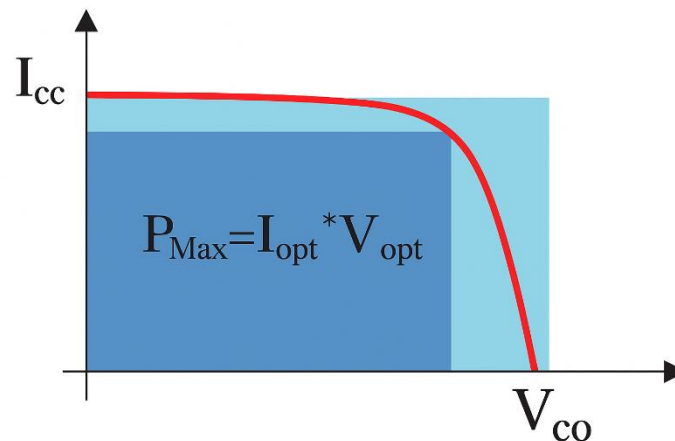


Figure I. 8 facteur de forme pour une cellule PV

I.6.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont constituées d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium, organisé en deux couches : l'une dopée positivement (P) et l'autre négativement (N), formant ainsi une jonction PN. Leur fonctionnement repose sur l'effet de la lumière qui arrache des électrons, créant des "trous" chargés positivement. Ces électrons migrent vers la couche N, tandis que les trous se dirigent vers la couche P, générant ainsi une différence de potentiel. Ce phénomène permet de produire un courant électrique continu, dont l'intensité varie en fonction de l'éclairage[3].

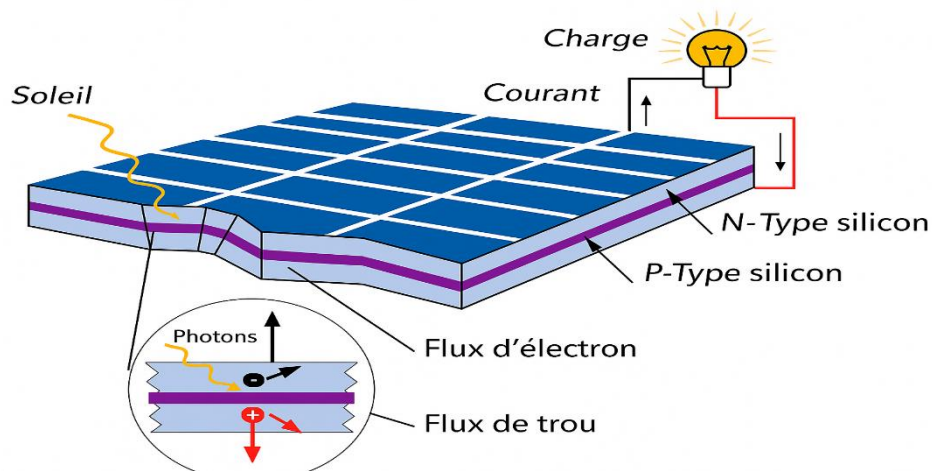


Figure I. 9 Structure d'un cellule photovoltaïque

I.6.3 Classification de cellules solaires

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se), le sulfure de cadmium (CdS), le tellure de cadmium (CdTe) ou encore l'arséniure de gallium (GaAs). Parmi ces matériaux, le silicium demeure le plus couramment utilisé en raison de sa grande disponibilité dans la nature. On le trouve principalement sous forme de silice, une roche naturelle composée de dioxyde de silicium (SiO₂). La silice constitue l'un des principaux composants des roches sédimentaires détritiques, telles que les sables et les grès.

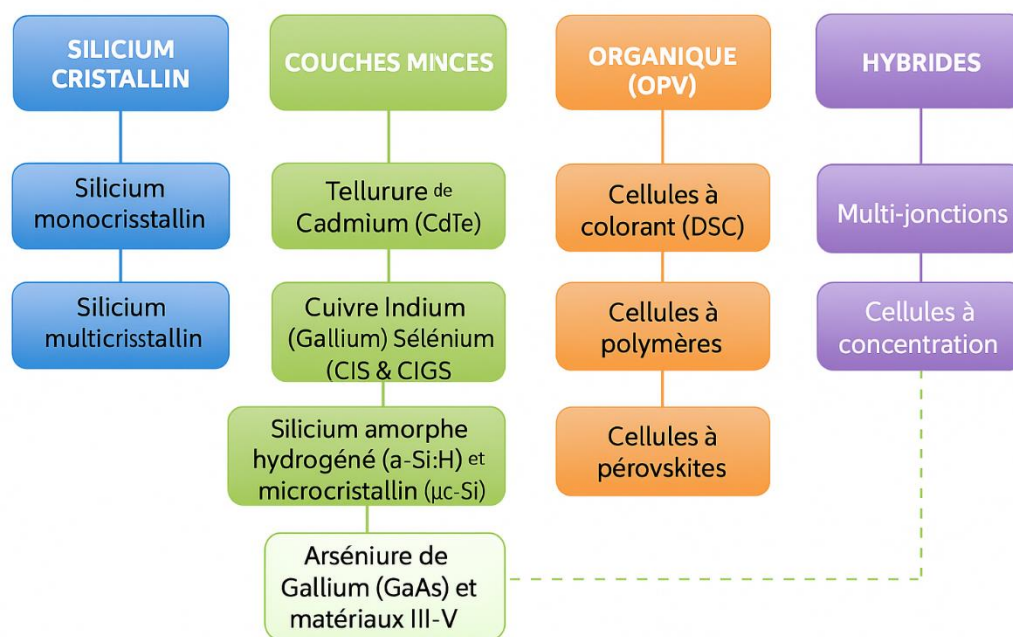


Figure I. 10 Classification de la cellule photovoltaïque fondée sur du matériau photovoltaïque

➤ **Matériau cristallin** : Les cellules photovoltaïques en matériau cristallin comprennent trois types principaux : les cellules monocristallines, polycristallines et à arséniure de gallium (GaAs). Leur description est la suivante [3] :

- **Le silicium monocristallin** : Les cellules en silicium monocristallin, à structure homogène, offrent un rendement élevé et une grande durabilité. Utilisées en photovoltaïque et en aéronautique, leur intégration sur des ailes courbées reste un défi.



Figure I. 11 cellules photovoltaïques sont fabrique à silicium monocristallin

- **Le silicium polycristallin** : Les cellules en silicium polycristallin, moins efficaces (10 à 14 %) que les monocristallines, sont plus économiques grâce à un coût de production réduit, ce qui les rend accessibles pour diverses applications photovoltaïques.

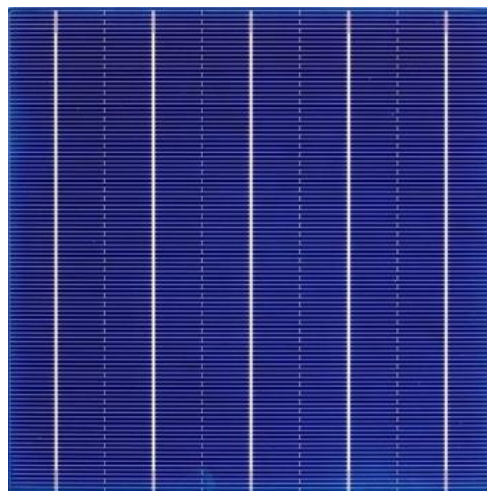


Figure I. 12 cellules photovoltaïques sont fabriquées à silicium polycristallin

- **La cellule en silicium amorphe (a-Si) :** La cellule en silicium amorphe, utilisée dans les petits dispositifs, absorbe très bien la lumière mais offre un rendement modeste (7-9 %), chutant à 5 % avec le temps, limitant son usage en aviation solaire.

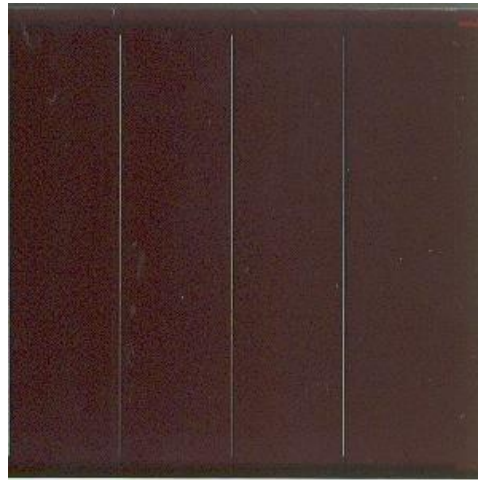


Figure I. 13 La cellule en silicium amorphe

Tableau I. 1 Comparaison des types de cellules solaires

	MONOCRYSTALLINE	POLYCRYSTALLINE	AMORPHES	CdTe	CIS/CIGS
Efficacité typique des modules	15-20%	10-14%	7-9%	9-11%	10-20%
Meilleure efficacité des cellules de recherche	25.0%	20.4%	13.4%	18.7%	20.4%
La surface requise pour 1 kWc	6-9 m ²	8-9 m ²	13-20 m ²	11-13 m ²	9-11 m ²
Durée typique de la garantie	25 ans	25 ans	10-25 ans		
Résistance à la température	Les performances baissent de 10 %. 15 % à des températures élevées	Moins résistant à la température que le monocristallin	Tolère la chaleur extrême	Un impact relativement faible sur les performances	
Informations complémentaires	La technologie cellulaire la plus ancienne et la plus utilisée	Moins de déchets de silicium dans le processus de production	Tendent à se dégrader plus rapidement que les panneaux solaires à base de cristaux		

1.6.4 Rendement des cellules

Le tableau I.2 ci-dessus présente les différents types de cellules avec leur rendement :

Tableau I. 2 Différents types des cellules avec leur rendement

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a - Si)	13%	5% à 9%
Silicium polycristallin (p - Si)	19.8%	11% à 15%
Silicium monocristallin (m - Si)	24.7%	13% à 17%

1.7 Convertisseur statique (les hacheur)

1.7.1 Définition

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques de type DC/DC permettant de modifier la tension continue d'une source d'alimentation en une autre valeur, plus grande ou plus petite, selon l'architecture du convertisseur. Leur rôle principal est d'optimiser le transfert d'énergie électrique avec un rendement élevé, ce qui les rend essentiels dans les systèmes embarqués, les alimentations à découpage et les énergies renouvelables [6,7].

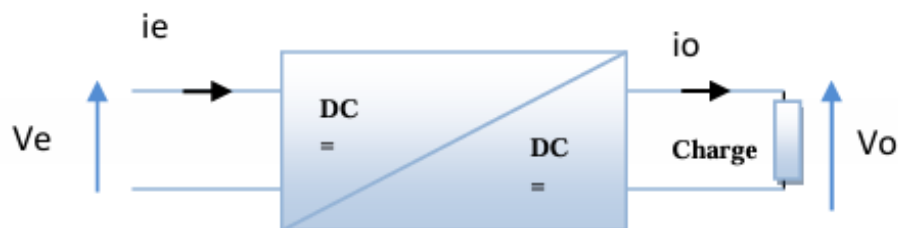


Figure I. 14 Symbole d'un convertisseur DC-DC

1.7.2 Principe de fonctionnement des hacheurs DC/DC

Un hacheur repose sur la commutation rapide d'un interrupteur électronique (transistor MOSFET, IGBT, thyristor GTO, etc.), associée à des composants de stockage d'énergie : inductance (L) et condensateur (C). Cette commutation permet de contrôler la tension et le courant appliqués à la charge en jouant sur le rapport cyclique (α) défini par [7] :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (I.3)$$

où :

T_{on} : est la durée pendant laquelle l'interrupteur est fermé.

T : est la période de commutation.

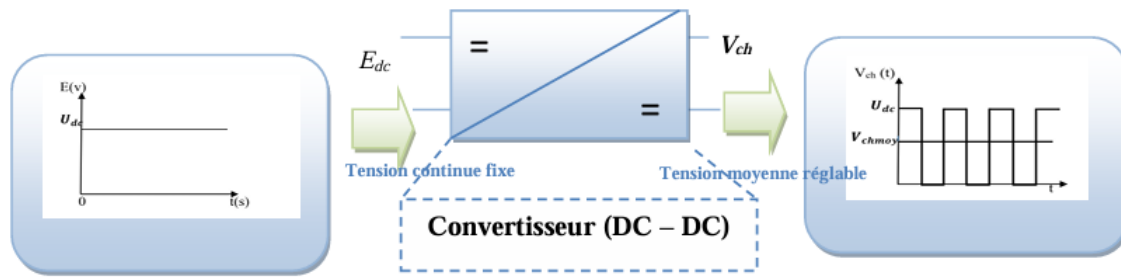


Figure I. 15 Principe de base d'un hacheur

Les hacheurs se divisent principalement en deux catégories :

- **Hacheur Buck (abaisseur de tension) :** $V_{out} < V_{in}$.
- **Hacheur Boost (élevateur de tension) :** $V_{out} > V_{in}$

1.7.3 Hacheur Boost

Le hacheur Boost, ou convertisseur élevateur de tension, est un convertisseur qui augmente la tension d'entrée tout en maintenant une puissance électrique constante (idéalement). Il est utilisé notamment dans les alimentations à découpage, les systèmes photovoltaïques et les véhicules électriques[6].

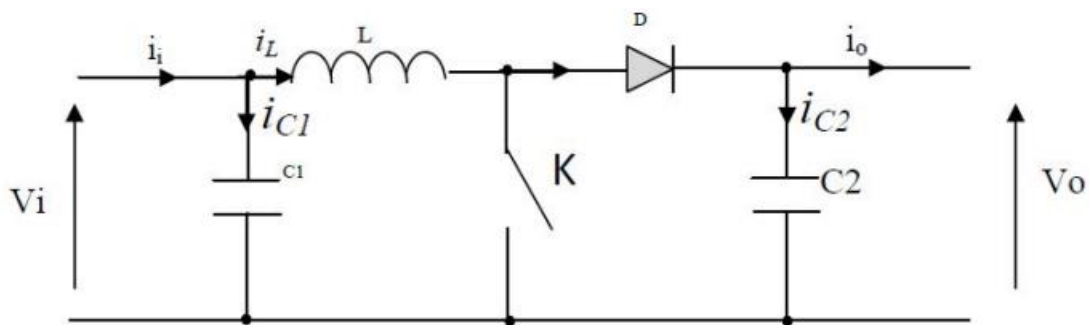


Figure I. 16 Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Le circuit est composé des éléments suivants :

- **Source d'entrée (V_e) :** tension continue fournie au convertisseur.
- **Interrupteur électronique (K) :** (souvent un MOSFET ou un IGBT).
- **Inductance (L) :** stocke l'énergie sous forme de champ magnétique.
- **Diode (D) :** empêche le retour du courant vers la source.
- **Condensateur (C1 et C2) :** stabilise la tension en sortie.

Fonctionnement : Lorsque l'interrupteur est fermé pendant l'intervalle αT_e , le courant traversant l'inductance augmente de manière linéaire, tandis que la tension à ses bornes est nulle. Durant l'intervalle $t \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance assure la circulation du courant à travers la diode de roue libre D. La tension aux bornes de K prend alors la valeur V_0 . En posant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on aboutit à l'expression :

$$V_o = (1 - \alpha)V_i \quad (I.4)$$

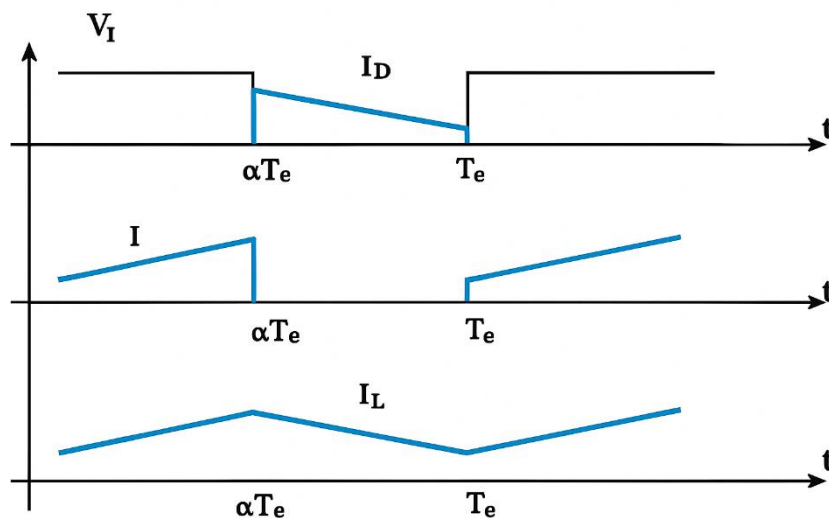


Figure I. 17 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

❖ Rendement et Pertes dans le Hacheur Boost:

➤ Rendement Idéal :

Dans un cas idéal, les composants du hacheur sont parfaits (pas de pertes ohmiques, pas de dissipation thermique), et toute la puissance absorbée est transférée à la charge :(10)

$$P_{in} = P_{out} \quad (I.5)$$

D'où un rendement de 100 % :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (I.6)$$

➤ Pertes Réelles :

Dans un système réel, plusieurs pertes existent :(10)

- **Pertes Joule (P_J) :** résistances internes des composants (R_L, R_{DS})
- **Pertes de commutation (P_{sw}) :** dissipation d'énergie lors des transitions ON/OFF.

- **Pertes dans la diode (P_D)** : chute de tension lors de la conduction.
- **Pertes magnétiques (P_L)** : hystérésis et courants de Foucault dans l'inductance.

Le rendement réel est donc inférieur à 100 %, mais **optimisé** grâce à l'utilisation de :

- MOSFETs à faible résistance interne ($R_{DS(on)}$).
- Diodes Schottky pour minimiser la chute de tension.
- Matériaux magnétiques à faible hystérésis pour les inductances.

En pratique, le rendement dépasse souvent **95 %**, surtout à haute fréquence de commutation.

1.8 Principes de Fonctionnement des Algorithmes MPPT

Classiques

1.8.1 Principes de Fonctionnement

Le MPPT fonctionne en mesurant en temps réel la tension produite par les panneaux solaires afin d'ajuster la tension et le courant aux valeurs maximales permettant d'optimiser la puissance délivrée. Il est intégré aux onduleurs photovoltaïques pour assurer une coordination efficace entre les panneaux solaires, les batteries et les charges. En ajustant dynamiquement le point de puissance maximale (MPP), il permet de maximiser le stockage d'énergie dans les batteries et d'améliorer l'efficacité globale du système. Ainsi, le MPPT optimise l'utilisation de l'énergie solaire en adaptant continuellement la tension de fonctionnement du module PV à la puissance maximale disponible. [3,5].

Par exemple :

Intensité du soleil=1000W/m, $U=24V$, $I=1A$; $U = 30 V$, $j_e = 0,9 A$; $U = 36 V$, $j_e = 0,7 A$;
Délivre la puissance maximale lorsque $u=30$.

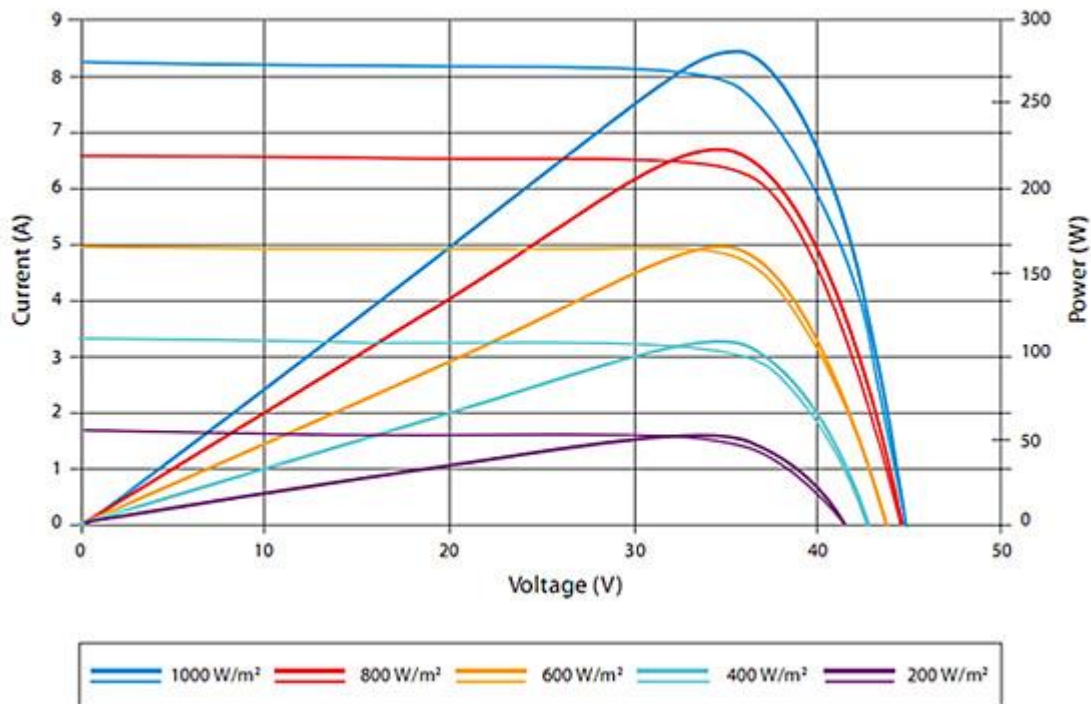


Figure I. 18 Courbes I-V et P-V d'un module photovoltaïque sous différentes irradiances

1.8.2 Influence des variations climatiques sur les Systèmes Photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques sont directement influencés par les conditions climatiques.

Les principaux paramètres ayant un impact sur leur performance sont :

- L'irradiation solaire (W/m^2)
- La température ambiante
- La vitesse du vent
- L'humidité et les précipitations
- L'angle d'inclinaison et l'orientation du panneau

1.9 Les Techniques Classiques de MPPT

1.9.1 Méthode Perturb & Observe (P&O)

L'approche de Perturbation et Observation (P&O) est très courante dans la recherche du MPPT, en raison de sa simplicité et de son exigence limitée en termes de mesures de tension et courant du PV, VPV et IPV. Elle a la capacité de détecter le point de performance maximale même en cas de fluctuations d'éclairement et de température[8].

L'algorithme fonctionne en introduisant une perturbation dans la tension et le courant du panneau photovoltaïque. Par la suite, nous déterminons la puissance fournie par ce panneau à l'instant k , notée $P_{pv}(k)$, puis nous la mettons en comparaison avec celle de l'instant précédent, $P_{pv}(k-1)$.

Comme le montre la figure I.19, on observe que la puissance délivrée par ce panneau photovoltaïque varie en fonction de la tension du module.

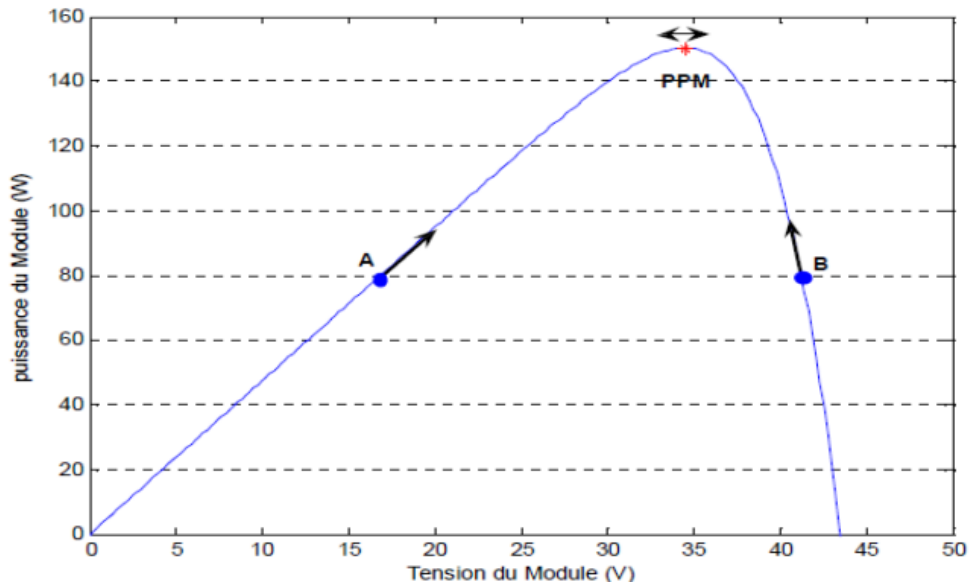


Figure I. 19 la courbe de puissance-Tension de panneau solaire

Si la début de apparence a augmenté, V_{pv} est accordée là-dedans lequel la approchant régie que là-dedans lequel l'soutenu précédent. Si la début de apparence a diminué, V_{pv} est accordée là-dedans lequel la régie opposée que là-dedans lequel le moment précédent. Lorsque le sujet de début maximale est atteint, V_{pv} oscille tout alentour de la charge optimale V_{op} . Ceci dessein une coulure de début qui emprise pile le pas de l'incrémentation de la perturbation. On cas du le pas d'incrémentacion est grande, l'métamorphose du MPPT répond précipitamment aux changements soudains des circonstance de fonctionnement. D'un inconnue banlieue si le pas est petit, les pertes apendant des circonstance de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures toutefois le méthode ne pourra pas répondre précipitamment aux changements rapides de la climat ou de l'éclairément. Le pas monitoire est conduit empiriquement en consacré des besoins [4].

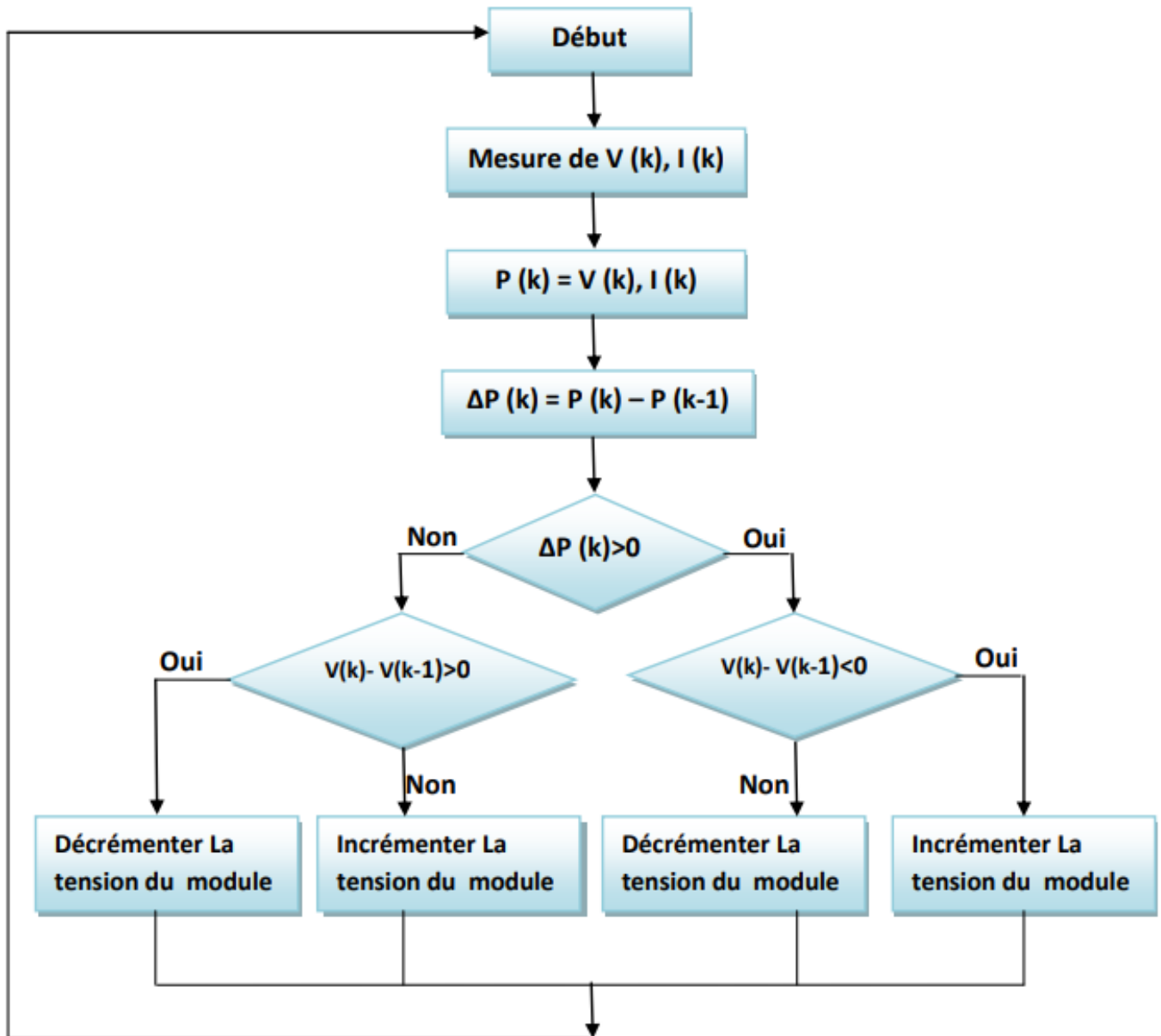


Figure I. 20 Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation

- **Début** : L'algorithme commence par l'initialisation.
- **Mesure des paramètres électriques** : Il mesure la tension $V(k)$ et le courant $I(k)$ du module PV.
- **Calcul de la puissance** : La puissance instantanée est calculée $P(k) = V(k) \times I(k)$
- **Variation de la puissance** : L'algorithme détermine la différence entre la puissance actuelle et la puissance précédente : $\Delta P(k) = P(k) - P(k-1)$
- **Décision d'ajustement de la tension** :

Si $\Delta P(k) > 0$:

Si $V(k) - V(k-1) > 0 \rightarrow$ **Augmenter la tension.**

Sinon \rightarrow **Diminuer la tension.**

Si $\Delta P(k) < 0$:

Si $V(k) - V(k - 1) < 0 \rightarrow$ **Augmenter la tension.**

Sinon \rightarrow **Diminuer la tension.**

A. Avantages de la méthode P&O

- Simplicité d'implémentation.
- Faible coût de calcul.
- Bonne efficacité pour des conditions climatiques stables.

B. Inconvénients

- Peut osciller autour du **MPP** sans jamais s'y stabiliser complètement.
- Moins efficace en cas de variations rapides des conditions d'irradiation ou d'ombrage partiel.

Cette méthode est largement utilisée dans les contrôleurs MPPT pour optimiser l'extraction d'énergie des panneaux photovoltaïques[5].

1.9.2 Méthode de la Conductance Incrémentale (INC)

Dans cet algorithme, la dérivée de la puissance de sortie par rapport à la tension du module PV est calculée. Cette dérivée $\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}}$ est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche et négative à droite de ce point. Puisque la puissance du module PV est donnée par

$P_{pv} = v_{pv} \times i_{pv}$, la dérivée $\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}}$ est exprimée comme suit [3,4,5]:

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} = i_{pv} + v_{pv} \frac{di_{pv}}{dv_{pv}} \quad (I.7)$$

Lorsque la puissance maximale est atteinte, la dérivée de la puissance du module PV par rapport à sa tension PV (dP_{pv}/dv_{pv}) tend vers zéro, et puis $\frac{v_{pv} \times di_{pv}}{dv_{pv}} + i_{pv} = 0$.

Ce qui donne :

$$\frac{i_{pv}}{v_{pv}} + \frac{di_{pv}}{dv_{pv}} = 0 \quad (I.8)$$

Nous définissons la conductance instantanée par $G = \frac{i_{pv}}{v_{pv}}$ et la conductance incrémentale par

$\Delta G = \frac{di_{pv}}{dv_{pv}}$. Puisque la tension V_{pv} du panneau PV est toujours positive, le point de puissance

maximale est atteint si $G + \Delta G = 0$. Le point de fonctionnement du système est situé à gauche de ce point lorsque $G + \Delta G > 0$ et vice versa, comme indiqué ci-après :

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} > 0 \text{ si } G + \Delta G > 0 \quad (\text{I.9})$$

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} = 0 \text{ si } G + \Delta G = 0 \quad (\text{I.10})$$

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} < 0 \text{ si } G + \Delta G < 0 \quad (\text{I.11})$$

La figure I.21 montre l'organigramme de l'algorithme INC, qui est basé sur la perturbation direct du rapport cyclique pour contrôler le convertisseur DC-DC. Lorsque $G + \Delta G = 0$ alors $\Delta D = 0$, lorsque $G + \Delta G > 0$ alors ΔD est négatif, et lorsque $G + \Delta G < 0$ alors ΔD est positif [5].

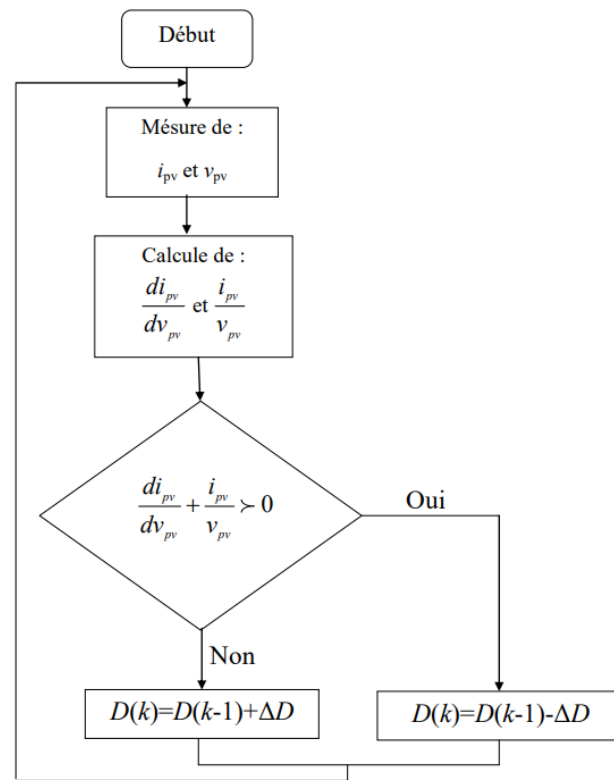


Figure I. 21 Organigramme de l'algorithme de Conductance Incrémentale

L'algorithme présenté dans le diagramme (figure I.22) est une méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT - Maximum Power Point Tracking) pour un système photovoltaïque. Il repose sur la **méthode de la conductance incrémentale**, qui compare la conductance instantanée et la conductance incrémentale pour déterminer la direction dans laquelle ajuster le rapport cyclique D du convertisseur DC-DC.

- **Mesure des grandeurs électriques** : Le système mesure le courant i_{pv} et la tension v_{pv} du panneau solaire.

- **Calcul des paramètres** : Il calcule la dérivée du courant par rapport à la tension $\frac{di_{pv}}{dv_{pv}}$ et la conductance instantanée $\frac{i_{pv}}{v_{pv}}$.
- **Condition de décision** : Si $\frac{di_{pv}}{dv_{pv}} + \frac{i_{pv}}{v_{pv}} > 0$, cela signifie que le point de fonctionnement est à gauche du point de puissance maximale. Il faut alors **diminuer** le rapport cyclique D.

Sinon, si $\frac{di_{pv}}{dv_{pv}} + \frac{i_{pv}}{v_{pv}} \leq 0$, le point de fonctionnement est à droite du point de

puissance maximale, et il faut **augmenter** le rapport cyclique D.

- **Mise à jour du rapport cyclique** :

En fonction du résultat de la condition précédente, le rapport cyclique est ajusté :

Si à gauche du MPP : $D(k) = D(k-1) - \Delta D$.

Si à droite du MPP : $D(k) = D(k-1) + \Delta D$.

Ce processus est répété en boucle pour maintenir le fonctionnement du panneau au point de puissance maximale.

A. Avantages de la méthode :

- **Meilleure précision que la méthode P&O** : Contrairement à l'algorithme Perturb and Observe (P&O), la méthode de la conductance incrémentale permet d'atteindre précisément le point de puissance maximale sans oscillations excessives.
- **Rapidité de convergence** : Elle converge plus rapidement vers le MPP en réponse aux variations d'ensoleillement.
- **Bonne adaptation aux variations climatiques** : Cette méthode s'adapte mieux aux variations soudaines d'irradiation et de température.

B. Inconvénients :

- **Complexité accrue** : Par rapport à la méthode P&O, l'algorithme nécessite le calcul de la dérivée, ce qui demande plus de ressources de calcul et une implémentation plus compliquée.
- **Sensible au bruit de mesure** : Comme la méthode repose sur des dérivées, toute imprécision dans la mesure du courant ou de la tension peut conduire à des erreurs dans la détermination du MPP.
- **Temps de réponse légèrement plus long dans des conditions stables** : Lorsqu'il n'y a pas de variations de l'ensoleillement, la méthode peut être plus lente que le P&O, qui effectue simplement de petites perturbations.

1.9.3 Méthode de la Tension de Circuit Ouvert (V_{oc})

La tension en circuit ouvert (V_{oc}) est l'une des principales caractéristiques électriques d'un panneau solaire.

Elle représente la tension maximale que le panneau solaire peut générer lorsque ses bornes sont déconnectées ou en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque aucun courant ne circule à travers le panneau [5].

La V_{oc} est mesurée en volts (V) et dépend du matériau et de la technologie utilisés dans la fabrication du panneau solaire. Elle est généralement indiquée dans les spécifications du panneau solaire et est mesurée dans des conditions standardisées d'ensoleillement (STC - Standard Test Conditions), qui incluent une certaine intensité lumineuse (généralement 1000 W/m^2), une température ambiante spécifique (généralement 25°C) et d'autres paramètres normalisés.

La tension en circuit ouvert est un paramètre important pour les concepteurs de systèmes solaires, car elle permet de déterminer la tension maximale que le panneau peut atteindre lorsqu'il est connecté à un circuit électrique. Cela aide à dimensionner correctement les configurations de panneaux en série ou en parallèle pour atteindre les niveaux de tension et de courant appropriés pour le système solaire global [6].

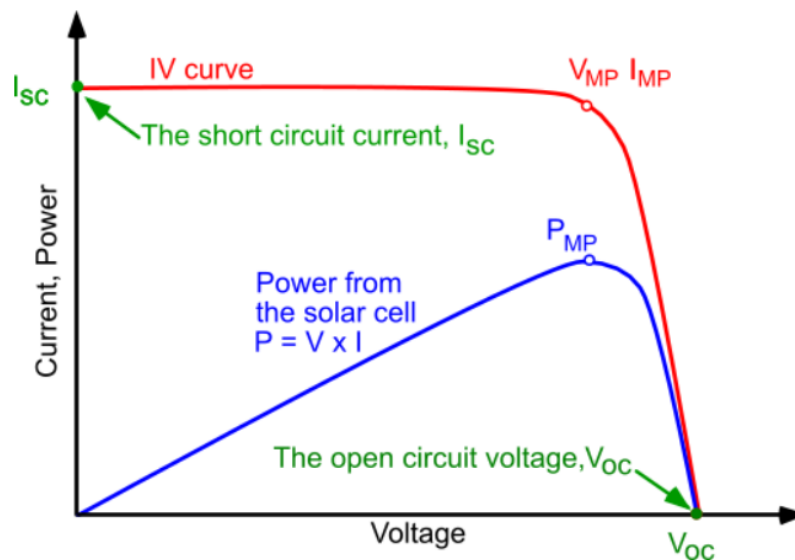


Figure I. 22 Caractéristique courant-tension (IV) et puissance-tension (PV) d'un panneau photovoltaïque

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante: $V_{mp} = k \times V_{oc}$ Où k est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8.

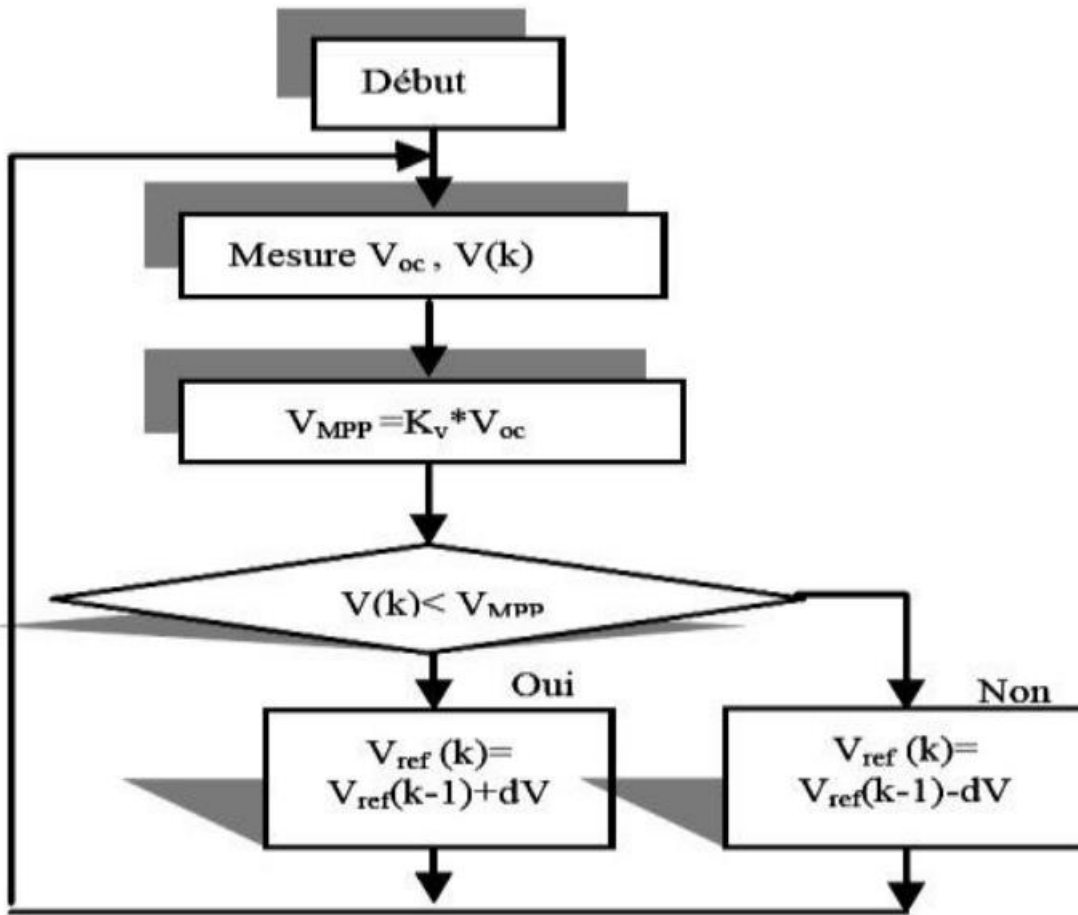


Figure I. 23 Organigramme de l'algorithme FCO

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert V_{oc} . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimale en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale [2].

A. Limites et Inconvénients :

- **Interruption temporaire de la production** : Pour mesurer V_{oc} le système doit déconnecter la charge pendant un court instant, ce qui entraîne des pertes d'énergie.
- **Dépendance aux variations environnementales** : La valeur de k peut fluctuer en fonction de la température et de l'ensoleillement, affectant la précision du suivi MPPT.
- **Moins efficace que d'autres algorithmes MPPT avancés** : Contrairement aux méthodes comme **P&O (Perturb and Observe)** ou **Incremental Conductance**, la méthode FOCV n'ajuste pas dynamiquement le point de fonctionnement du système en temps réel.

B. Applications :

- Utilisée principalement dans les **petits systèmes photovoltaïques** où la simplicité et la faible consommation énergétique du contrôleur sont prioritaires.
- Adaptée aux applications à **faible coût**, telles que les systèmes solaires embarqués et les chargeurs solaires portables.
- Convient aux systèmes où une légère perte d'efficacité est acceptable en échange d'une implémentation plus simple et plus robuste.

I.10 Comparaison et Performances des Techniques Classiques***I.10.1 comparaison des méthodes MPPT***

Le tableau I.3 présente la comparaison entre les méthodes classiques [3,4,5,8].

Tableau I. 3 Tableau comparatif des méthodes MPPT

Méthode	Précision	Temps de Réponse	Complexité	Adaptation aux Variations Climatiques
P&O	Moyenne	Rapide	Faible (facile à implémenter)	Mauvaise (oscillations)
INC	Élevée	Rapide	Moyenne (calculs nécessaires)	Bonne
FOCV	Faible	Lent	Très faible (très simple)	Mauvaise (faible efficacité)

I.10.2 Critères de sélection d'un algorithme MPPT**A. Performance et Efficacité**

- Vitesse de convergence
- Précision du suivi du MPP
- Réduction des oscillations

B. Simplicité et Implémentation

- Complexité algorithmique
- Facilité d'intégration

C. Robustesse et Adaptabilité

- Résistance aux variations climatiques
- Gestion des ombrages partiels

D. Consommation et Coût

- Consommation énergétique du contrôleur
- Exigences matérielles

E. Compatibilité avec l'Application :

- Systèmes autonomes vs connectés
- Type de charge (batteries, moteurs...)

1.11 Limites des Techniques Classiques et Perspectives***d'Amélioration***

Les méthodes traditionnelles de suivi du point de puissance maximale (comme P&O et INC) font généralement face à des oscillations autour du MPP, ce qui conduit à des déperditions d'énergie .

Ces techniques sont peu réactives aux fluctuations rapides de l'irradiation et de la température, diminuant ainsi leur performance dans des conditions dynamiques[5].

1.11 Conclusion

L'évaluation des performances des différentes méthodes analysées a permis de mettre en évidence les limites des approches classiques ainsi que les avantages notables des stratégies émergentes. Cette analyse souligne l'importance d'explorer de nouvelles pistes, notamment par l'élaboration de méthodes hybrides intégrant plusieurs techniques avancées. De plus, l'optimisation conjointe de la vitesse d'exécution et de la précision des algorithmes apparaît comme une voie prometteuse, en particulier pour les systèmes photovoltaïques soumis à des conditions environnementales variables. Ces perspectives ouvrent la voie à des recherches futures axées sur l'amélioration continue de la modélisation et du contrôle des performances énergétiques.

CHAPITRE II

Optimisation de l'algorithme MPPT

CHAPITRE II : Optimisation de l'algorithme MPPT

II.1 Introduction

Dans le contexte actuel de la transition énergétique, l'énergie photovoltaïque joue un rôle fondamental dans la diversification des sources énergétiques renouvelables. Cependant, l'efficacité des systèmes photovoltaïques dépend fortement de leur capacité à suivre en temps réel le point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking – MPPT), face aux variations d'ensoleillement et de température [4,5].

Les algorithmes classiques de MPPT, tels que Perturb and Observe (P&O) ou Incremental Conductance (IncCond), bien qu'efficaces dans des conditions stables, montrent leurs limites en termes de rapidité, de précision et de stabilité sous des conditions environnementales dynamiques. Ces insuffisances ont motivé l'émergence de nouvelles approches basées sur l'optimisation et l'intelligence artificielle (IA) [5].

L'objectif de ce chapitre est d'explorer les différentes méthodes d'optimisation appliquées au suivi du MPP, en mettant un accent particulier sur les algorithmes intelligents tels que la logique floue (Fuzzy Logic), les réseaux de neurones artificiels (ANN), et l'optimisation par essaim particulaire (PSO). Nous commencerons par définir le concept général d'optimisation, rappeler les méthodes classiques de MPPT, puis présenterons les approches avancées fondées sur l'IA, avant de comparer leurs performances respectives.

II.2 Concepts généraux de l'optimisation

II.2.1 Définition de l'optimisation

Technique et mathématique visant à ajuster les paramètres d'un système photovoltaïque afin de déterminer le point de fonctionnement optimal permettant d'obtenir la puissance électrique maximale. Cela est réalisé grâce à un suivi continu et précis de ce point malgré les variations environnementales telles que l'irradiation solaire et la température. Les techniques MPPT sont essentielles pour améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques et réduire les pertes énergétiques.

les systèmes MPPT s'appuient sur des algorithmes dynamiques pour garantir une exploitation maximale de l'énergie solaire en s'adaptant aux conditions opérationnelles changeantes [9].

II.2.2 Quelques axes d'optimisation possibles

A. Amélioration de la rapidité de convergence

Réduire le temps que l'algorithme met pour atteindre le point de puissance maximale (MPP), surtout lors des variations rapides d'ensoleillement.

B. Réduction des oscillations autour du MPP

Certains algorithmes (comme Perturb and Observe - P&O) oscillent autour du point optimal. L'objectif est de minimiser ces fluctuations pour éviter des pertes d'énergie.

C. Adaptation dynamique du pas (step size)

Utiliser un pas variable : petit près du MPP (pour la précision) et grand loin du MPP (pour la rapidité).

D. Utilisation d'algorithmes avancés

S'appuyer sur des techniques comme la logique floue (FLC), les réseaux de neurones (ANN), PSO et les algorithmes génétiques pour améliorer la performance.

E. Meilleure gestion des changements brutaux

En cas de nuages ou variations rapides de température, il faut rendre l'algorithme plus réactif sans devenir instable.

F. Optimisation matérielle

Utiliser des capteurs plus rapides et des contrôleurs numériques (comme DSP, FPGA) pour exécuter les algorithmes efficacement.

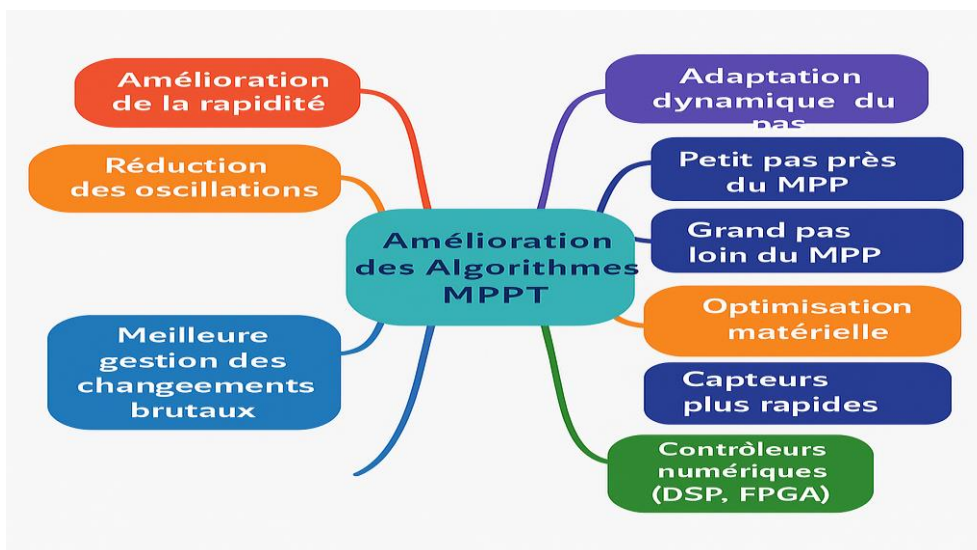


Figure II. 1 Optimisation des algorithmes MPPT : Principaux axes d'amélioration

II.2.3 Objectifs de l'optimisation dans les systèmes PV

A. Maximisation de l'efficacité énergétique

Les techniques d'optimisation comme le MPPT (Maximum Power Point Tracking) permettent d'augmenter l'efficacité énergétique en ajustant dynamiquement les paramètres du système en fonction de l'irradiation solaire disponible[10].

B. Amélioration de la performance sous conditions environnementales variables

Les systèmes PV doivent être capables de s'adapter aux variations de l'irradiation solaire et de la température. L'optimisation permet d'ajuster le système pour garantir

des performances optimales même dans des conditions défavorables, comme l'ombrage partiel ou les températures élevées [10].

C. Augmentation de la productivité

L'optimisation permet de maximiser la production d'énergie en utilisant des algorithmes d'optimisation comme PSO (Particle Swarm Optimization), qui sont capables d'extraire la puissance maximale des générateurs PV, même en présence d'ombrage partiel [10].

D. Réduction des coûts et augmentation de la durabilité

L'optimisation contribue à la réduction des coûts d'exploitation et de maintenance en augmentant l'efficacité du système. Cela permet d'allonger la durée de vie des composants et de réduire les coûts à long terme [10].

II.3 Présentation des algorithmes d'IA pour l'optimisation

II.3.1 définition

La présentation des algorithmes d'intelligence artificielle pour l'optimisation désigne l'étude et l'analyse des méthodes basées sur l'IA utilisées pour résoudre des problèmes où il faut trouver la meilleure solution possible parmi plusieurs alternatives. Ces algorithmes, souvent inspirés de la nature ou du comportement humain, sont capables d'explorer efficacement un grand espace de solutions afin d'améliorer la performance, réduire les coûts ou maximiser un objectif spécifique[9 ,11].

II.3.2 Classification des algorithmes d'AI pour l'optimisation

On peut classer les méthodes d'AI en classification comme suit [11,12,13] :

1. Algorithmes évolutionnaires

Ces algorithmes s'inspirent des principes de la sélection naturelle. Ils utilisent des mécanismes comme la mutation, le croisement et la sélection pour améliorer progressivement une population de solutions.

Exemples :

- Algorithmes génétiques (GA)
- Stratégies d'évolution (ES)

2. Algorithmes à base d'essaims

Ils se basent sur le comportement collectif observé chez certaines espèces (oiseaux, poissons, fourmis). La coopération entre agents permet d'explorer efficacement l'espace de solutions.

Exemple :

- PSO (Particle Swarm Optimization)

3. Systèmes à base de logique floue

Ces systèmes prennent des décisions à partir de règles linguistiques et floues. Ils sont capables de gérer l'incertitude et les variations non linéaires.

Exemple:

- FLC (Fuzzy Logic Controller)

4. Réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) apprennent à partir des données en modélisant les relations complexes entre les entrées, telles que la tension et le courant, et la sortie optimale représentant le point de puissance maximale.

5. Méthodes de recherche locale et globale

Ces méthodes visent à éviter les optima locaux pour atteindre une solution globale optimale. Elles reposent sur des stratégies stochastiques ou heuristiques.

Exemples:

- Recuit simulé (Simulated Annealing)
- Recherche tabou (Tabu Search)

6. Apprentissage par renforcement

Dans cette approche, un agent apprend à optimiser ses décisions par essais-erreurs, en recevant des récompenses ou des pénalités selon ses actions dans un environnement dynamique.

Exemples:

- Q-learning
- Deep reinforcement learning

7. Algorithmes hybrides

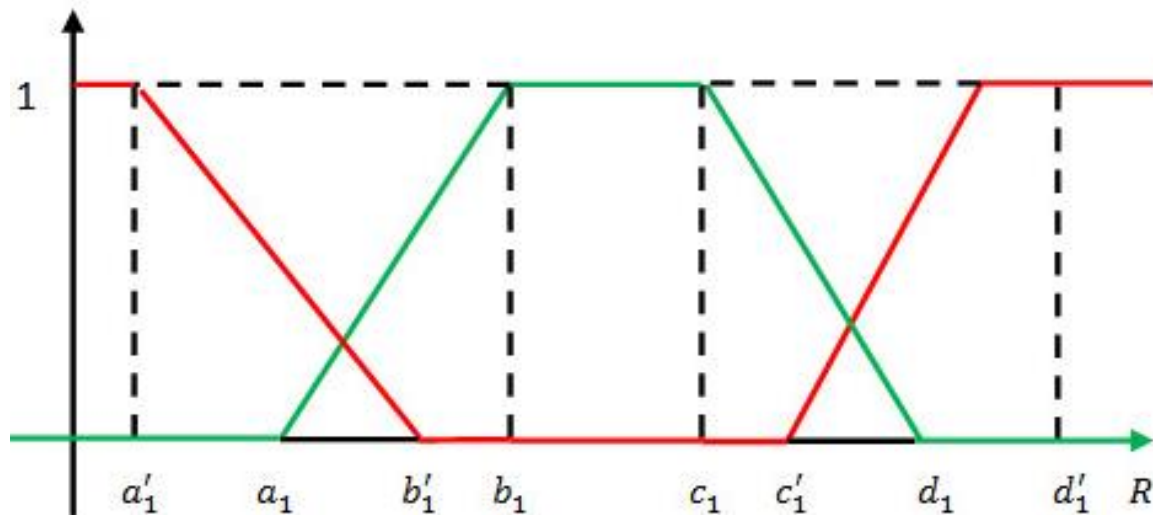
Ce sont des combinaisons de plusieurs techniques (par exemple, PSO avec ANN ou GA avec FLC), visant à exploiter les avantages de chaque méthode pour améliorer les performances globales.

II.4 Logique floue (Fuzzy Logic)

II.4.1 Principe de base

La logique floue est une extension de la logique classique (binaire) qui permet de gérer des situations où les variables ne sont pas strictement définies comme vraies (1) ou fausses (0). Elle introduit des degrés d'appartenance à des ensembles flous, permettant ainsi

de modéliser l'incertitude et l'imprécision inhérentes à de nombreux systèmes réels. Par exemple, une température de 25°C peut appartenir à plusieurs ensembles flous à la fois : « chaude » à 60 %, « tiède » à 40 %, et « fraîche » à 0 %.



La logique floue repose sur trois étapes principales :

- **Fuzzification** : Conversion des valeurs réelles (entrées mesurées, comme la tension ou la puissance) en degrés d'appartenance à des ensembles flous à l'aide de fonctions d'appartenance (par exemple, triangulaires, trapézoïdales).
- **Système d'inférence** : Application de règles floues (sous forme de « SI... ALORS... ») pour relier les entrées aux sorties. Ces règles sont définies par des experts ou apprises à partir de données.
- **Défuzzification** : Conversion des résultats flous en une valeur précise (par exemple, une tension ou un courant optimal pour le MPPT).

II.4.2 Application au MPPT

Dans un système photovoltaïque, le point de puissance maximale (MPP) varie en fonction de l'ensoleillement, de la température et d'autres facteurs environnementaux. Les méthodes traditionnelles comme Perturb and Observe (P&O) ou Incrément de Conductance peuvent être lentes ou provoquer des oscillations autour du MPP, surtout sous des conditions changeantes.

La logique floue est utilisée pour ajuster dynamiquement la tension ou le courant du panneau photovoltaïque afin de converger rapidement vers le MPP. Les entrées typiques du contrôleur flou incluent :

- **Erreur (E)** : Différence entre la puissance actuelle et la puissance maximale estimée.
- **Variation de l'erreur (ΔE)** : Changement de l'erreur entre deux cycles.

Les sorties sont souvent des ajustements de la tension ou du rapport cyclique (duty cycle) du convertisseur DC-DC connecté au panneau [11].

II.4.3 Exemple de fonctionnement

- **Fuzzification** : Supposons que l'erreur $E = P_{\max} - P_{\text{actuelle}}$ est positive et petite. Elle pourrait être classée comme « petite positive » à 70 % et « nulle » à 30 %. La variation ΔE pourrait être « négative moyenne » à 60 %.
- **Règles floues** : Une règle pourrait être : « SI E est petite positive et ΔE est négative moyenne, ALORS augmenter légèrement la tension. »
- **Défuzzification** : La sortie floue (par exemple, « augmenter légèrement ») est convertie en une valeur précise, comme un ajustement de +0,1 V.
- **Avantages**
- **Robustesse** : Gère bien les non-linéarités et les variations rapides des conditions environnementales.
- **Adaptabilité** : Ne nécessite pas un modèle mathématique précis du système.
- **Réduction des oscillations** : Converge plus précisément vers le MPP comparé aux méthodes traditionnelles.
- **Limites**
- **Complexité de conception** : Nécessite une expertise pour définir les fonctions d'appartenance et les règles floues.
- **Dépendance à l'expertise humaine** : Les performances dépendent de la qualité des règles établies.

II.5 Réseaux de neurones (ANN)

II.5.1 Principe de base

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont des modèles d'apprentissage automatique inspirés du fonctionnement des neurones biologiques. Ils sont composés de couches de nœuds (neurones) interconnectés[12] :

- **Couche d'entrée** : Reçoit les données brutes (par exemple, irradiation, température).
- **Couches cachées** : Effectuent des calculs pour extraire des relations complexes.
- **Couche de sortie** : Fournit la prédiction ou la décision (par exemple, tension ou courant optimal pour le MPP).

Les ANN apprennent en ajustant les poids des connexions entre neurones à l'aide d'un algorithme comme la rétropropagation du gradient, basé sur des données d'entraînement.

II.5.2 Application au MPPT

Dans le contexte du MPPT, les ANN sont utilisés pour prédire la tension ou le courant correspondant au MPP en fonction des conditions environnementales (irradiation, température, etc.). Le processus comprend [12]:

- **Entraînement** : Le réseau est entraîné sur un ensemble de données historiques contenant des mesures d'irradiation, de température, et les valeurs correspondantes de tension/courant au MPP.
- **Prédiction** : Une fois entraîné, le réseau prend en entrée les conditions actuelles (par exemple, irradiation = 800 W/m², température = 30°C) et prédit directement la tension ou le courant optimal.
- **Mise à jour** : Le réseau peut être périodiquement réentraîné pour s'adapter à des changements à long terme (par exemple, dégradation du panneau).
- **Exemple de fonctionnement**
- **Entrées** : Irradiation (W/m²), température (°C), et éventuellement la puissance actuelle.
- **Sortie** : Tension ou courant optimal pour le MPP.
- **Structure typique** : Un réseau avec 2-3 couches cachées, chaque couche ayant 10-50 neurones, selon la complexité.
- **Avantages**
- **Capacité d'apprentissage** : Les ANN peuvent modéliser des relations non linéaires complexes sans modèle mathématique explicite.
- **Rapidité** : Après entraînement, les prédictions sont quasi instantanées.
- **Adaptabilité** : S'adapte aux variations environnementales et aux changements dans le comportement du panneau.
- **Limites**
- **Entraînement intensif** : Nécessite une grande quantité de données de qualité pour l'entraînement.
- **Complexité computationnelle** : L'entraînement et la mise en œuvre peuvent être coûteux en termes de ressources.
- **Dépendance aux données** : Les performances dépendent de la qualité et de la représentativité des données d'entraînement.

II.6 PSO

II.6.1 Principe de base

L'optimisation par essaim de particules (PSO) est une métaheuristique inspirée du comportement collectif des animaux, comme les vols d'oiseaux ou les bancs de poissons. Chaque « particule » représente une solution potentielle (par exemple, une combinaison de

tension et de courant) et évolue dans un espace de recherche en ajustant sa position en fonction de [13] :

- **Sa meilleure position connue** (expérience individuelle).
- **La meilleure position globale** connue par l'essaim (expérience collective).
- L'algorithme PSO repose sur :
- **Initialisation** : Les particules sont placées aléatoirement dans l'espace de recherche (par exemple, différentes valeurs de tension).
- **Évaluation** : Chaque particule est évaluée en fonction d'une fonction objectif (ici, la puissance extraite du panneau).
- **Mise à jour** : Les particules ajustent leur vitesse et leur position en fonction des meilleures solutions individuelles et globales.
- **Convergence** : L'essaim converge vers la solution optimale (le MPP).

II.6.2 Application au MPPT

Dans le MPPT, chaque particule représente une combinaison possible de tension ou de courant. L'objectif est de maximiser la puissance extraite ($P=V \times I$). L'algorithme PSO explore l'espace des solutions pour identifier rapidement le MPP, même sous des conditions changeantes (par exemple, variations soudaines de l'ensoleillement).

II.6.3 Exemple de fonctionnement

- **Initialisation** : 10 particules sont placées avec des tensions aléatoires entre 10 V et 40 V.
- **Évaluation** : Pour chaque particule, la puissance $P=V \times I$ est calculée.
- **Mise à jour** : Chaque particule ajuste sa tension en fonction de la meilleure tension qu'elle a trouvée et de la meilleure tension globale de l'essaim.
- **Résultat** : Après quelques itérations, l'essaim converge vers la tension correspondant au MPP.
- **Avantages**
- **Convergence rapide** : PSO trouve souvent le MPP en quelques itérations, même sous conditions dynamiques.
- **Simplicité** : Facile à implémenter, avec peu de paramètres à ajuster.
- **Robustesse** : Efficace même dans des environnements bruités ou non linéaires.
- **Limites**
- **Risque de convergence prématurée** : Peut se coincer dans un maximum local si les paramètres ne sont pas bien réglés.
- **Dépendance aux paramètres** : La performance dépend du choix du nombre de particules, des coefficients d'accélération, etc.
- **Coût computationnel** : Plus exigeant que certaines méthodes simples comme P&O.

II.7 Comparaison des trois approches

Le tableau II.1 présente une comparaison synthétique des trois techniques d'optimisation intelligentes utilisées pour le MPPT, en soulignant leurs avantages, limites et domaines d'application idéaux [11,12,13].

Tableau II. 1 Comparaison des trois approches

Méthode	Avantages	Limites	Idéal pour
Logique floue	Robustesse, adaptabilité, pas besoin de modèle précis	Complexité de conception, dépendance à l'expertise	Systèmes avec incertitude et non-linéarités
Réseaux de neurones	Apprentissage automatique, rapidité après entraînement, adaptabilité	Nécessite beaucoup de données, entraînement coûteux	Systèmes avec données historiques abondantes
PSO	Convergence rapide, simplicité, efficacité sous conditions changeantes	Risque de convergence prématurée, réglage des paramètres	Optimisation rapide dans des environnements dynamiques

II.8 Conclusion

Les principales techniques d'optimisation du MPPT ont été présentées, avec un accent particulier sur les approches intelligentes telles que PSO, FLC et ANN. Ces méthodes ont démontré des performances supérieures à la méthode classique P&O, notamment en termes de rapidité de convergence et de précision. Chaque algorithme se distingue par des avantages spécifiques selon les conditions d'exploitation. Les résultats obtenus seront approfondis et validés par des simulations comparatives dans le chapitre suivant.

Chapitre III

**Simulation et analyse des performances d'un
algorithme MPPT amélioré**

Chapitre III : Simulation et analyse des performances d'un algorithme MPPT amélioré

III.1 Introduction

Dans le contexte de l'optimisation de la production photovoltaïque, les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) jouent un rôle essentiel. Ce chapitre présente la modélisation et la simulation de différentes méthodes MPPT, notamment P&O, PSO, FLC et ANN, dans un environnement MATLAB/Simulink. Plusieurs scénarios réalistes sont étudiés, tels qu'un ensoleillement constant, des variations lentes et brusques de l'irradiance, des conditions d'ombrage partiel, et des changements de charge. L'objectif est d'analyser la performance de chaque algorithme en termes de rapidité, de stabilité et d'efficacité de suivi énergétique.

III.2 Modélisation et simulation d'un générateur PV

La modélisation d'un générateur photovoltaïque se base sur la modélisation d'une cellule solaire individuelle, en identifiant les caractéristiques électriques à travers un ensemble de paramètres décrivant son comportement physique. La cellule solaire est un dispositif semi-conducteur dont la représentation mathématique dépend de l'application visée, mais le modèle repose généralement sur une équivalence électrique qui reflète les phénomènes physiques influençant les performances de la cellule [1,3,5]. Cette modélisation permet ensuite de simuler, à l'aide d'outils numériques comme MATLAB/Simulink, le comportement global du générateur photovoltaïque dans un environnement réel.

III.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La modélisation d'une cellule photovoltaïque consiste à représenter mathématiquement et électriquement le comportement de cette cellule, afin d'analyser et de prédire sa performance sous différentes conditions d'ensoleillement, de température, de charge, etc [1].

A. Générateur photovoltaïque idéal

Le modèle de base est composé de :

- Une source de courant I_{ph} , représentant le courant généré par l'irradiation lumineuse.

- Une diode, représentant la jonction p-n du semi-conducte

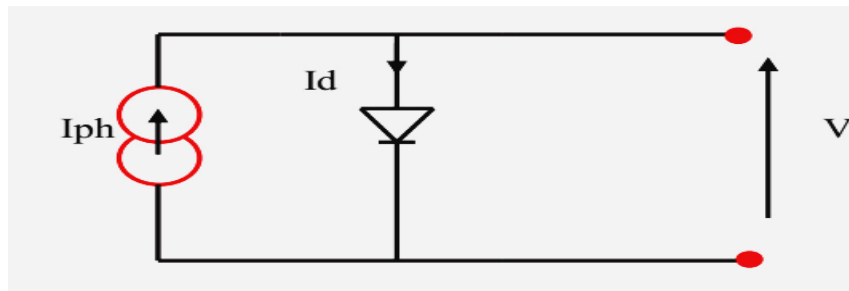


Figure III. 1 Modèle de cellule photovoltaïque idéal

En appliquant la loi des nœuds de Kirchhoff au point de sortie, on obtient :

$$I = I_{ph} - I_d \tag{III.1}$$

- la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode : $V = V_d$
- La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation

$$I_d = I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \tag{III.2}$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : La tension au borne de diode

V_t : KT/q potentielle thermique

Donc la relation (III.1) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \tag{III.3}$$

B. Générateur photovoltaïque réel

Contrairement au modèle idéal ou simplifié, le générateur photovoltaïque réel prend en compte les effets physiques et les pertes présentes dans une véritable cellule solaire. Il s'agit d'un modèle plus précis, souvent appelé modèle à une diode ou à deux diodes, selon le degré de complexité [1].

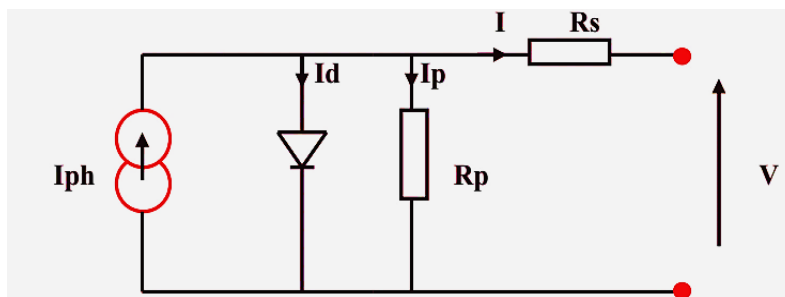


Figure III. 2 Modèle de la cellule photovoltaïque réel

Donc on a :

$$I = I_{ph} - I_d - I_P \quad (III.4)$$

La tension aux bornes de la diode devient :

$$V_d = V + IR_s \quad (III.5)$$

$$I_d = I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V + IR_s}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (III.6)$$

$$I_P = \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \right) \quad (III.7)$$

Avec:

- I : Le courant fourni par la cellule
- $I_{ph} = I_{SC} \left(\frac{G}{1000} \right)$ Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).
- I_0 : Le courant de saturation de la diode.


Donc (III.4) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V + IR_s}{V_t}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \right) \quad (III.8)$$

III.2.2 Simulation du panneau Kyocera Solar KC200GT

À partir des informations techniques fournies dans la datasheet du fabricant, disponible en annexe, il est constaté que le module Kyocera Solar KC200GT est composé de 54 cellules solaires en silicium polycristallin connectées en série. Ce module délivre une puissance maximale de 200 W sous conditions standards (STC). Les principaux paramètres du panneau sont extraits et regroupés dans le Tableau (III.1) [14].

Tableau III. 1 Paramètres du Kyocera Solar KC200GT dans S.T.

	Puissance Nominale	$P_{nom}(W)$	200.143 W
	Tension à puissance maximale	$V_{pm}(V)$	26.3 V
	Courant à puissance maximale	$I_{pm}(A)$	7.61 A
	Tension en circuit ouvert	$V_{co}(V)$	32.9 V
	Courant de court-circuit	$I_{cc}(A)$	8.21 A
	Nombres des cellules	N_s	54

Les fabricants de panneaux photovoltaïques précisent généralement les performances de leurs produits dans des conditions standards dites S.T.C (Standard Test Conditions). En s'appuyant sur ces données ainsi que sur les équations précédemment établies, le panneau KC200GT a été étudié en considérant les conditions suivantes : une température ambiante $T_a = 25^\circ\text{C}$, une irradiance $G = 1000 \text{ W/m}^2$, et une énergie de gap typique du silicium de 1,12 eV.

Les résultats obtenus ont été représentés dans la figure II.3. Comme le montre la courbe simulée, la caractéristique courant-tension $I(V)$ du panneau KC200GT présente un comportement non linéaire. Trois points essentiels ressortent de cette courbe :

- Le point de puissance maximale (MPP), noté P_m
- Le courant de court-circuit I_{cc}
- La tension à vide V_{co}

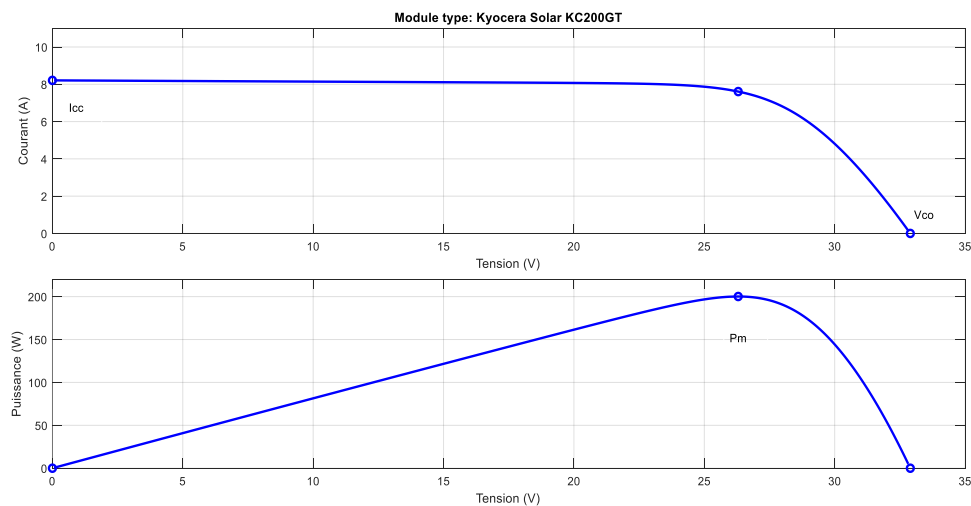


Figure III. 3 Caractéristiques du panneau KC200GT (a) Caractéristique $P(V)$ et $I(V)$

La figure III.3 montre clairement qu'un panneau photovoltaïque ne peut être assimilé à un générateur classique, qu'il soit de courant ou de tension. Il est donc considéré comme une source de puissance. Le graphique indique que la puissance maximale délivrée par le panneau KC200GT est de 200.143 W, et cette puissance est atteinte au point où la dérivée

$$\frac{dP}{dv} = 0.$$

III.2.3 Influence des différents paramètres

A. Influence de l'éclairement

Dans la figure III.4, nous représentons les résultats concernant les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du panneau à 25°C obtenus pour divers valeurs de l'éclairement.

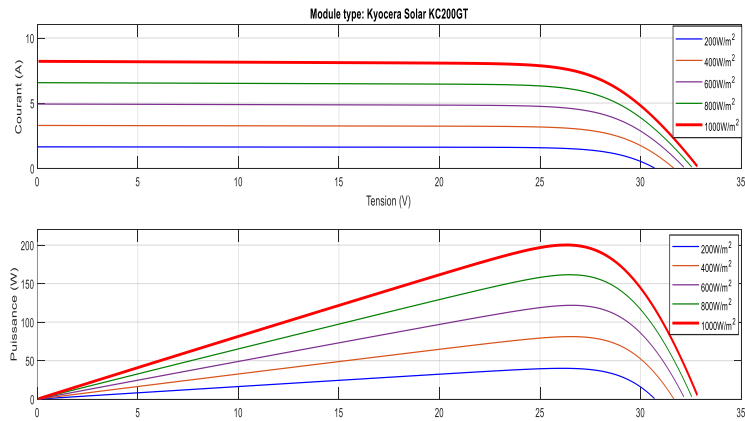


Figure III. 4 Influence de flux lumineux sur les caractéristiques $P(v)$ et $I(v)$

En se basant sur la comparaison avec les caractéristiques fournies par le fabricant, on peut conclure qu'il existe une bonne concordance entre les caractéristiques réelles (expérimentales) et celles obtenues par la simulation sous MATLAB. À chaque niveau d'irradiation correspond une puissance maximale que le panneau peut fournir. On observe également une légère diminution de la tension en circuit ouvert due à la baisse du flux lumineux. De plus, il est clair que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement.

B. Influence de la température

La température joue un rôle essentiel dans le comportement des cellules photovoltaïques. La figure (III.5) illustre la réponse du module sous un éclairement constant de 1000 W/m², pour des températures variant de 15 à 55 °C. Il est observé que le courant augmente avec l'élévation de la température, tandis que la tension à circuit ouvert diminue. Cette diminution de la tension entraîne, en conséquence, une baisse de la puissance maximale que le module peut fournir.

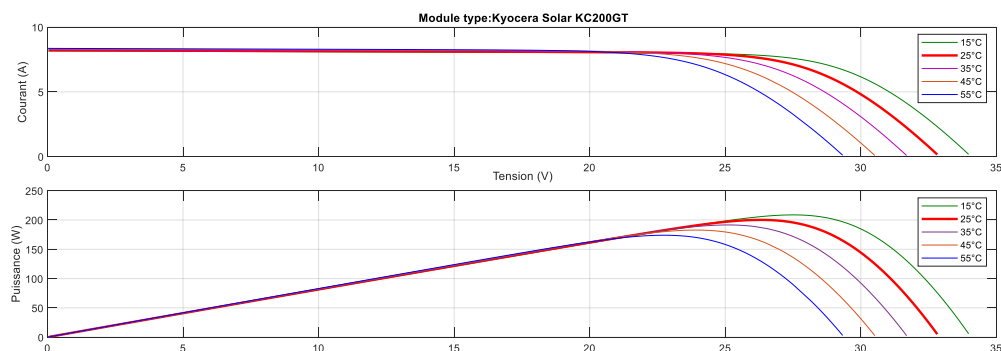


Figure III. 5 Influence de la température sur les caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$

III. 3 Modélisation et Simulation d'un hacheur BOOST

Le modèle de circuit équivalent d'un hacheur BOOST est dans la figure III.6 [6,7] :

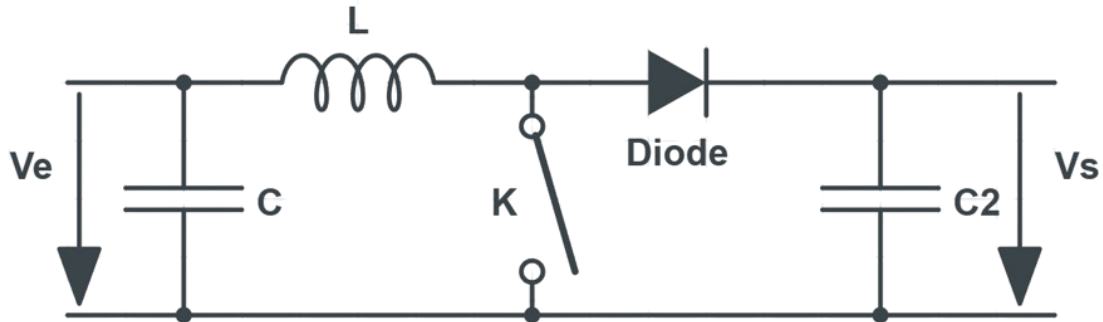


Figure III. 6 Circuit d'un hacheur BOOST

III.3.1 Phases de fonctionnement

Le fonctionnement du hacheur Boost repose sur deux phases principales :

❖ Phase d'accumulation d'énergie

Le circuit d'un hacheur BOOST avec interrupteur fermé est montré dans la figure III.7 :

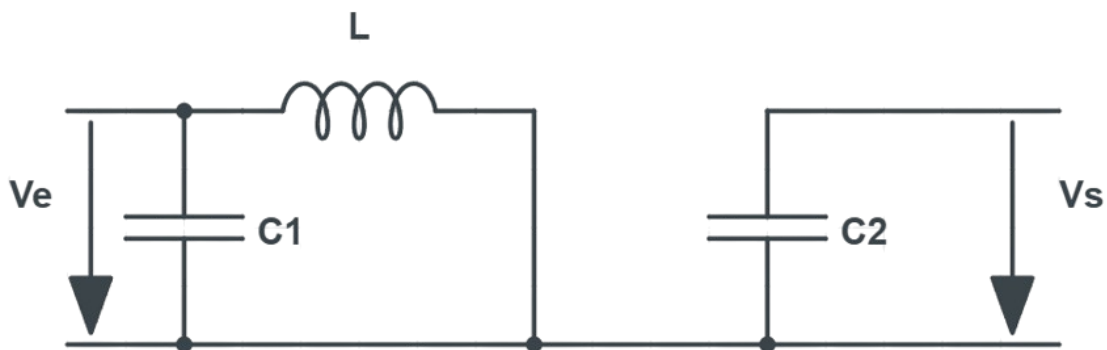


Figure III. 7 Circuit idéal d'un hacheur BOOST avec interrupteur fermé

- Le transistor est en conduction : le courant circule dans l'inductance L et la charge.
- L'inductance stocke de l'énergie sous forme de champ magnétique.
- La diode D est **bloquée** et empêche tout courant de passer vers la charge.

Les équations équivalentes d'un circuit d'un hacheur BOOST avec interrupteur fermé sont :

$$I_{c1}(t) = C1 \frac{dV_e(t)}{dt} = I(t) - I_L(t) \quad (III.9)$$

$$I_{c2}(t) = C2 \frac{dV_e(t)}{dt} = -I_s(t) \quad (\text{III.10})$$

$$V_l(t) = C1 \frac{dI_L(t)}{dt} = V_e(t) \quad (\text{III.11})$$

❖ Phase de transfert d'énergie

Le circuit d'un hacheur BOOST avec interrupteur ouvert est montré dans la figure III.8 :

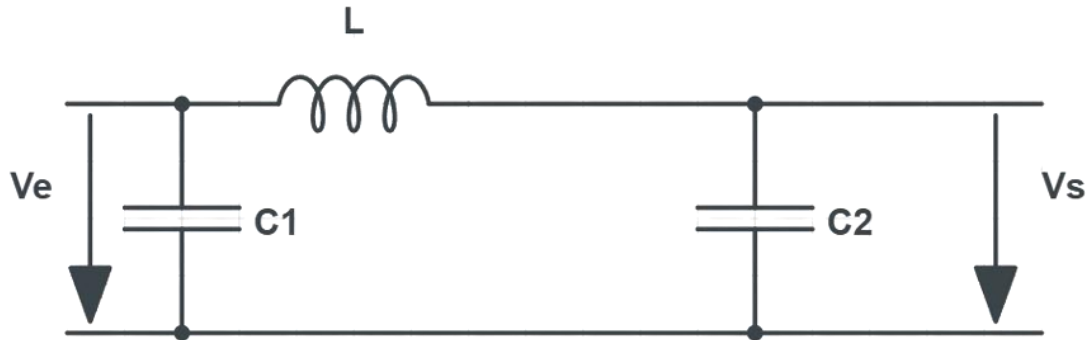


Figure III. 8 Circuit d'un hacheur BOOST avec interrupteur ouvert

- L'inductance libère son énergie sous forme de courant, qui s'ajoute à V_{in} .
- La diode devient **passante**, permettant au courant de circuler vers la charge.
- Le condensateur C se charge pour lisser la tension de sortie.

Les équations équivalentes d'un circuit d'un hacheur BOOST avec interrupteur ouvert sont :

$$I_{c1}(t) = C1 \frac{dV_e(t)}{dt} = I(t) - I_L(t) \quad (\text{III.12})$$

$$I_{c2}(t) = C2 \frac{dV_e(t)}{dt} = I_L(t) - I_s(t) \quad (\text{III.13})$$

$$V_l(t) = C1 \frac{dI_L(t)}{dt} = V_e(t) - V_s(t) \quad (\text{III.14})$$

III.3. 3 Simulation du hacheur BOOST

La simulation du hacheur a été réalisée, de la même manière que celle du système photovoltaïque, en utilisant les outils disponibles dans Simulink.

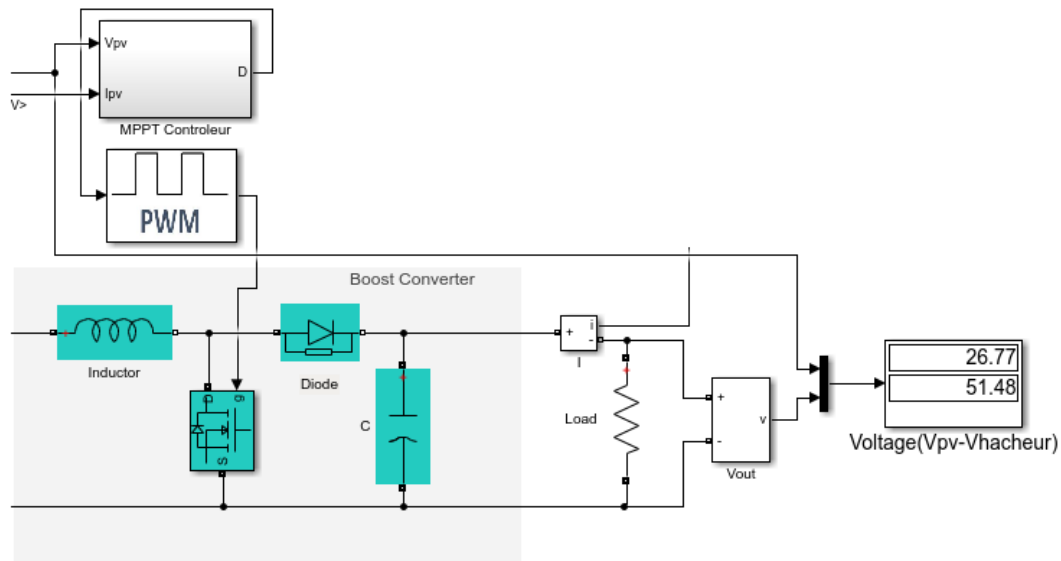


Figure III. 9 Schéma de hacheur BOOST sous Simulink

La variation du rapport cyclique entraîne une modification de la tension de sortie, tandis que la tension d'entrée reste constante. En régime permanent et en supposant un fonctionnement idéal (sans pertes), la tension de sortie \$V_s\$ est donnée par [6,7] :

$$V_s = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad (\text{III.15})$$

Où \$\alpha\$ est le rapport cyclique.

Plus \$\alpha\$ est élevé, plus \$V_s\$ est grand.

Pour \$\alpha \rightarrow 1\$, \$V_s \rightarrow \infty\$, mais en pratique, des limites existent en raison des pertes.

III.4 Comparaison entre les techniques MPPT

Nous proposons le schéma suivant pour implémenter les différents algorithmes mentionnés précédemment (P&O, PSO, Fuzzy logic et ANN).

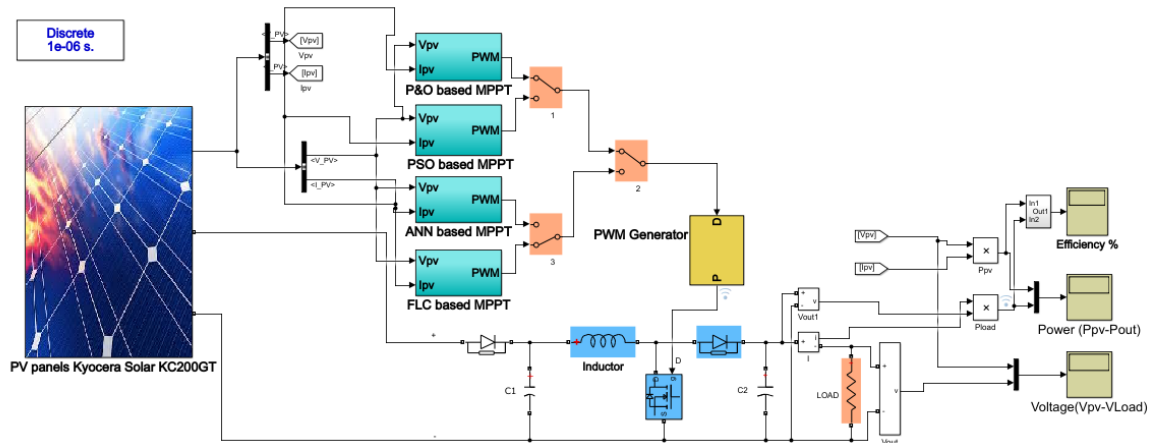


Figure III. 10 Modèle Simulink d'un système photovoltaïque avec hacheur boost et intégration de plusieurs algorithmes MPPT (P&O, PSO, ANN, FLC)

III.4.1 Indicateurs de performance pour l'évaluation des algorithmes

MPPT

A. Temps de stabilisation (Settling Time)

Temps requis pour que la puissance reste dans une bande de $\pm 2\%$ autour de la valeur finale après une perturbation.

B. Efficacité de suivi (Tracking Efficiency)

Rapport entre la puissance de sortie du panneau photovoltaïque sous contrôle MPPT, et peut être calculée comme le produit de la tension et du courant au point de puissance maximale (MPP) du panneau (P_{mppt}) et la puissance de sortie du convertisseur boost, et peut être calculée comme le produit de la tension de sortie et du courant de charge (P_{out}) [6,7].

$$\eta = \frac{P_{mppt}}{P_{out}} \times 100 \quad (III.16)$$

III.4.2 Scénarios de test pour l'évaluation des algorithmes MPPT

Afin d'évaluer les performances de chaque algorithme, nous allons simuler les différentes méthodes MPPT selon quatre scénarios distincts [4,5,15]:

- Environnement stable ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Variation lente et linéaire de l'irradiance
- Changement brusque de l'ensoleillement
- Variation de charge (load)

A. Environnement stable

Les conditions atmosphériques sont fixées à 25 °C et à une irradiance de 1000 W/m². La figure III.11 présente la réponse du système pour les différents algorithmes MPPT.

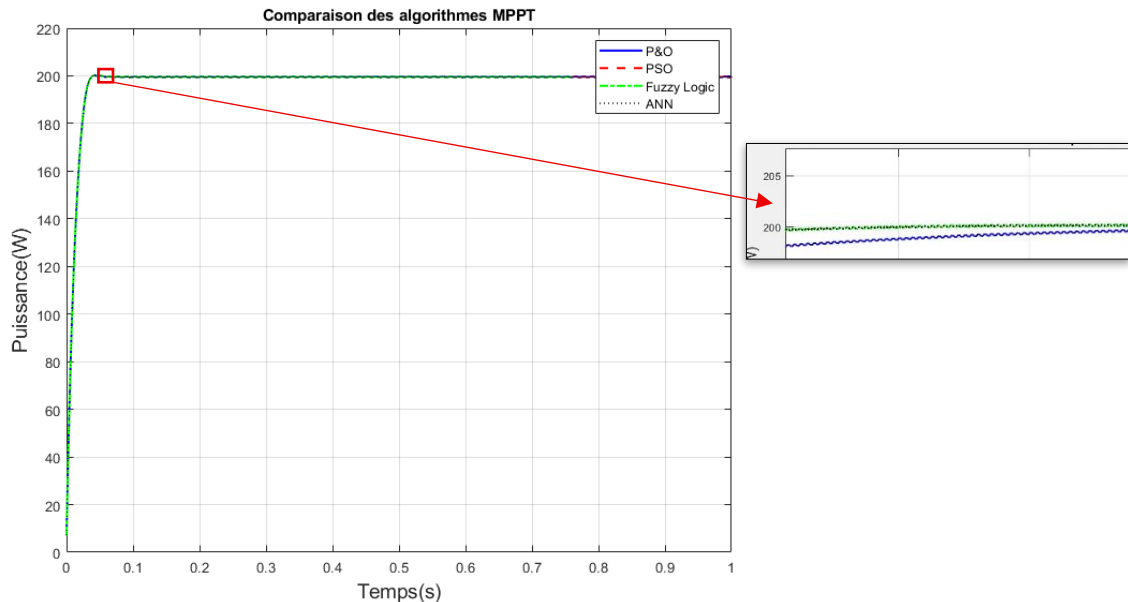


Figure III. 11 Comparaison des techniques MPPT dans un environnement stable

Tableau III. 2 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 1)

MPPT Technique	Temps de stabilisation	Efficacité de suivi (Efficiency)
P&O	0 .04 s	94.72%
PSO	0.038s	95.53%
Fuzzy Logic	0.037s	95.53%
ANN	0.036s	95.53%

La figure III.11 illustre que les algorithmes **PSO, Fuzzy Logic et ANN** atteignent le point de puissance maximale rapidement et avec **moins d'oscillations** que **P&O**. Une fois la puissance maximale atteinte, les courbes restent stables sans grandes oscillations.

L'algorithme **P&O** montre de légères ondulations (oscillations typiques de P&O), tandis que les autres (surtout PSO, Fuzzy, ANN) semblent plus stables.

B. Variation lente et linéaire de l'irradiance

La variation lente et linéaire de l'irradiance permet de simuler des conditions d'ensoleillement progressives, comme celles rencontrées au lever ou au coucher du soleil.

La figure III.12 montre l'évolution de la puissance avec la variation de l'ensoleillement

pour les différentes commandes MPPT.

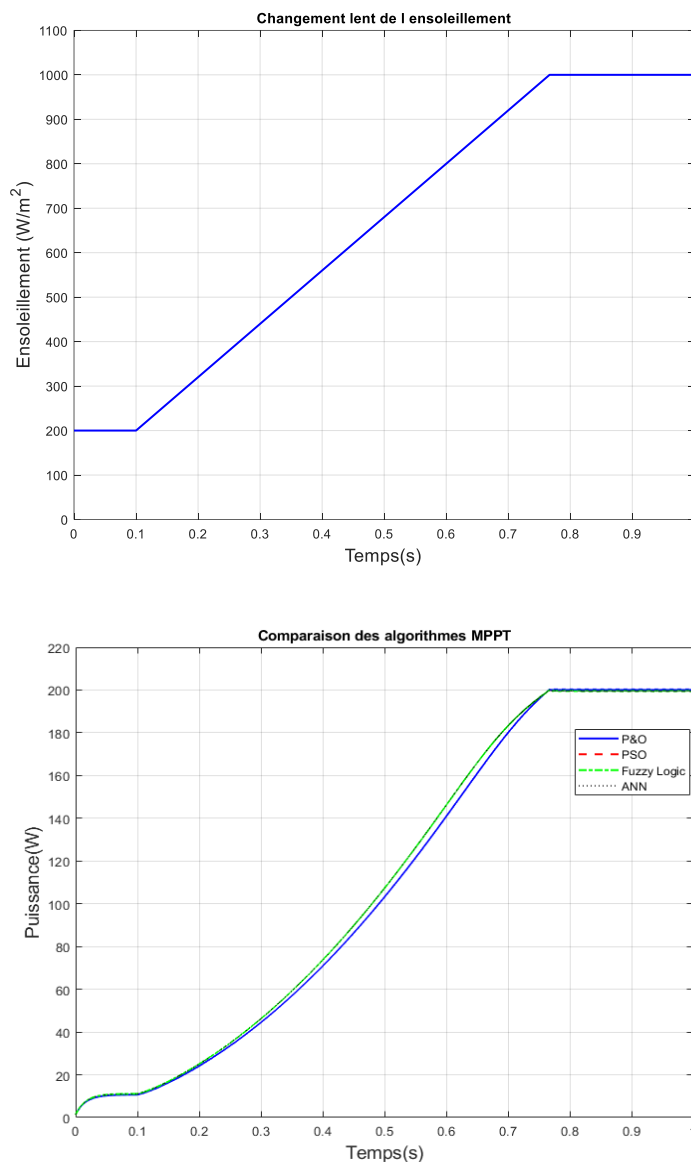


Figure III. 12 Comparaison de la puissance de sortie des différentes techniques MPPT lors d'un changement lent d'ensoleillement

Tableau III. 3 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 2)

MPPT Technique	Temps de stabilisation	Efficacité de suivi (Efficiency)
P&O	0.75 s	88.26%
PSO	0.70s	95.53%
Fuzzy Logic	0.70s	95.53%
ANN	0.68s	95.53%

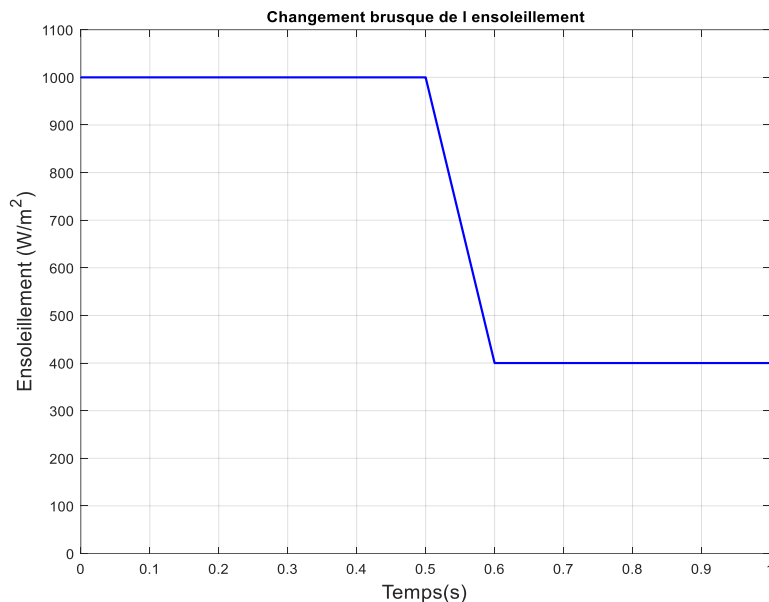
Toutes les techniques atteignent la puissance maximale de 200 W. Cependant, l'algorithme ANN présente une vitesse de convergence légèrement supérieure par rapport

aux autres techniques. En revanche, la méthode P&O est la plus lente et montre une légère oscillation autour du point de puissance maximale. Les techniques PSO, Fuzzy Logic et ANN affichent des performances très proches en régime stable, atteignant rapidement et efficacement le MPP sans oscillations notables.

C. Changement brusque de l'ensoleillement

Pour ce test, la température est maintenue constante à 25 °C. Le changement brusque de l'ensoleillement correspond à une variation soudaine de l'irradiance, simulant par exemple le passage rapide d'un nuage devant le panneau. Cette situation met à l'épreuve la capacité des algorithmes MPPT à réagir rapidement pour suivre le nouveau point de puissance maximale.

La figure III.13 illustre l'évolution de la puissance de sortie obtenue avec différentes techniques MPPT lors d'une variation brusque de l'irradiance.



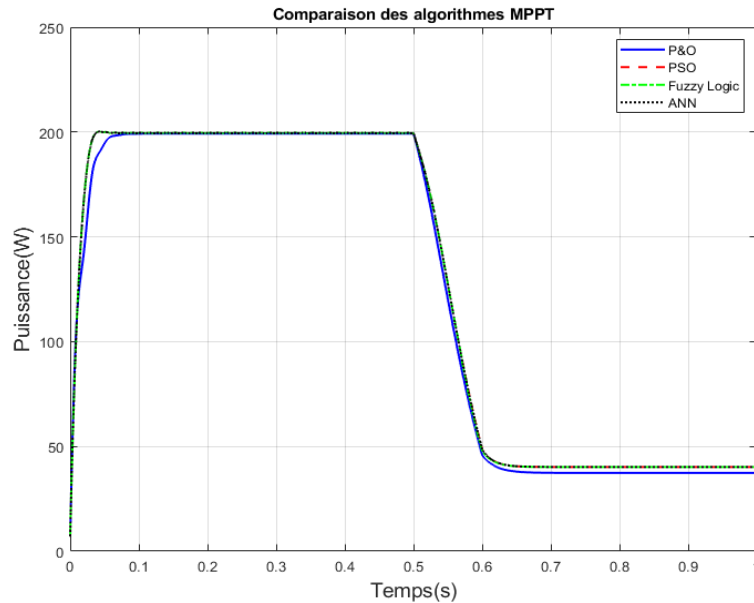


Figure III. 13 Évolution de la puissance de sortie pour différentes techniques MPPT lors d'une variation brusque de l'irradiance

Tableau III. 4 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 3)

MPPT Technique	Temps de stabilisation	Efficacité de suivi (Efficiency)
P&O	0.071 s	87.73%
PSO	0.041s	95.53%
Fuzzy Logic	0.041s	95.53%
ANN	0.030s	95.53%

Avant $t = 0.5$ s, tous les algorithmes convergent efficacement vers la puissance maximale autour de 200 W. À $t = 0.5$ s, une baisse rapide de l'irradiance fait chuter la puissance disponible à environ 45 W. PSO, FLC et ANN réagissent plus rapidement et atteignent plus vite la nouvelle puissance maximale que P&O.

P&O montre un retard de réponse visible par une courbe plus lente à se stabiliser, confirmant sa faible robustesse aux changements brusques.

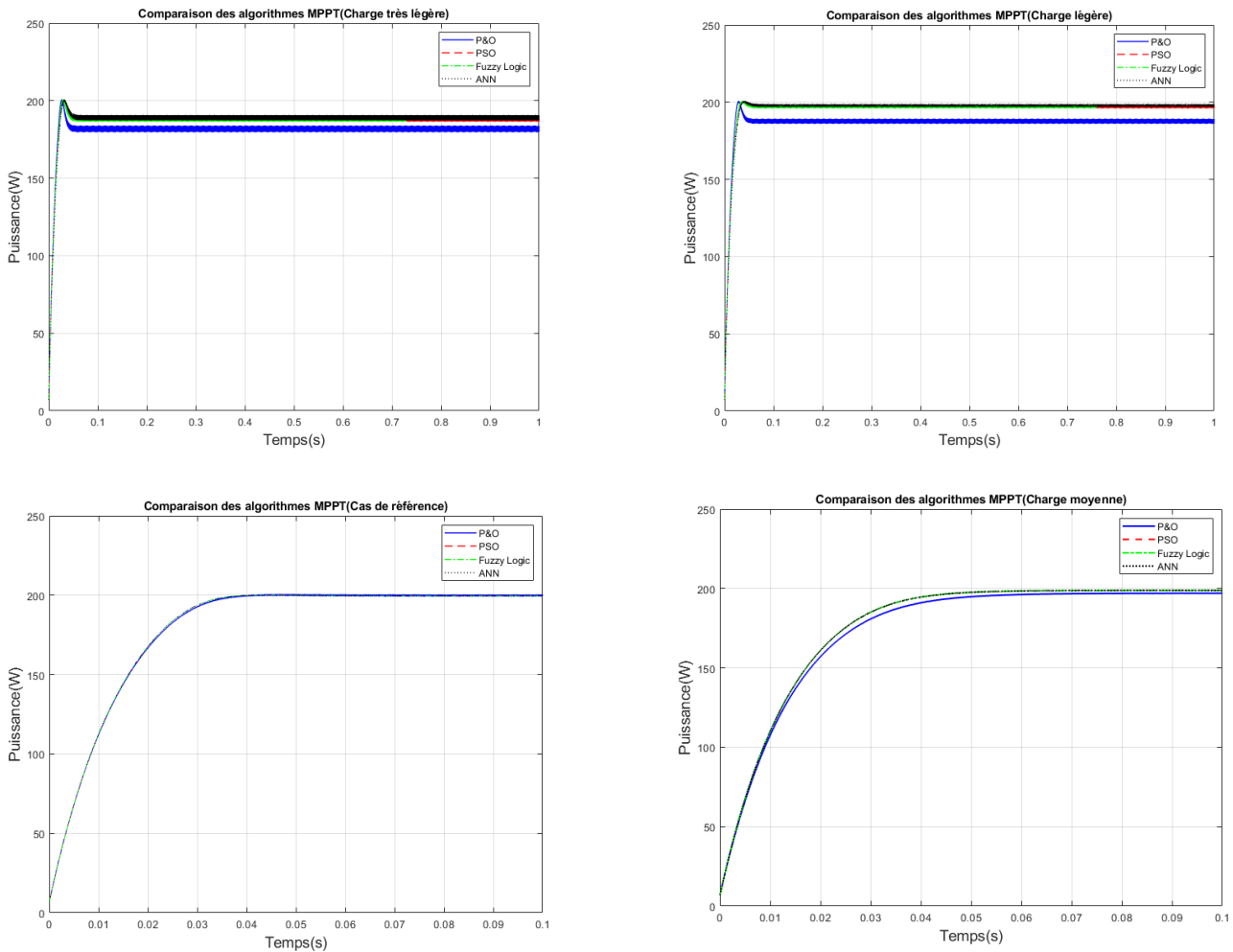
D. Variation des charges

Dans ce scénario, l'irradiance et la température sont maintenues constantes ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), tandis que la charge électrique connectée au système PV est modifiée brusquement pour observer la capacité du contrôleur MPPT à suivre le MPP malgré ce changement. Différentes charges ont été appliquées au système photovoltaïque afin d'évaluer les performances du contrôleur MPPT sous diverses conditions de consommation, comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau III. 5 Variation des charges

État	Charge (W)	Interprétation
Charge très légère	80 W	Teste les performances avec une faible consommation
Charge légère	100 W	Début de la plage de faible consommation
Cas de référence	180 W	Cas de référence utilisé actuellement
Charge moyenne	200 W	Près de la puissance maximale du panneau
Charge élevée	220 W	Supérieure à la capacité du panneau → test de surcharge
Charge très élevée	250 W	Cas irréaliste, utilisé pour tester les protections

Figure III. 14 l'évolution de la puissance en fonction de la variation des charges pour les différentes techniques de commande MPPT



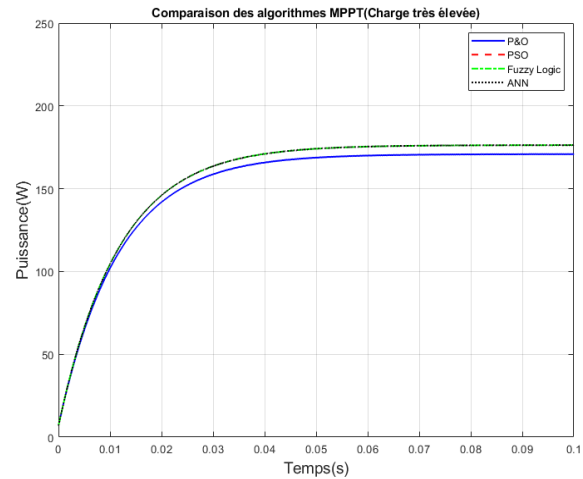
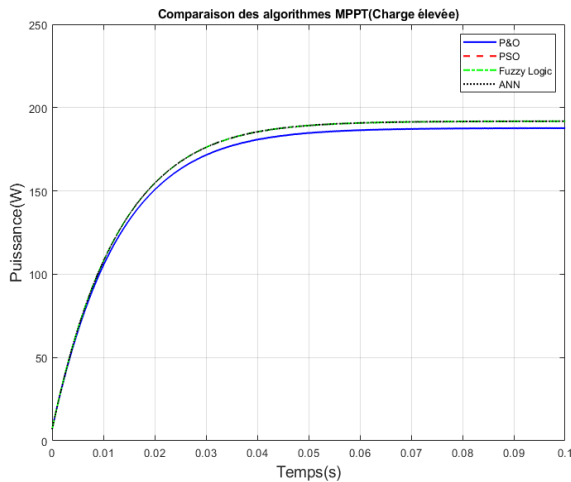


Tableau III. 6 Performance comparative des méthodes MPPT(scénario 4)

MPPT Technique	Temps de stabilisation	Efficacité de suivi (Efficiency)
P&O	0.05 s	89.26%
PSO	0.045s	96.53%
Fuzzy Logic	0.045s	96.53%
ANN	0.040s	97.03%

FLC se distingue par sa vitesse de convergence, mais souffre d'un manque de stabilité (ondulations). ANN et PSO offrent le meilleur compromis entre rapidité, précision et stabilité. P&O est le moins performant dans les conditions dynamiques, mais reste simple et efficace dans les situations stables.

III.4.3 Analyse comparative des méthodes MPPT

Afin d'évaluer la robustesse et l'efficacité des différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), plusieurs scénarios de test ont été simulés. Ces scénarios incluent un environnement stable, une variation lente et linéaire de l'irradiance, un changement brusque d'ensoleillement.

Le tableau ci-dessous résume les performances observées des algorithmes P&O, PSO, FLC et ANN selon ces différentes conditions :

Tableau III. 7 Analyse comparative des méthodes MPPT selon différents scénarios

Scénario de test	P&O	PSO	FLC (Fuzzy Logic)	ANN
Environnement stable	Temps de stabilisation élevé	Rapide convergence, bonne stabilité	Bonne réponse	Excellente précision, réponse rapide
Variation lente de l'irradiance	Réponse lente	Réglage adaptatif efficace	Bonne robustesse	Très bonne adaptation
Changement brusque de l'ensoleillement	Oscillations, dérive possible	Bonne réponse dynamique	Réponse correcte	Réponse très rapide, stable
Variation de charge	Sensible, performance variable	Adaptabilité modérée	Réaction fluide	Très bonne réponse aux charges

III.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer les performances comparatives de différentes techniques MPPT (P&O, PSO, FLC et ANN) à travers plusieurs scénarios de test représentatifs des conditions réelles de fonctionnement d'un système photovoltaïque. L'analyse a montré que les méthodes intelligentes (PSO, FLC, ANN) surpassent la méthode classique P&O en termes de rapidité de convergence, de stabilité et d'efficacité, notamment lors de variations rapides de l'irradiance. La technique FLC a également démontré une bonne robustesse face à la variation de charge. La méthode P&O reste simple à mettre en œuvre, mais ses performances sont limitées en conditions dynamiques.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Dans un contexte où l'efficacité énergétique et la durabilité constituent des enjeux majeurs, ce travail a porté sur l'optimisation du suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. Après avoir souligné les limites des méthodes classiques, telles que Perturb & Observe et la conductance incrémentale, lenteur de convergence, oscillations autour du MPP et faible adaptabilité face aux variations rapides d'irradiance ou de charge, nous avons intégré et évalué trois approches d'intelligence artificielle : l'algorithme à essaim particulaire (PSO), la logique floue (FLC) et les réseaux de neurones artificiels (ANN) [5].

La modélisation du système PV et les simulations sous Simulink, couvrant des scénarios réalistes (variation lente et brusque de l'irradiance et changement de charge), ont confirmé que ces techniques intelligentes améliorent significativement la rapidité, la stabilité et la précision du suivi MPPT par rapport à P&O. En particulier, ANN et PSO offrent un excellent compromis entre vitesse de convergence et robustesse, tandis que FLC se distingue par sa capacité à gérer efficacement les variations de charge. Ces résultats valident la pertinence de l'IA pour le pilotage optimal des installations solaires et ouvrent la voie à des systèmes photovoltaïques plus performants et adaptatifs aux conditions environnementales changeantes.

Les perspectives de recherche incluent l'hybridation d'algorithmes intelligents, l'implémentation en temps réel sur microcontrôleurs ou DSP, ainsi que l'application à des champs photovoltaïques de grande échelle ou intégrés à des réseaux intelligents. De telles extensions permettraient de consolider les gains de rendement observés et de contribuer à la transition énergétique vers des solutions renouvelables plus fiables et efficaces.

Bibliographie

- [1] D. Rekioua and E. Matagne, "Optimization of photovoltaic power systems: Modelization, Simulation and Control," *Green Energy and Technology*, vol. 102, 2012.
- [2] H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, and M. Abid, "Étude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque," *Journal of Renewable Energies*, vol. 17, no. 3, 2023.
- [3] M. Zerouali, S. Zouirech, A. E. Ougli, B. Tidhaf, and H. Zrouri, "Improvement of conventional MPPT techniques P&O and INC by integration of fuzzy logic, " in *Proc. 2019 7th Int. Renewable and Sustainable Energy Conf. (IRSEC)*, Agadir, Morocco, 2019.
- [4] M. Bachar, "Contribution à l'optimisation de la conversion énergétique des systèmes photovoltaïques par les commandes MPPT", Thèse de doctorat, 2021. 19, pp. 1–6.
- [5] M. Hadjab, "État de l'art technologique des cellules solaires photovoltaïques", Éditions Universitaires Européennes, 2019.
- [6] F. Chegrouche et al., *Commande d'une chaîne photovoltaïque à base d'un hacheur Boost multi-niveaux*, Thèse de doctorat, Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi, 2024.
- [7] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2002, 820 pp.
- [8] R. Benyoucef, M. Benbrahim, and S. Abdelhamid, "Improving the MPP of a PV system using fuzzy controller," in *Proc. 44th PARIS Int. Conf. on Advances in Engineering, Science & Technology (PAEST-2022)*, 2022.
- [9] F. Gherraz and R. Medjdoub, *Maximum power point trackers (MPPT) pour un système PV par des méthodes classiques et des méthodes intelligentes*, Thèse de doctorat, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila, 2024.
- [10] D. Mosbah, *Optimisation du dimensionnement d'un système photovoltaïque avec stockage par les réseaux de neurones*, Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2023.
- [11] C. B. Salah and M. Ouali, "Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 83, no. 1, pp. 43–50, 2010.

- [12] O. Boubaker, "MPPT techniques for photovoltaic systems: a systematic review in current trends and recent advances in artificial intelligence," *Discover Energy*, vol. 3, no. 1, p. 9, 2023.
- [13] M. Ajaamoum, M. Kourchi, R. Alaoui, and L. Bouhouch, "Fuzzy controller to extract the maximum power of a photovoltaic system," in *Proc. IEEE Int. Renewable and Sustainable Energy Conf. (IRSEC)*, Ouarzazate, Morocco, Mar. 7–9, 2013, pp. 141–146.
- [14] Kyocera Corporation, "KC200GT: High efficiency multicrystal photovoltaic module," datasheet, Energy Matters (Kyocera distributor).
- [15] H. Abidi, L. Sidhom, and I. Chihi, "Systematic literature review and benchmarking for photovoltaic MPPT techniques," *Energies*, vol. 16, no. 8, p. 3509, 2023.