

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Automatique

Option : Automatique et informatique industriel

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Commande et optimisation d'un GPV

Présenté par :

Miloudi Abdelhakim

Soutenu le : 4 juin 2025

Devant le jury composé de :

Mr .Dhiabi Fethi

MCA

Président

Mr .Arif Ali

MCA

Encadreur

Mr .Abderrazak Guettaf

Pr

Examineur

Année universitaire : 2024 / 2025

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Automatique

Option : Automatique et informatique industriel

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER *Thème*

Commande et optimisation d'un GPV

Présenté par :

Miloudi Abdelhakim

Avis favorable de l'encadreur :

Mr .Arif Ali

Avis favorable du Président du Jury

Mr . Dhiabi Fethi

Cachet et signature

Remerciement

Au début de ce travail scientifique, je ne peux que rendre les plus sincères hommages de gratitude et de reconnaissance à Allah, le Tout-Puissant, le Tout Miséricordieux, qui nous a comblés de la bénédiction du savoir et de la guidance.

Louange à Lui comme il sied à la majesté de Sa Face et à la grandeur de Son pouvoir. Comme Il dit dans Son Livre Saint :

« Louange à Allah qui nous a guidés vers ceci. Nous n'aurions pas été guidés si Allah ne nous avait pas guidés. » (Sourate Al-A'raf, verset 43).

J'adresse mes remerciements les plus profonds, ma reconnaissance et ma haute considération à mon encadrant, **Dr. Arif Ali**, pour son soutien constant, ses conseils scientifiques précis, et son accompagnement patient durant toutes les étapes de l'élaboration de ce travail. Son dévouement, sa bienveillance et son souci permanent de la qualité ont eu un impact déterminant sur le développement et la réussite de ce projet. Je lui suis également très reconnaissant pour son encadrement tout au long de mon parcours académique dès mes débuts au sein du département de génie électrique.

Je tiens également à exprimer ma gratitude et mes remerciements les plus sincères aux membres du jury, **Pr. Abderrazak Guettaf** et **Dr. Dhiabi Fethi**, qui m'ont honoré en acceptant de juger ce travail. Je les remercie pour le temps qu'ils ont consacré à son étude attentive, ainsi que pour leurs remarques et suggestions précieuses, qui ont grandement enrichi le contenu scientifique de ce mémoire.

Je ne saurais conclure sans adresser un remerciement tout particulier, empreint de respect, de reconnaissance et d'amour, à mes chers parents. Ils n'ont ménagé aucun effort, m'ont soutenu moralement et matériellement, et ont fait d'innombrables sacrifices pour me permettre d'atteindre ce niveau de réussite et d'excellence. Leur amour inconditionnel a toujours été ma source de force et de persévérance à chaque étape de ma vie académique et personnelle. Qu'Allah leur accorde longue vie, santé et sérénité.

Résumé

Les systèmes photovoltaïques jouent un rôle important dans la production d'électricité en exploitant les rayons du soleil et en les transformant en énergie électrique. Ce travail porte sur le contrôle des systèmes photovoltaïques et l'amélioration de leur performance. Nous avons présenté l'évolution de cette technologie, ainsi que ses composants principaux tels que les panneaux solaires, les convertisseurs et le Maximum Power Point Tracker (MPPT).

Nous nous sommes ensuite concentrés sur les techniques de contrôle de la production d'énergie, notamment les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) en utilisant la logique floue et l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO). L'étude s'est ensuite orientée vers la modélisation mathématique de la cellule solaire, avec une analyse de l'impact des facteurs climatiques tels que la température et le rayonnement solaire sur la performance des panneaux solaires. Un aperçu général des différents types de convertisseurs électriques et de leur rôle dans l'amélioration de la conversion d'énergie a également été présenté.

Un système photovoltaïque a été simulé en utilisant la logique floue ainsi que l'algorithme PSO sous différentes conditions climatiques. En conclusion, les résultats ont montré que les deux techniques présentent des avantages spécifiques et qu'elles sont efficaces ensemble pour améliorer la production d'énergie photovoltaïque.

Mots clés : Énergie photovoltaïque, Contrôle des systèmes, MPPT, Logique floue, d'optimisation par essaim particulaire (PSO).

Abstract

Photovoltaic systems play an important role in electricity generation by harnessing sunlight and converting it into electrical energy. This work focuses on the control of photovoltaic systems and the improvement of their performance. We presented the evolution of this technology, along with its main components such as solar panels, converters, and the Maximum Power Point Tracker (MPPT).

We then focused on energy production control techniques, particularly maximum power point tracking (MPPT) methods using fuzzy logic and the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. The study then turned to the mathematical modeling of the solar cell, including an analysis of the impact of climatic factors such as temperature and solar irradiance on the

performance of solar panels. A general overview of the different types of electrical converters and their role in enhancing energy conversion was also presented.

A photovoltaic system was simulated using both fuzzy logic and the PSO algorithm under various climatic conditions. In conclusion, the results showed that both techniques offer specific advantages and are effective when used together to enhance photovoltaic energy production.

Keywords: Photovoltaic energy, System control, MPPT, Fuzzy logic, Particle swarm optimization (PSO).

الملخص

تلعب الأنظمة الكهروضوئية دورًا مهمًا في إنتاج الكهرباء من خلال استغلال أشعة الشمس وتحويلها إلى طاقة كهربائية. يتناول هذا العمل موضوع التحكم في الأنظمة الكهروضوئية وتحسين أدائها. قمنا بعرض تطور هذه التكنولوجيا، بالإضافة إلى مكوناتها الرئيسية مثل الألواح الشمسية، والمحولات، وجهاز تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT).

بعد ذلك، ركزنا على تقنيات التحكم في إنتاج الطاقة، وخاصة تقنيات تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) باستخدام المنطق الضبابي وخوارزمية تحسين سرب الجسيمات (PSO). ثم توجهت الدراسة نحو النمذجة الرياضية للخلية الشمسية، مع تحليل تأثير العوامل المناخية مثل درجة الحرارة والإشعاع الشمسي على أداء الألواح الشمسية. كما تم تقديم نظرة عامة على الأنواع المختلفة من المحولات الكهربائية ودورها في تحسين تحويل الطاقة.

تمت محاكاة نظام كهروضوئي باستخدام المنطق الضبابي وخوارزمية PSO تحت ظروف مناخية مختلفة. وفي الختام، أظهرت النتائج أن كلتا التقنيتين تتمتعان بمزايا خاصة، وأن استخدامهما معًا فعال في تحسين إنتاج الطاقة الكهروضوئية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الكهروضوئية، التحكم في الأنظمة، (MPPT)، المنطق الضبابي، تحسين سرب الجسيمات (PSO).

Table des matières

Résumé	
Liste des acronymes	
Liste des symboles	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale.....	02
CHAPITRE I : État de l’art	
I.1. Introduction.....	05
I.2. Historique.....	05
I.3. Système photovoltaïque	06
I.4. Différents types de système photovoltaïque	06
I.4.1. Système autonome avec batterie	06
I.4.2. Système autonome sans batterie	07
I.4.3. Systèmes raccordés au réseau	07
I.5. Modules (Panneaux) photovoltaïques.....	08
I.6. Applications photovoltaïques.....	08
I.6.1. Installation photovoltaïque autonome	09
I.6.2. Installation photovoltaïque raccordée au réseau	09
I.7. Commande Photovoltaïque	09
I.7.1. La commande MPPT	09
I.7.2. Méthode logique floue	10
I.7.3. Méthode de l’Optimisation par Essaim de Particules (PSO)	10
I.8. Avantages et inconvénients du photovoltaïque.....	11
I.8.1. Avantages de l’énergie photovoltaïque.....	11
I.8.2. Inconvénients de l’énergie photovoltaïque	11

I.9. Conclusion	12
CHAPITRE II : Modélisation du système photovoltaïque	
II.1. Introduction	14
II.2. Cellule photovoltaïque.....	14
II.2.1. Description générale	14
II.2.2. Principe de fonctionnement	14
II.3. Circuit équivalent d'une cellule solaire.....	15
II.3.1. Cas d'une cellule solaire idéale	16
II.3.2. Cas d'une cellule réelle.....	16
II.4. Paramètres photovoltaïques	17
II.4.1. Courant de court-circuit (I_{cc})	18
II.4.2. Tension de circuit ouvert (V_{co}).....	18
II.4.3. Facteur de forme FF	20
II.4.4. Le rendement	21
II.5. Association des cellules photovoltaïques	21
II.5.1. Association en série	21
II.5.2. Association des cellules en parallèle	22
II.6. L'influence de l'éclairement et de la température	23
II.6.1. Influence de la Température	24
II.6.2. Influence de l'Éclairement.....	25
II.7. Rôle des convertisseurs DC-DC	26
II.7.1. Convertisseur 'Buck'	27
II.7.2. Convertisseur 'BOOST'	29
II.7.3. Convertisseur 'Buck-Boost'	33
II.8. Conclusion	36
CHAPITRE III: Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT	
III.1. Introduction	38

III.2. Méthodes de poursuite du point de puissance maximale MPPT	38
III.3. Méthode la logique floue.....	39
III.3.1. Historique et définition.....	39
III.3.2. Principe de la logique floue.....	40
III.3.3. Opérations sur les ensembles flous	41
III.3.3.1. L'union (Opérateur OU).....	41
III.3.3.2. L'intersection (Opérateur ET)	42
III.3.3.3. Le complément (Opérateur NON).....	42
III.3.3.4. Raisonnement flou.....	43
III.4. Algorithme basée sur la logique floue.....	43
III.4.1. Étape de Fuzzification	44
III.4.2. Étape d'Inférence	45
III.4.3. Étape de Défuzzification	47
III.5. Avantages et inconvénients de la logique floue	47
III.6. La méthode de l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO).....	48
III.6.1. Définition de PSO	48
III.6.2. Principe de fonctionnement de PSO.....	49
III.6.3. Mécanisme de confinement.....	53
III.6.4. Déroulement d'algorithme	54
III.7. Avantages et inconvénients de PSO	56
III.8. Conclusion.....	57
CHAPITRE IV : Simulations et Résultats	
IV.1. Introduction.....	59
IV.2. Les caractéristiques de panneau photovoltaïque utiliser.....	59
IV.3. Schéma d'un système photovoltaïque sous PSC dont le MPP est suivi à base de l'algorithme PSO.....	60
IV.4. Poursuite du point MPP par la méthode MPPT basée sur PSO	61

IV.5. Résultat de simulation MPPT par la logique floue	64
IV.5.1. Fonctionnement du système flou	64
IV.5.1.1. Schéma de fonctionnement	64
IV.5.1.2. Partition floue définie via la fuzzy logic	65
IV.6. Résultat de simulation MPPT par la logique floue	66
IV.7. Conclusion	71
Conclusion générale	74
Bibliographie	77

Liste des acronymes

MPPT: Maximum Power Point Tracking

PSO: Maximum Power Point Trackin

GPV: Générateur Photovoltaïque (Photovoltaic Generator)

FF: Facteur de Forme (Fill Factor)

FLC: Fuzzy Logic Controller

EVA : Ethylène-Acétate de Vinyle (Encapsulation material)

DC-DC: Direct Current to Direct Current (Converter)

DC-AC: Direct Current to Alternating Current (Inverter)

PWM: Pulse Width Modulation

PSC: Partial Shading Conditions

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

Liste des symboles

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

V_{co} : Tension de circuit ouvert V (Volts)

P_{max} : Puissance maximale (Maximum power) W (Watts)

FF : Facteur de forme (Fill Factor) Unités

η : Rendement (Efficiency) %

R_s : Résistance série (Series resistance) Ω (Ohms)

R_p : Résistance parallèle (Shunt resistance) Ω (Ohms)

I_{ph} : Courant photogénéré (Photogenerated current)

I_s : Courant de saturation (Saturation current)

q : Charge élémentaire (Electron charge)

KT : Énergie thermique (Thermal energy)

n : Facteur d'idéalité de la diode (Ideality factor)

α : Rapport cyclique (Duty cycle)

E: Erreur (Error between current and optimal power)

ΔE : Variation de l'erreur (Error change rate)

$\Delta \alpha$: Variation du rapport cyclique (Duty cycle adjustment)

W : Coefficient d'inertie (Inertia weight)

c₁,c₂ : Coefficients d'accélération (Acceleration constants)

r₁,r₂ : Nombres aléatoires (Random numbers)

p_{ij} : Meilleure position individuelle (Personal best)

g_{ij} : Meilleure position globale (Global best)

G : Éclairement solaire (Solar irradiance) W/m²

TT : Température (Temperature) °C or K

Liste des tableaux

CHAPITRE III :

Tableau III.1 : de vérité pour une commande logique floue.....46

CHAPITRE IV :

Tableau IV.1 : Les caractéristiques de panneau photovoltaïque.....59

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 . Structure d'un système PV raccordé au réseau 07

Figure I.2 . Panneaux photovoltaïques 08

Chapitre II

Figure II.1 . Structure d'une cellule photovoltaïque 15

Figure II.2 . Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale..... 16

Figure II.3 . Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle 17

Figure II.4 Caractéristiques $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque Soumise à différents éclairagements..... 18

Figure II.5 . : différents régimes selon la puissance d'éclairement..... 20

Figure II.6 . Schéma de cellules photovoltaïques associées en série 22

Figure II.7 . Schéma de cellules photovoltaïques associées en parallèle 23

Figure II.8 . Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque 23

Figure II.9 . La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température 24

Figure II.10 . La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température 25

Figure II.11 . La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement..... 26

Figure II.12 . La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement..... 26

Figure II.13 . Convertisseur DC/DC 27

Figure II.14 . Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur 'Buck' 28

Figure II.15 . Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur 'Boost' 30

Figure II.16 . Circuit équivalent du 'Boost' quand l'interrupteur est fermé 31

Figure II.17 . Circuit équivalent du 'Boost' quand l'interrupteur est ouvert 32

Figure II.18 . Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur 'Buck-Boost' 34

Chapitre III

Figure III.1 . Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque 38

Figure III.2 . Courbes illustratives de l'union des sous-ensembles flous..... 41

Figure III.3 . Courbe illustrative de l'intersection des sous-ensembles flous 42

Figure III.4 . Courbe illustrative de le l'opérateur NON	43
Figure III.5 . Structure de base de la commande floue.....	45
Figure III.6 . Déplacement d'une particule	49
Figure III.7 . Principe de déplacement de particule	51
Figure III.8 . Organigramme générale de la méthode PSO	56
Chapitre IV	
Figure IV.1 . Schéma de la méthode MPPT basant sur l'algorithme PSO sous MATLAB/SIMULINK	60
Figure IV.2 . Quelques étapes de procédure de la technique MPPT basant sur PSO	62
Figure IV.3 . Copie du système flou conçu via la fuzzy logic toolbox de Matlab.....	64
Figure IV.4 . Copie d'écran de la partition floue définie via la fuzzy logic toolbox de Matlab.....	65
Figure IV.5 . Surface des règles	66
Figure IV.6 . Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque basé sur la logique floue.....	66
Figure IV.7 . Les variations de l'éclairement solaire au fil du temps.....	67
Figure IV.8 . Variation du courant en fonction de temps du PV pour un changement de l'éclairement	68
Figure IV.9 . Variation de tension avec le temps du PV pour un changement de l'éclairement.....	69
Figure IV.10 . Variation de puissance instantanée avec le temps du PV pour un changemen L'éclairement	70

Introduction générale

Introduction générale

Avec la croissance démographique rapide et l'évolution constante des technologies modernes, la demande en énergie, en particulier en électricité, a considérablement augmenté. L'électricité joue un rôle essentiel dans la vie quotidienne, constituant un moteur fondamental du développement économique et industriel. Aujourd'hui, la majorité des activités humaines – qu'il s'agisse de la communication, du transport, de l'industrie ou même des services de base – dépendent d'une alimentation électrique stable et efficace.

Cependant, la production d'électricité repose encore en grande partie sur les combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Bien que largement utilisés, ces types d'énergie engendrent de graves problèmes environnementaux et économiques. Leur combustion libère d'importantes quantités de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone (CO_2), contribuant ainsi au réchauffement climatique et aux déséquilibres écologiques. En outre, leur extraction et leur exploitation entraînent des coûts élevés et représentent un danger pour la santé humaine, en raison notamment de la pollution de l'air et des sols.

Face à ces défis, la recherche et le développement de sources d'énergie alternatives sont devenus une priorité mondiale. Parmi ces alternatives, les énergies renouvelables – comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'hydroélectricité, la géothermie et la biomasse – offrent des solutions durables et respectueuses de l'environnement. Ces sources, propres et inépuisables, permettent non seulement de réduire l'impact environnemental, mais aussi de diversifier les modes de production afin de répondre à la demande croissante des sociétés modernes.

L'énergie solaire photovoltaïque, en particulier, a connu un essor remarquable ces dernières années grâce aux avancées technologiques, permettant une utilisation à grande échelle. Ces progrès ont également permis de surmonter plusieurs obstacles, tels que les variations climatiques ou l'absence de soleil durant la nuit.

Ce mémoire vise à étudier les mécanismes de contrôle des systèmes photovoltaïques et à améliorer leur efficacité en maximisant l'extraction de l'énergie disponible. Ce travail est structuré en quatre chapitres :

Introduction générale

Chapitre I : Etat de l'art : Présentation des concepts fondamentaux liés aux systèmes photovoltaïques et analyse des différentes stratégies de commande visant à améliorer leur efficacité.

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque : Développement des équations essentielles décrivant le comportement du système et analyse des facteurs influençant ses performances.

Chapitre III : Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT : Étude approfondie des méthodes logique floue et Optimisation par Essaim de Particules (PSO), en détaillant leurs principes de fonctionnement, leurs algorithmes et leurs avantages en matière d'optimisation énergétique.

Chapitre IV .: Simulations et Résultats : Présentation et analyse des résultats obtenus à travers des simulations, permettant d'évaluer l'efficacité des modèles et des techniques mises en œuvre pour l'amélioration des performances du système photovoltaïque.

Les résultats de cette recherche représentent une contribution importante au développement des systèmes énergétiques durables, en particulier dans les régions à forte irradiation solaire



CHAPITRE I :

Etat de l'art

I.1. Introduction

Les scientifiques s'efforcent actuellement de développer une nouvelle génération de panneaux solaires capables de produire de l'électricité même en l'absence de soleil, dans le but de faire face aux défis liés aux variations climatiques, comme l'ombrage. Par " Shading", on entend une situation où la température et le rayonnement solaire ne sont pas uniformément répartis entre les cellules d'un panneau solaire, ce qui entraîne une baisse de l'efficacité. Grâce à cette innovation, il deviendra possible d'exploiter l'énergie solaire de manière plus optimale et efficace, renforçant ainsi son rôle en tant que source d'énergie durable.

Ce chapitre présente les principes fondamentaux des systèmes photovoltaïques. Il commence par un aperçu général de ces systèmes, puis aborde leurs différentes classifications. Ensuite, il analyse en détail la structure des cellules photovoltaïques et leur mécanisme de conversion de l'énergie solaire en électricité. En outre, il discute des diverses applications de l'énergie photovoltaïque, des méthodes de contrôle et des stratégies d'amélioration de son efficacité. Enfin, il met en lumière les avantages et les inconvénients de cette technologie.

I.2. Historique

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 45 ans, ayant initialement été développés pour le programme spatial, notamment pour alimenter les satellites en énergie. Par la suite, leur utilisation s'est étendue aux balises en mer et aux sites isolés à travers le monde, grâce à l'intégration de batteries permettant de stocker l'électricité pendant les périodes sans ensoleillement.

L'histoire du photovoltaïque est marquée par plusieurs dates clés :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque, un phénomène qui permet de produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil.
- 1875 : Werner Von Siemens présente une étude sur cet effet dans les semi-conducteurs devant l'Académie des Sciences de Berlin. Cependant, cette découverte reste une curiosité scientifique jusqu'à la Seconde Guerre mondiale.

- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin , Pearson et Prince , mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement, répondant aux besoins de l'industrie spatiale. Ils découvrent que le dopage du silicium avec des impuretés améliore sa photosensibilité, une technique qui deviendra fondamentale pour tous les semi-conducteurs.
- 1958 : Une cellule photovoltaïque avec un rendement de 9 % est développée, permettant d'alimenter les premiers satellites envoyés dans l'espace.
- 1973 : L'Université du Delaware construit la première maison entièrement alimentée par des cellules photovoltaïques.
- 1983 : La première voiture fonctionnant à l'énergie solaire parcourt 4000 km en Australie. Ces avancées ont progressivement ouvert la voie à l'essor de l'énergie solaire dans divers domaines, faisant du photovoltaïque un pilier incontournable de la transition énergétique mondiale. [1]

I.3. Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est composé de trois éléments fondamentaux :

1. La section de production d'énergie : Elle est constituée d'un ou plusieurs modules photovoltaïques, qui agissent comme des générateurs de courant continu.
2. La section de contrôle de l'énergie : Elle comprend des convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC, chargés d'adapter et de gérer l'électricité produite.
3. La section d'utilisation de l'énergie : Elle englobe un ou plusieurs récepteurs qui consomment l'énergie générée, avec un contrôle adapté à leurs besoins spécifiques. [2]

I.4. Différents types de système photovoltaïque

Une centrale solaire photovoltaïque est constituée de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés. Les méthodes de mise en œuvre varient selon les besoins et les conditions d'installation, incluant les installations fixes, les systèmes de suivi solaire, les toitures, les centrales au sol et les installations flottantes, chacune offrant des avantages spécifiques. [3]

I.4.1. Système autonome avec batterie

C'est le système photovoltaïque le plus répandu. Le champ photovoltaïque sert de chargeur pour la batterie, ce qui permet d'utiliser l'électricité à tout moment. Par exemple, ce

système est idéal pour l'éclairage domestique, où l'électricité est essentielle une fois la nuit tombée. [3]

I.4.2. Système autonome sans batterie

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie alimentent directement une charge en courant continu à partir du champ photovoltaïque (GPV). Ce fonctionnement est assuré uniquement lorsque la production d'énergie est suffisante pour faire fonctionner la charge. [3]

I.4.3. Systèmes raccordés au réseau

Les installations photovoltaïques sont connectées au réseau électrique grâce à un onduleur, qui transforme le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif. L'électricité générée peut être utilisée directement pour alimenter les charges ou injectée dans le réseau. Ces systèmes sont largement utilisés dans les immeubles, les maisons et les chalets déjà raccordés au réseau électrique [3]

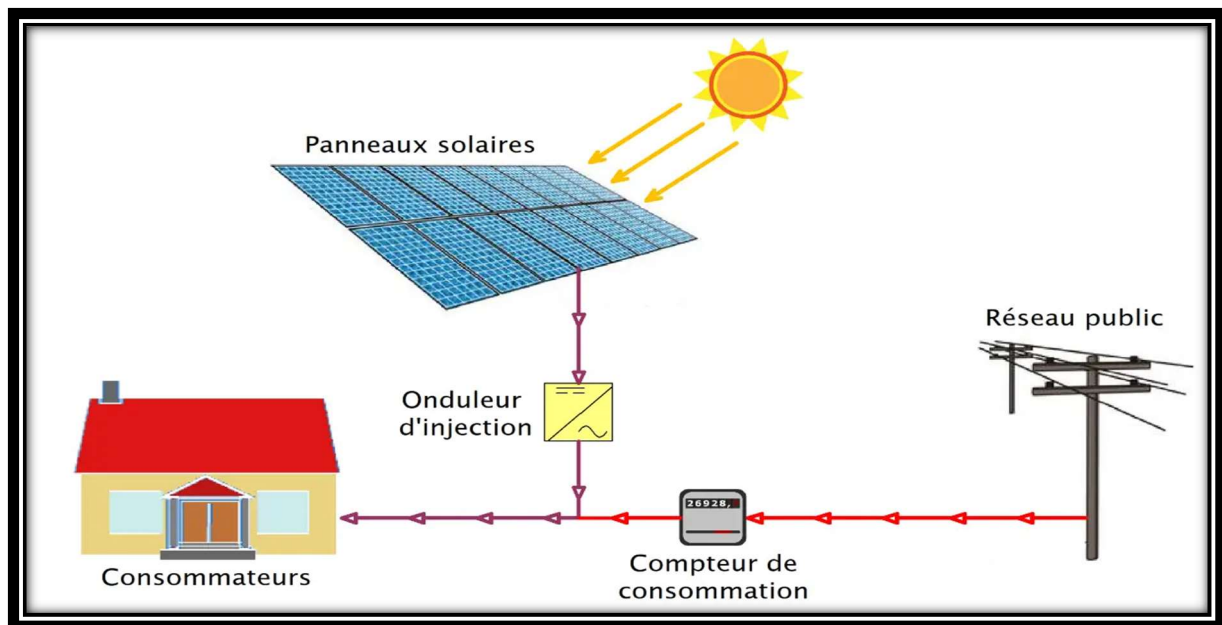


Figure I.1 : Structure d'un système PV raccordé au réseau [4]

I.5. Modules (Panneaux) photovoltaïques

Un module photovoltaïque est composé d'un réseau de cellules interconnectées, dont certaines forment des chaînes directement exploitables. Il assure deux fonctions essentielles :

- Optimisation des caractéristiques électriques : Les cellules sont agencées pour adapter les caractéristiques courant-tension aux besoins de l'application. Les modules peuvent être connectés en série pour augmenter la tension ou en parallèle pour accroître le courant, permettant ainsi une meilleure performance du système.
- Protection et durabilité : Les cellules sont encapsulées dans une couche d'EVA (éthylène-acétate de vinyle), qui les protège des rayons UV et de l'humidité. La face avant est recouverte d'un verre trempé à haute transmission lumineuse et résistant aux chocs, tandis que la face arrière est protégée par un film en Tedlar ou polyéthylène. Enfin, une structure métallique robuste encadre le module, garantissant sa stabilité mécanique et sa longévité. [5]



Figure I.2: Panneaux photovoltaïque [6]

I.6. Applications photovoltaïques

Il existe deux types d'installations photovoltaïques, selon qu'elles fonctionnent de manière autonome ou qu'elles sont raccordées à un réseau public de distribution d'électricité.

[7]

I.6.1. Installation photovoltaïque autonome

Une installation photovoltaïque autonome produit de l'électricité pour un bâtiment ou un utilisateur non connecté au réseau électrique. Ce type d'installation est utilisé dans plusieurs domaines :

- Domaine spatial : stations spatiales, satellites, etc.
- Domaine professionnel : communications, transport, mobilier urbain, etc.
- Domaine domestique et agricole : habitations rurales, activités agricoles, centres de santé, îles, etc.
- Domaine de l'électronique : montres, étiquettes électroniques, calculatrices, etc. [7]

I.6.2. Installation photovoltaïque raccordée au réseau

Les panneaux solaires photovoltaïques peuvent également être connectés au réseau de distribution électrique. Ce raccordement nécessite l'utilisation d'un onduleur spécifique, qui transforme le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif compatible avec le réseau.

L'énergie produite peut être :

- Consommée directement sur place par l'utilisateur, avec injection du surplus dans le réseau.
- Injectée en totalité dans le réseau, sans limitation quantitative.

Ce système permet d'optimiser la production et la distribution d'énergie solaire, participant ainsi à une transition énergétique plus durable. [7]

I.7. Commande Photovoltaïque

I.7.1. La commande MPPT

Un générateur photovoltaïque convertit directement l'énergie solaire en électricité. Toutefois, la puissance produite dépend principalement de deux facteurs : l'ensoleillement et la température. Cette dépendance se manifeste à travers la relation entre le courant fourni et la

tension aux bornes du générateur, connue sous le nom de caractéristique courant-tension (I-V). Cette courbe présente un point spécifique, appelé Point de Puissance Maximale (MPP – Maximum Power Point), qui joue un rôle essentiel. En effet, c'est à ce point que la puissance électrique atteinte est maximale, ce qui en fait un paramètre clé pour optimiser le rendement du système. [2]

I.7.2. Méthode logique floue

La commande par logique floue est une méthode couramment utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). Elle se caractérise par sa robustesse et sa simplicité de mise en œuvre, tout en ne nécessitant pas une connaissance précise du modèle à réguler. La conception d'un contrôleur flou s'articule autour de trois étapes fondamentales :

1. Fuzzification : Cette étape consiste à transformer les données d'entrée en variables floues.
2. Inférence : Elle permet d'appliquer des règles logiques floues pour déterminer la réponse du système.
3. Défuzzification : Cette dernière étape convertit le résultat flou en une valeur exploitable pour le contrôle du système.

Cette approche offre une régulation efficace et s'adapte facilement aux variations des conditions de fonctionnement. [8]

I.7.3. Méthode de l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO)

L'optimisation par essaim de particules (PSO) est une méthode stochastique inspirée du comportement social des oiseaux et des poissons, développée par Eberhart et Kennedy en 1995. Elle simule les mouvements collectifs, où chaque particule ajuste sa trajectoire en fonction de sa propre expérience et de celle de ses voisins afin de localiser une source de nourriture, représentant l'optimum.

Appliquée aux problèmes non linéaires, cette méthode exploite l'intelligence collective pour identifier efficacement des solutions optimales. Aujourd'hui, le PSO est largement adopté pour résoudre des problèmes complexes d'optimisation. [9]

I.8. Avantages et inconvénients du photovoltaïque

I.8.1. Avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire offre de nombreux atouts qui en font une solution prometteuse pour la production d'électricité :

- Une ressource gratuite et inépuisable, disponible partout dans le monde.
- Une énergie propre, qui ne génère aucune émission polluante lors de son utilisation.
- Une grande fiabilité des panneaux solaires, avec une durée de vie souvent supérieure à 25 ans.
- Un entretien minimal , ce qui réduit les coûts de maintenance.
- Une flexibilité de production , allant de quelques milliwatts à plusieurs mégawatts.
- Une utilisation autonome et décentralisée , permettant d'alimenter des zones isolées sans nécessiter d'infrastructures lourdes. [1]

I.8.2. Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

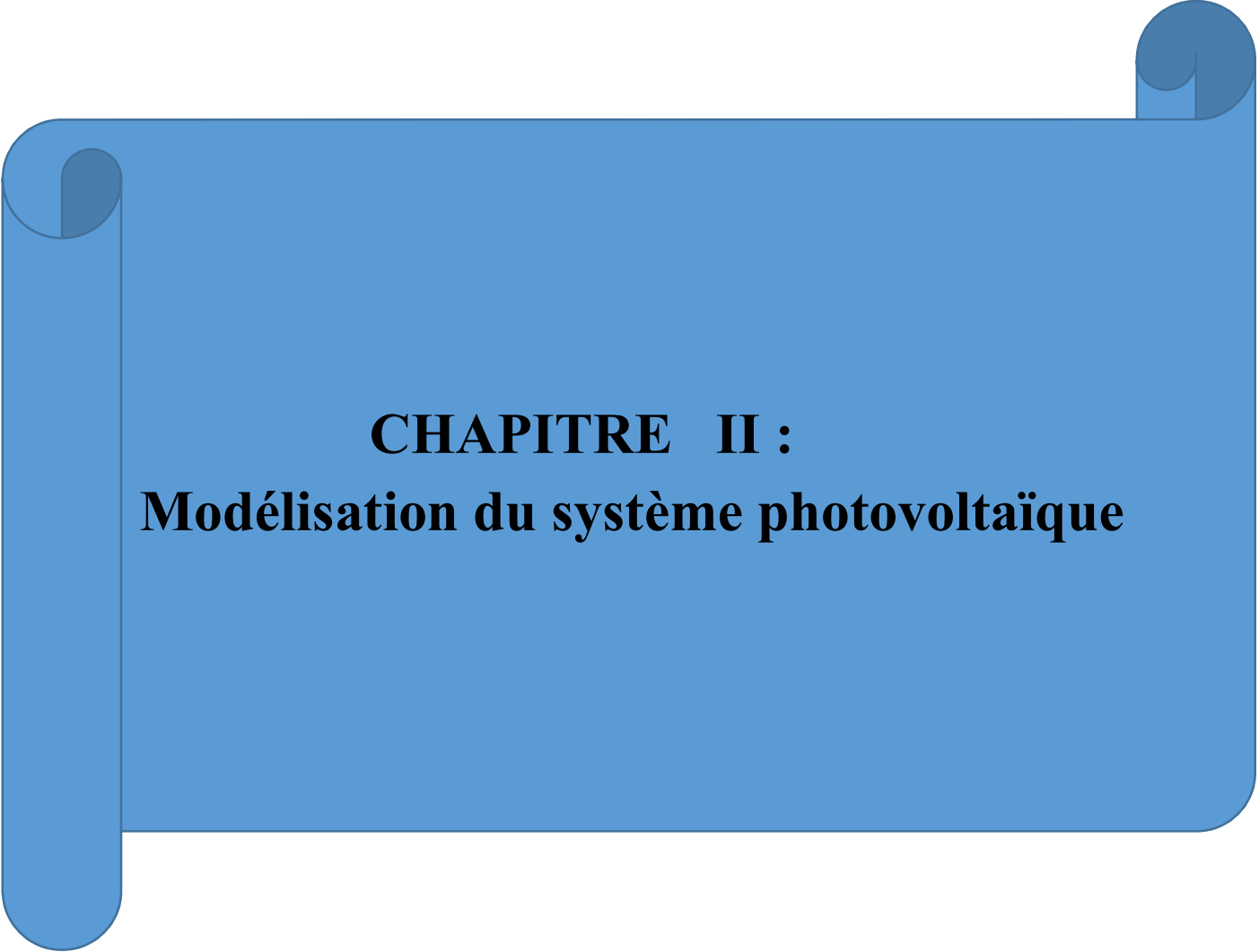
Malgré ses nombreux avantages, l'énergie photovoltaïque présente également certaines limites:

- Un rayonnement solaire diffus, qui exige de grandes surfaces pour capter suffisamment d'énergie.
- Un coût technologique encore élevé, même si les prix ont tendance à baisser avec le temps.
- Un facteur de charge faible, dû à l'intermittence du soleil et aux conditions météorologiques variables.
- Des difficultés de stockage, nécessitant des batteries coûteuses et complexes à gérer.
- Un recyclage des composants encore problématique, notamment pour certains matériaux utilisés dans les panneaux solaires.

Cependant, ces défis peuvent être surmontés grâce aux avancées technologiques et aux innovations continues dans le domaine de l'énergie. [1]

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux des systèmes photovoltaïques, puis nous avons étudié leurs différentes applications et méthodes de contrôle. Nous avons également examiné les techniques d'optimisation qui contribuent à maximiser l'efficacité des panneaux solaires. Ainsi, l'énergie solaire demeure l'une des solutions stratégiques dans le domaine de la production d'énergie.

A blue scroll graphic with a vertical strip on the left and a horizontal strip on the right, both with rounded ends. The text is centered on the horizontal strip.

CHAPITRE II :

Modélisation du système photovoltaïque

II.1. Introduction

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique représente une avancée majeure dans la technologie des énergies renouvelables, grâce aux cellules solaires constituées de silicium. L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. Pour définition le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de "voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la lumière électricité [10,11]

II.2. Cellule photovoltaïque

II.2.1. Description générale

Une cellule photovoltaïque, également appelée photopile, représente l'élément de base d'un système de conversion de l'énergie solaire en électricité. Cette énergie peut être utilisée directement sous forme de courant continu ou transformée en courant alternatif. Le principe de fonctionnement de la cellule repose sur l'effet photovoltaïque, un phénomène physique qui génère une force électromotrice lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière.

La tension produite par une cellule photovoltaïque se situe généralement entre 0,3 V et 0,6 V. Cette tension, appelée tension de circuit ouvert (V_{co}), dépend principalement du matériau semi-conducteur utilisé, de la température et du vieillissement de la cellule. Il est important de noter que la température influence significativement cette tension. Par ailleurs, le courant maximal, appelé courant de court-circuit (I_{cc}), est obtenu lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Ce courant varie en fonction du niveau d'ensoleillement (G), qui joue un rôle clé dans la performance de la cellule. [1]

II.2.2. Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est composée de deux couches de silicium : une couche dopée de type P (avec du bore) et une autre dopée de type N (avec du phosphore). Ces deux couches forment une jonction PN, caractérisée par une barrière de potentiel.

Lorsqu'un photon provenant du spectre solaire est absorbé par le matériau semi-conducteur, il transfère son énergie aux atomes situés au niveau de la jonction PN. Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite (ou énergie de gap, notée E_g) du semi-conducteur, un couple électron-trou est créé. Ces charges électriques sont ensuite séparées sous l'action du champ électrique interne de la jonction PN et sont dirigées vers les extrémités opposées de la cellule. Ce processus génère une différence de potentiel aux bornes de la cellule, phénomène connu sous le nom d'effet photovoltaïque.

La figure II.1 illustre la structure interne d'une cellule photovoltaïque, mettant en évidence les couches de silicium et la jonction PN. [1].

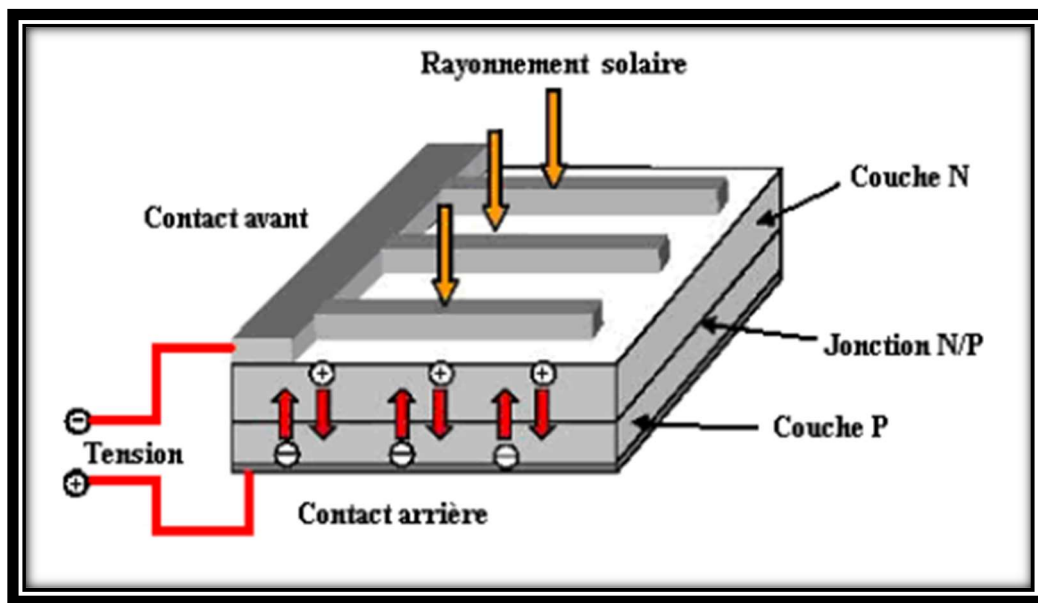


Figure II.1 :Structure d'une cellule photovoltaïque [1]

II.3. Circuit équivalent d'une cellule solaire

Lorsqu'une cellule photovoltaïque n'est pas exposée à la lumière et qu'elle est polarisée par une tension V , son comportement est similaire à celui d'une diode, avec une réponse exponentielle. La densité de courant I suit alors l'équation de Shockley [12].

$$I_{obs} = I_s * [\exp(qV / nkT) - 1]$$

(2.1)

Où :

- . I_s : est la densité de courant de saturation sous polarisation inverse
- . q : la charge élémentaire
- . kT : l'énergie thermique
- . n : le facteur d'idéalité de la diode

II.3.1. Cas d'une cellule solaire idéale

Lorsque cette cellule photovoltaïque est exposée à un rayonnement tout en étant polarisée sous une tension V , un courant supplémentaire I_{ph} apparaît. Elle se comporte alors comme un générateur de courant, ce qui correspond au modèle de la cellule solaire idéale (figure II.2). Le courant photogénéré I_{ph} circule dans le sens opposé à celui de la diode, ce qui modifie l'équation (1) [12].

$$I = I_{ph} - I_s * [\exp(qV / nkT) - 1] \quad (2.2)$$

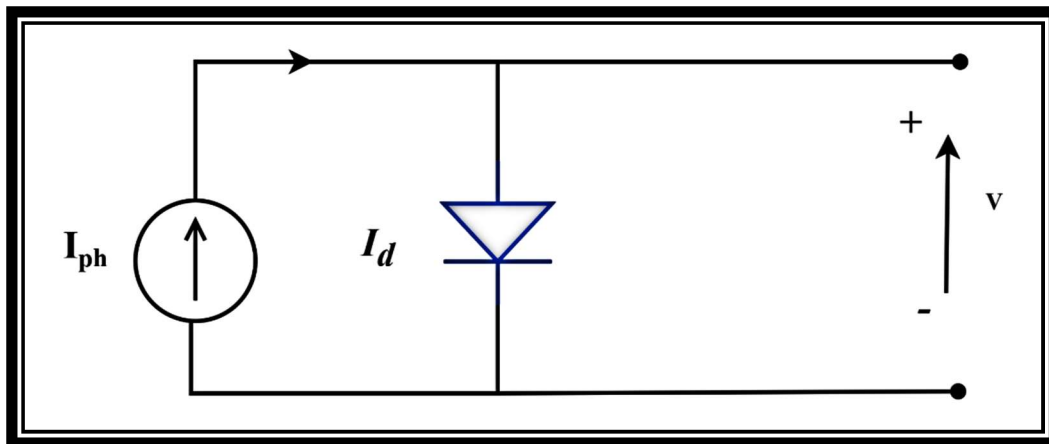


Figure II. 2 : Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale

Cependant, ces équations ne s'appliquent que dans le cas de dispositifs idéaux.

II.3.2. Cas d'une cellule réelle

Pour représenter le fonctionnement réel d'une cellule photovoltaïque inorganique, il est essentiel d'affiner son modèle en ajoutant deux résistances : R_s (résistance série) et R_p

(résistance parallèle). Ces résistances, que nous définirons plus en détail par la suite, permettent de mieux traduire le comportement électrique de la cellule (Figure II.3). [12].

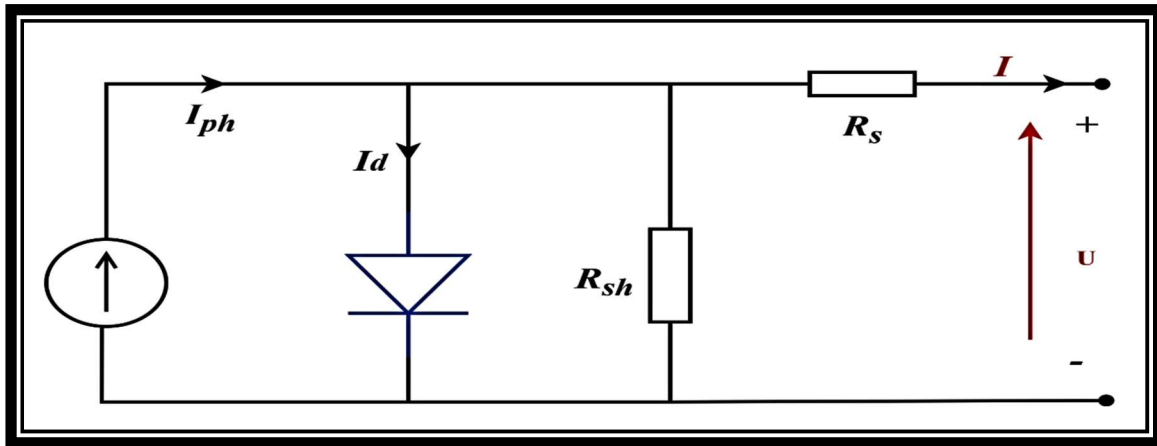


Figure II.3: Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle

L'équation (4) représente celle de la cellule réelle [3] :

$$I(V) = I_{ph} - I_s * [\exp(q(V + I * R_s) / nkT) - 1] - (V - I * R_s) / R_p \quad (2.3)$$

II.4. Paramètres photovoltaïques

De nombreux paramètres permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres, appelés paramètres photovoltaïques, sont déterminés à partir de la caractéristique $I(V)$. La (figure II-4) montre une courbe courant-tension $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque à jonction PN, à la fois dans l'obscurité et sous éclairage. L'analyse de cette courbe permet d'obtenir plusieurs paramètres physiques spécifiques au composant. Les premiers paramètres visibles sur cette caractéristique sont le courant de court-circuit I_{cc} , la tension à circuit ouvert V_{co} et le facteur de forme (FF) [13].

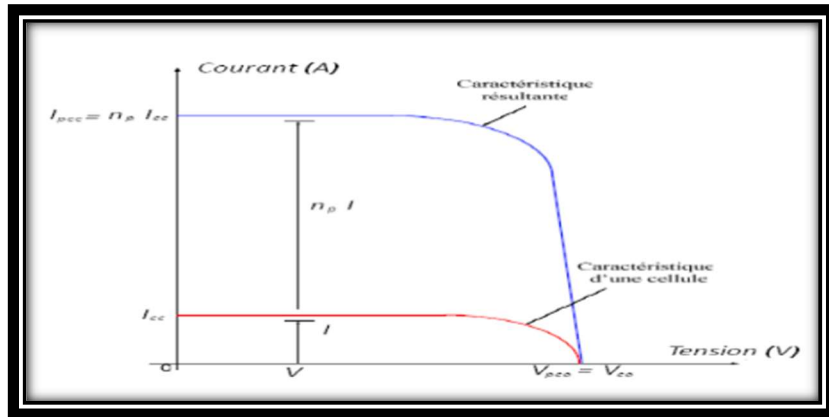


Figure. II.4 : Caractéristiques I(V) d'une cellule photovoltaïque Soumise à différents éclairagements [14]

II.4.1. Courant de court-circuit (I_{cc})

Le courant de court-circuit (I_{cc}) est le courant produit par une cellule photovoltaïque lorsque la tension à ses bornes est nulle. Il correspond au courant maximal que la cellule peut fournir. Ce courant dépend de plusieurs paramètres, comme la température, la longueur d'onde de la lumière reçue, la surface active de la cellule et la mobilité des porteurs de charge. Par ailleurs, il augmente proportionnellement à l'intensité de la lumière incidente [13].

II.4.2. Tension de circuit ouvert (V_{co})

Comme son nom le suggère, cette tension correspond à celle mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque lorsqu'elle ne débite aucun courant, c'est-à-dire en circuit ouvert ou connectée à une charge de résistance infinie. Sa valeur dépend principalement du type de cellule solaire utilisée (jonction PN ou jonction Schottky), des matériaux qui composent la couche active, ainsi que de la qualité des contacts entre cette couche et les électrodes. Par ailleurs, l'intensité de l'éclairement reçu par la cellule joue également un rôle important dans la détermination de cette tension [13].

$$V_{co} = \frac{k * T_c}{q} * \log(I_{ph} / I_s + 1) \quad (2.4)$$

Avec :

$\frac{k * T_c}{q}$:représentant le potentiel thermodynamique

. T_c : est la température absolue

. q : la constante de charge d'électron, $1.602 * 10^{-23} \text{ C}$

. k : la constante de Boltzmann, $1.38 * 10^{-23} \text{ J/K}$

. I_{ph} : le courant photonique

. I_s : le courant de saturation

Régime de faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} < I_s$, ce qui permet d'écrire :

$$\log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (2.5)$$

D'où :

$$V_{co} \approx \frac{k * T_c}{q} \cdot \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (2.6)$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire

$$\text{Aussi } V_{co} = R_0 * I_{ph} \quad (2.7)$$

en posant

$$R_0 = \frac{k * T_c}{I_s * q} : R_0 \quad (2.8)$$

R_0 est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_s$, soit

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1 \quad (2.9)$$

D'où :

$$V_{co} = (k * T_c / q) * \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (2.10)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique



Figure II .5 : différents régimes selon la puissance d'éclairement [15]

II.4.3. Facteur de forme FF

Le facteur de forme (FF) est un indicateur essentiel pour mesurer l'efficacité d'une cellule photovoltaïque ou d'un générateur solaire. Il permet d'évaluer la qualité de la conversion de l'énergie solaire en comparant la puissance maximale que la cellule peut produire (P_{max}) à la puissance théorique obtenue en multipliant le courant de court-circuit (I_{cc}) par la tension de circuit ouvert (V_{oc}).

Plus le facteur de forme est élevé, plus la cellule est capable de fournir une puissance utile importante. Les cellules les plus performantes sont donc conçues en optimisant différents paramètres technologiques pour se rapprocher des caractéristiques idéales. [13].

Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (2.11)$$

II.4.4. Le rendement

Le rendement η d'une cellule photovoltaïque représente son efficacité à convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

Pour améliorer ce rendement, il est essentiel d'optimiser plusieurs paramètres, notamment le facteur de forme (FF), le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le rendement de conversion est un indicateur clé des performances d'une cellule photovoltaïque, car il permet d'évaluer directement son efficacité énergétique. [13].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{(FF * I_{cc} * V_{co})}{P_{in}} \quad (2.12)$$

II.5. Association des cellules photovoltaïques

La cellule photoélectrique génère une énergie faible qui n'est pas utilisable dans les applications électriques courantes, c'est pourquoi il est nécessaire de connecter ces cellules en parallèle ou en série pour augmenter la valeur de cette énergie.

II.5.1. Association en série

En cas de connexion en série, le courant qui traverse chaque cellule est le même. Pour obtenir les caractéristiques globales du système en série, on additionne les tensions tout en maintenant un courant constant. Les (figures II.6) montrent la courbe résultante (I_{sco} , V_{sco}) obtenue en reliant en série (indiqué par l'indice s) plusieurs cellules identiques (I_{cc} , V_{co}) [16].

$$I_{scc} = I_{cc} \text{ et } V_{sco} = N_s * V_{co} \quad (2.13)$$

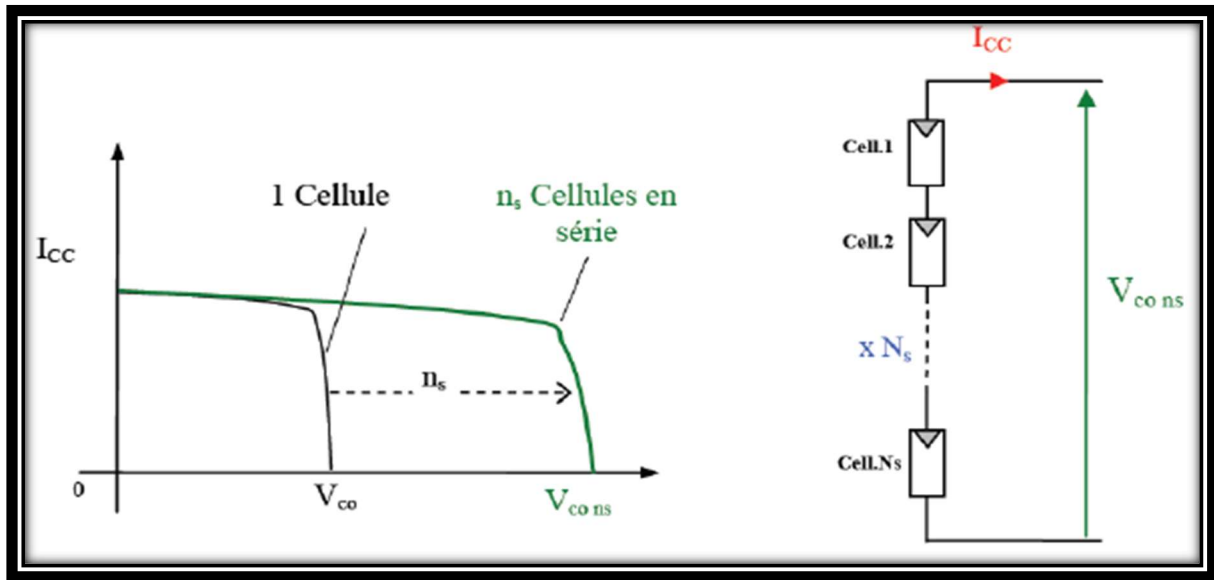


Figure II.6 : Schéma de cellules photovoltaïques associées en série. [17]

La majorité des panneaux photovoltaïques commerciaux sont constitués de sous-réseaux de cellules connectées en série. Chaque sous-réseau est lui-même composé d'un ensemble de cellules photovoltaïques également reliées en série. Le nombre de cellules par sous-réseau est déterminé par un compromis économique visant à équilibrer la protection du système et la limitation des pertes en cas de défaillance partielle du générateur photovoltaïque [16].

II.5.2. Association des cellules en parallèle

Les caractéristiques d'un groupe de cellules connectées en parallèle sont en quelque sorte l'inverse de celles d'un groupe en série. Dans un arrangement en parallèle, toutes les cellules subissent la même tension, et la caractéristique globale du groupe est obtenue en additionnant les courants pour une tension donnée. Les (figures II.7) montrent les courbes résultantes (I_{pcc} , V_{pco}) obtenues en connectant en parallèle (indiqué par l'indice p) un certain nombre N_p de cellules identiques. [16].

$$I_{pcc} = N_p * I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{pco} = v_{co} \quad (2.14)$$

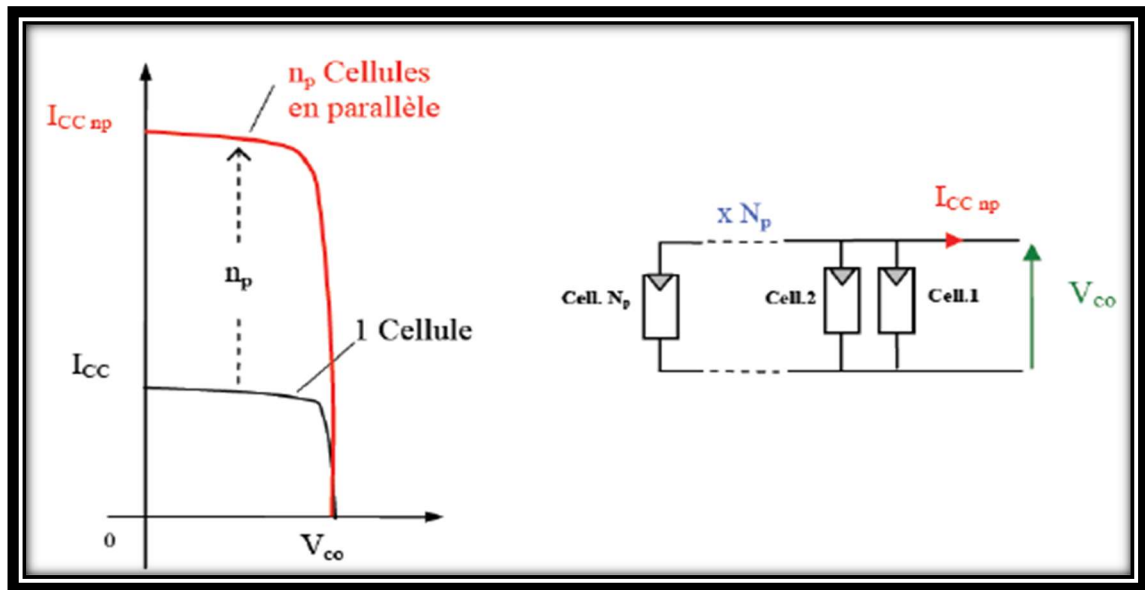


Figure II.7 : Schéma de cellules photovoltaïques associées en parallèle. [18]

II.6. L'influence de l'éclairement et de la température

Le schéma suivant illustre un système photovoltaïque influencé par le rayonnement solaire et la température. Un courant électrique (I_{pv}) et une tension électrique (V_{pv}) sont générés par une cellule solaire. Ces signaux électriques sont envoyés à un convertisseur continu-continu (DC-DC), qui régule les valeurs du courant et de la tension afin de les adapter au processus de charge. L'énergie électrique est ensuite transférée à l'unité de charge, qui se charge d'alimenter un appareil électronique ou de recharger une batterie.

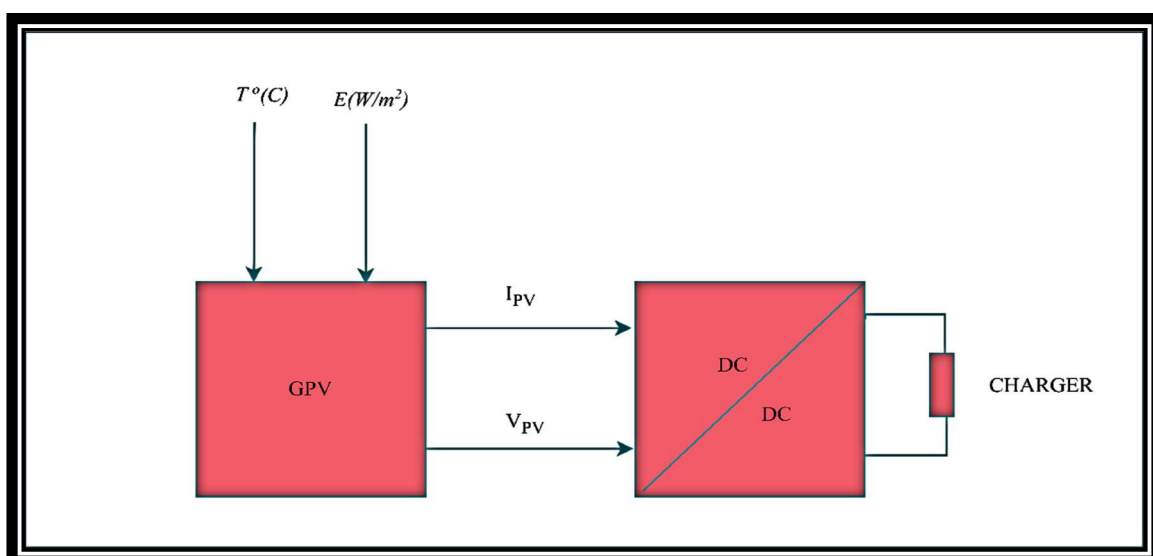


Figure II.8: Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque

II.6. 1. Influence de la Température

Lorsque la température augmente de 25°C à 50°C, la relation entre le courant de court-circuit (I_{pv}) et la tension en circuit ouvert (V_{pv}) montre des évolutions intéressantes. Bien que la température ait peu d'impact sur le courant de court-circuit, elle provoque une baisse notable de la tension en circuit ouvert. Cette réduction de la tension limite la quantité de puissance qui peut être extraite du système. Ainsi, lors de la conception d'une installation photovoltaïque, il est crucial de prendre en compte les fluctuations de température spécifiques au lieu d'implantation afin d'assurer des performances optimales. [16].

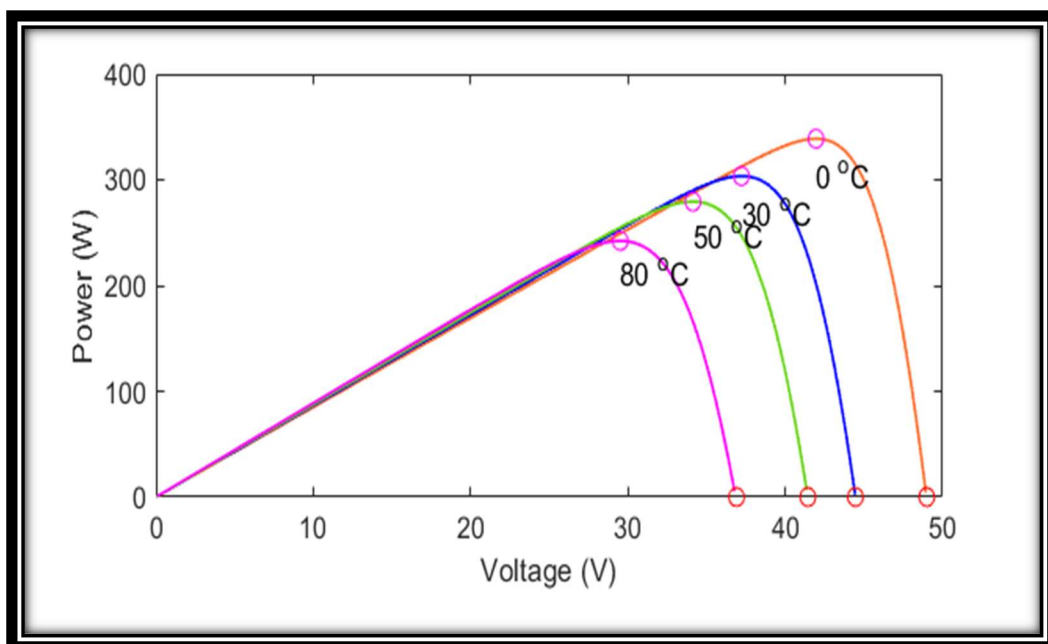


Figure II.9: La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température

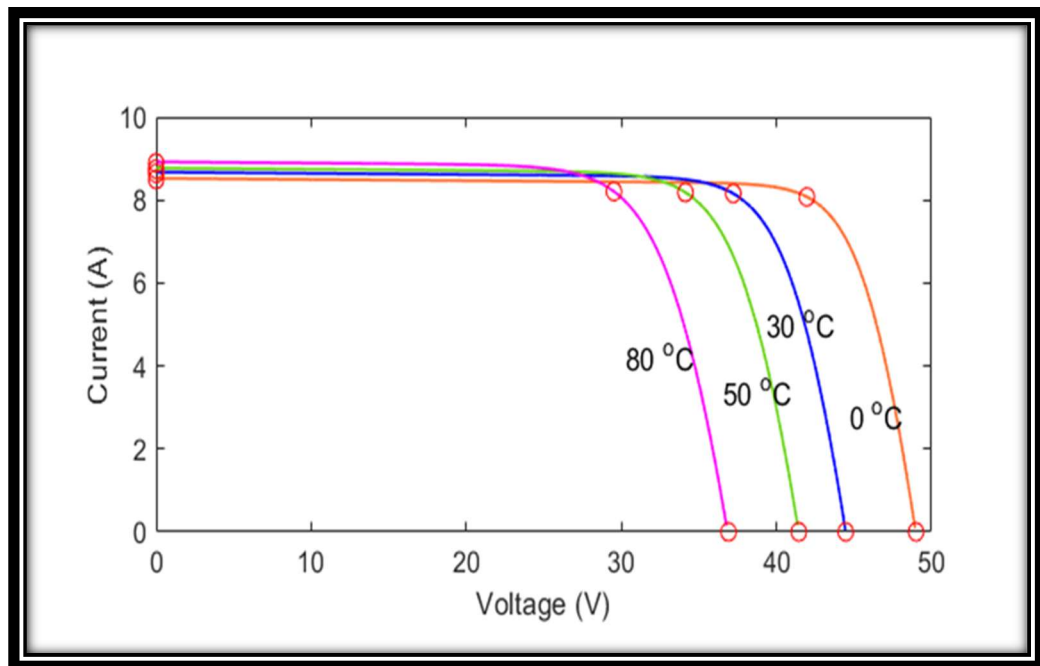


Figure II.10 : La caractéristique de $P=f(V)$ en fonction de température

II.6. 2. Influence de l'Éclairement

Lorsque l'éclairement varie entre 200 W/m^2 et 1000 W/m^2 par paliers de 200, la relation entre le courant de court-circuit (I_{pv}) et la tension en circuit ouvert (V_{pv}) est présentée dans les figures (II. 11). On remarque que le courant de court-circuit augmente proportionnellement à l'intensité du rayonnement solaire. En revanche, la tension en circuit ouvert reste quasiment constante, même à des niveaux d'éclairement faibles.

Pour évaluer les performances des panneaux photovoltaïques, la référence internationale repose sur une irradiation standard de 1000 W/m^2 à une température de 25°C . Ces conditions sont utilisées pour mesurer et comparer de façon fiable les caractéristiques des panneaux. [16].

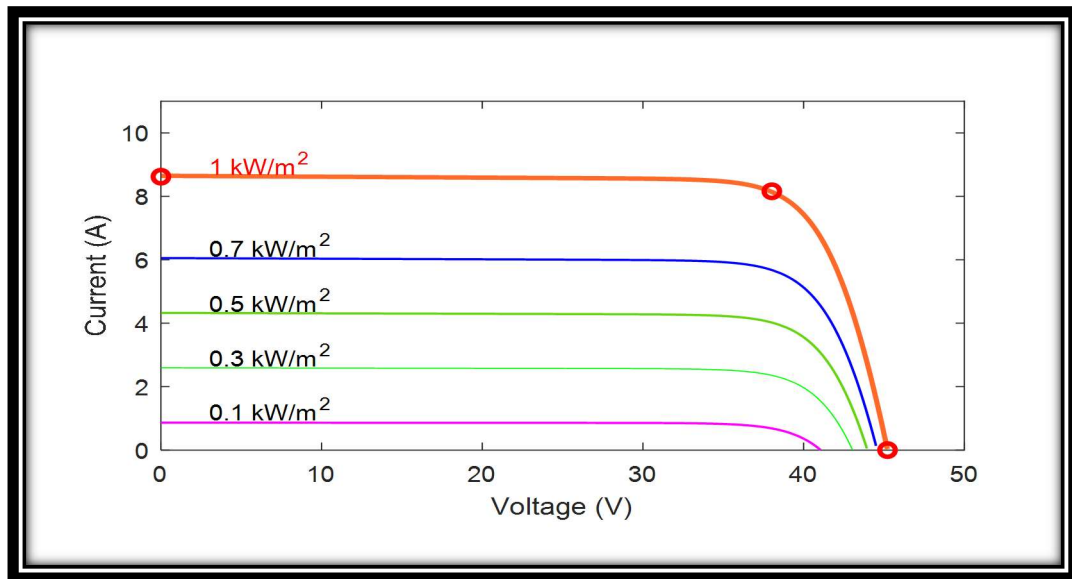


Figure II.11 : La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement

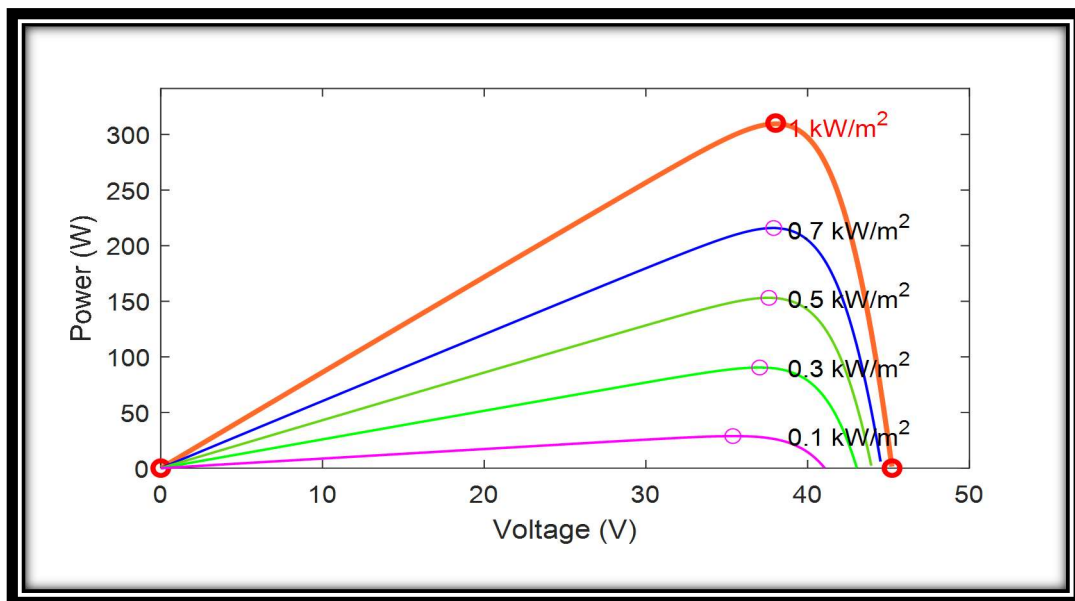


Figure II.12: La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement

II.7. Rôle des convertisseurs DC-DC

Pour garantir une conversion de puissance efficace, il est essentiel de maintenir un rendement élevé afin de limiter les pertes d'énergie et d'éviter une surchauffe des composants électroniques. C'est pourquoi l'ensemble de l'énergie échangée doit être gérée à travers des composants de stockage tels que les inductances et les condensateurs, ainsi que des commutateurs. [11].

Le choix des commutateurs de puissance dépend du niveau de puissance à convertir ou à contrôler. En règle générale :

- Les MOSFETs (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont privilégiés pour des puissances relativement faibles (quelques kW).
- Les IGBTs (transistors bipolaires à grille isolée) sont utilisés pour des niveaux de puissance plus élevés.
- Les thyristors, quant à eux, ont été traditionnellement utilisés pour les applications de très haute puissance [19].

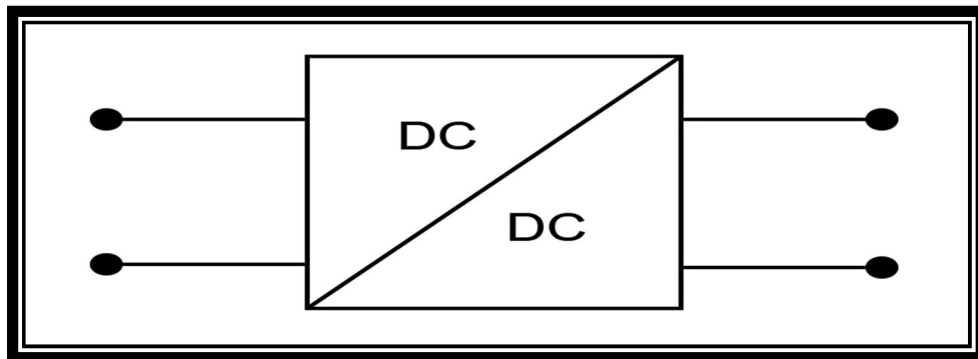


Figure II.13 : Convertisseur DC/DC

Nous allons maintenant décrire trois topologies de base pour la conversion de courant continu (DC-DC). Cette section présente le principe de fonctionnement des trois types de convertisseurs les plus couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques : 'Buck', 'Boost' et 'Buck-Boost'. Ces convertisseurs permettent d'obtenir les tensions et courants adaptés aux besoins du système.

Ils sont exclusivement composés d'éléments réactifs, comme des inductances et des condensateurs, qui, en théorie, ne consomment aucune énergie. C'est cette particularité qui leur confère un rendement élevé [19].

II.7.1. Convertisseur 'Buck '

Le convertisseur 'Buck', également appelé convertisseur abaisseur ou hacheur série, est un dispositif largement utilisé pour diminuer une tension d'entrée afin d'obtenir une tension de

sortie plus faible. Son rapport de conversion, défini par $\alpha = V_s/V_i$, dépend du rapport cyclique de l'interrupteur. La (figure 14) présente le schéma de principe de ce convertisseur, ainsi que les formes d'ondes associées au courant et à la tension. Sa principale caractéristique réside dans la connexion en série de l'interrupteur avec la source d'alimentation. [12],

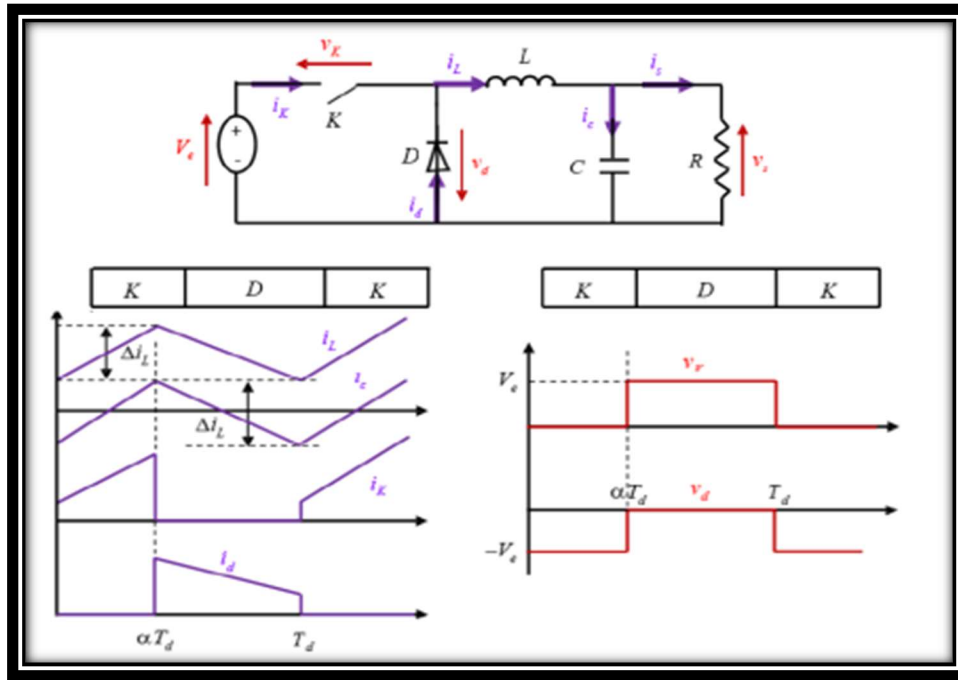


Figure II.14: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur 'Buck'. [12]

$$V_s = \alpha * V$$

(2.15)

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

(2.16)

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

(2.17)

Le convertisseur est donc abaisseur en tension.

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

$$I_l = I_s \quad (2.18)$$

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

$$V_{k_{max}} = |V_{k_{max}}| = V_e \quad (2.19)$$

En courant :

$$i_{k_{max}} = i_{d_{max}} = i_{l_{max}} = i_l \frac{\Delta i_l}{2} \quad (2.20)$$

II.7.2. Convertisseur 'BOOST'

Le convertisseur 'BOOST', également connu sous le nom de convertisseur survolteur ou hacheur parallèle, est un dispositif électronique utilisé pour augmenter une tension d'entrée afin d'obtenir une tension de sortie plus élevée.

Il est constitué principalement d'un interrupteur K (généralement un IGBT ou un MOSFET) et d'une diode D. L'interrupteur est commandé par un signal de modulation de largeur d'impulsion (MLI), caractérisé par une période de découpage fixe T_d et un rapport cyclique α

Le fonctionnement de ce convertisseur repose sur deux états alternés de l'interrupteur K :

- Lorsque K est fermé, la diode D est bloquée ;
- Lorsque K est ouvert, la diode D est conductrice.

Au cours de chaque période T_d , l'interrupteur est :

- fermé entre 0 et α .
- puis ouvert entre αT_d et α .

La Figure 15 illustre le schéma de principe du convertisseur, montrant les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode, ainsi que les formes d'ondes des courants (à gauche) et des tensions (à droite) [12].

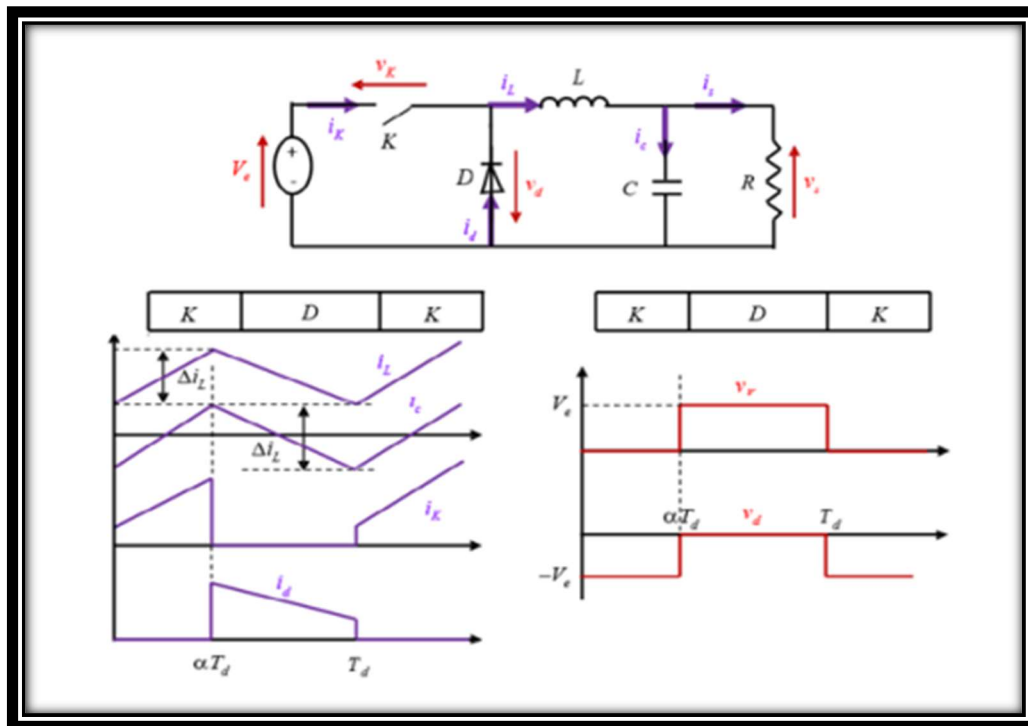


Figure II.15: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur 'Boost' [12]

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

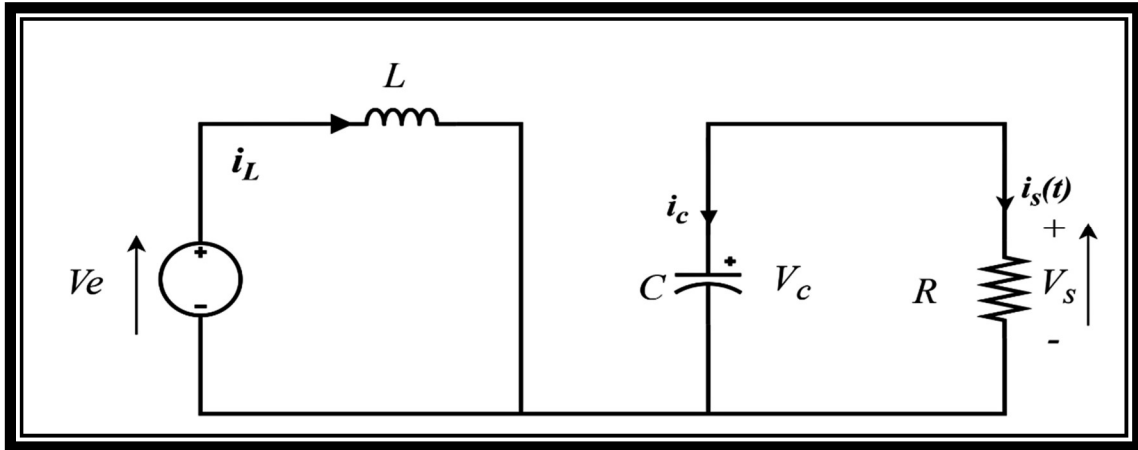


Figure II.16: Circuit équivalent du 'Boost' quand l'interrupteur est fermé

$$L \frac{di_L}{dt} = V_c \quad (2.21)$$

$$I_L = I_{min} + \frac{V_c}{L} t \quad (2.22)$$

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

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_c}{L} \alpha T_d \quad (2.23)$$

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

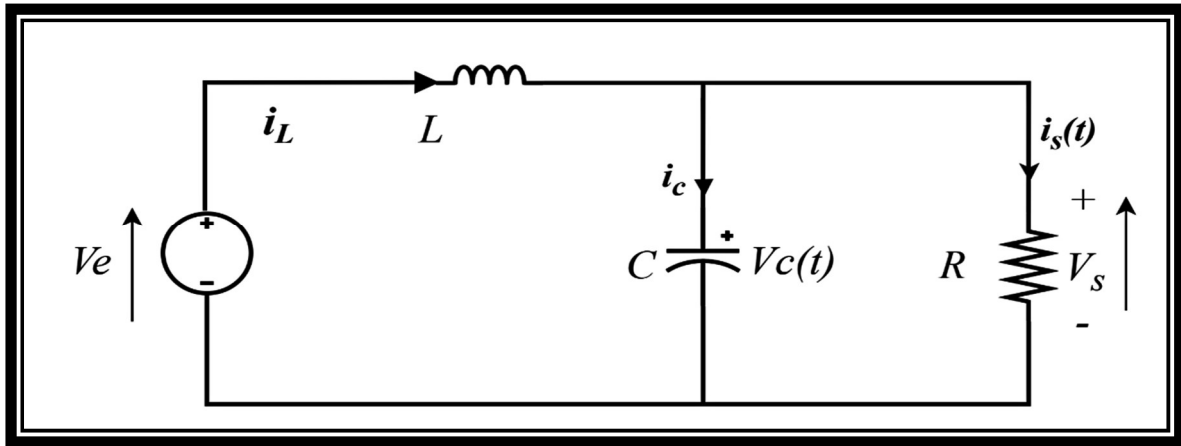


Figure II.17: Circuit équivalent du 'Boost' quand l'interrupteur est ouvert

$$L \frac{di_L}{dt} = V_c - V_s \quad (2.24)$$

$$I_L = I_{min} + \frac{V_c - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (2.25)$$

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

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_c - V_s}{L} (t - \alpha) T_d \quad (2.26)$$

Soit $\delta i_L = I_{max} - I_{min}$ l'ondulation du courant dans l'inductance. En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (3.9) et (15), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \left(\frac{1}{1 - \alpha} \right) V_c \quad (2.27)$$

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

$$\Delta i_l = \frac{\alpha V_s}{L} T_d = \frac{\alpha V_s}{L f} \quad (2.28)$$

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

$$C \frac{dV_s}{dt} = -i_s \quad (2.29)$$

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

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C \cdot f} = \frac{\alpha V_s}{(1 - \alpha) R_c f} \quad (2.30)$$

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

$$I_{k,max} = I_{d,max} = I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_l}{2} = \frac{I_s}{1 - \alpha} + \frac{\Delta i_l}{2} \quad (2.31)$$

$$V_{k,max} = V_{d,max} = V_{max} = V_{s,max} + V_s + \frac{\Delta i_l}{2} = \frac{V_s}{1 - \alpha} + \frac{\Delta i_l}{2} \quad (2.32)$$

II.7.3. Convertisseur 'Buck-Boos'

Le convertisseur 'Buck-Boost' combine les fonctionnalités des deux convertisseurs précédents. Il est fréquemment utilisé pour ajuster une tension d'entrée à une tension de sortie souhaitée, quelle que soit sa valeur, de manière similaire à un transformateur idéal. Son schéma, ainsi que les formes d'ondes des courants et des tensions, sont illustrés à La (figure 18) . [12]

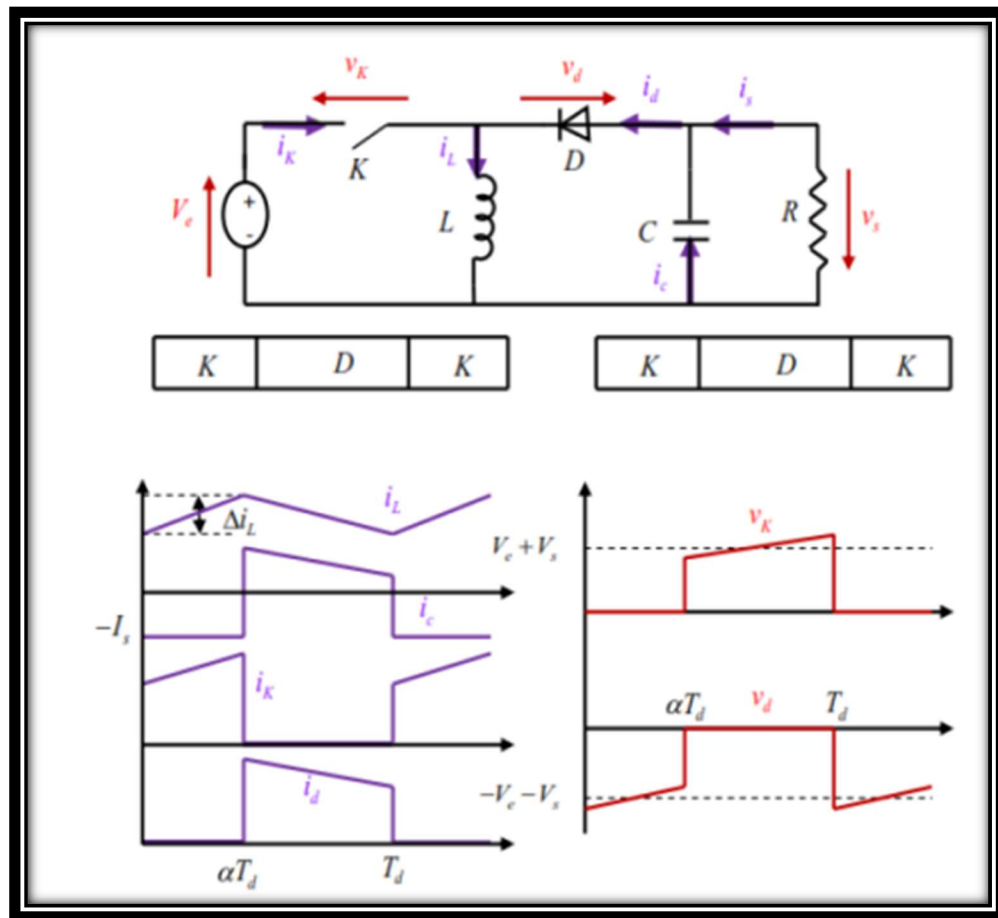


Figure II.18: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur 'Buck-Boost' [12]

La tension de sortie moyenne est donnée par:

$$V_s = \left(\frac{\alpha V_c}{1 - \alpha} \right) \quad (2.33)$$

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

$$\Delta i_l = \frac{\alpha V_c}{l f} \quad (2.34)$$

Et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{c f} = \frac{a^2 V_s}{(1-\alpha) R C f} \quad (2.35)$$

En général, la tension de sortie du convertisseur 'Buck-Boost' est inversée par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être soit supérieure, soit inférieure à celle de la tension d'entrée, selon le rapport cyclique appliqué. Ce convertisseur fonctionne donc comme un abaisseur-élevateur de tension avec inversion de polarité [12].

Le courant moyen traversant l'inductance est donné par

$$I_l = \left(\frac{I_s}{1-\alpha} \right) \quad (2.36)$$

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

En tension :

En courant :

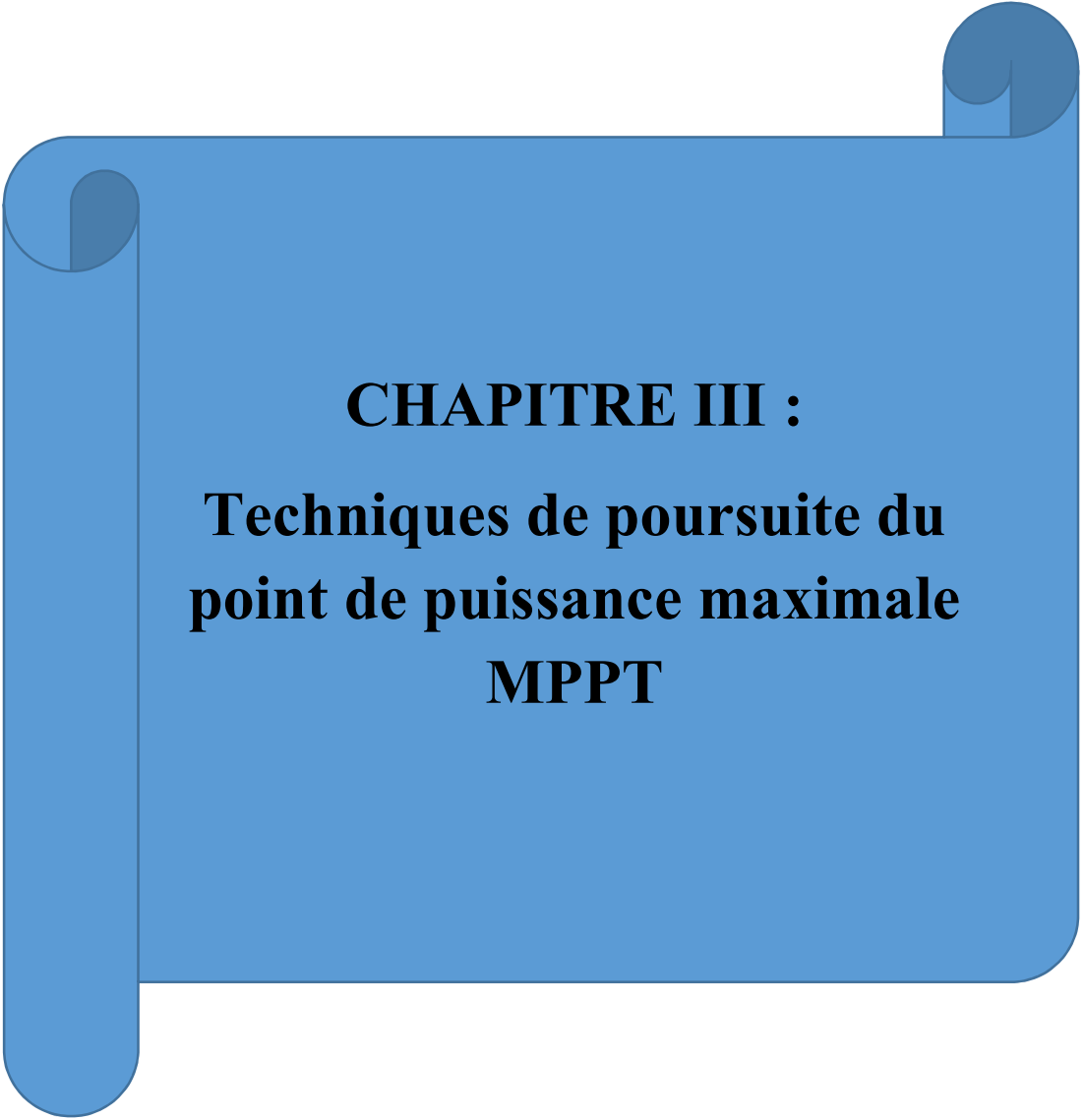
$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_{s,max} + V_s = \frac{V_c}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_l}{2} \quad (2.37)$$

$$I_{k,max} = I_{d,max} = I_{L,max} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_l}{2} \quad (2.38)$$

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en profondeur le monde du photovoltaïque, de la science fondamentale des cellules solaires à leurs applications concrètes dans les systèmes d'énergie. Nous avons découvert comment la lumière du soleil est transformée en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, et comment les cellules solaires sont assemblées en modules et en systèmes pour alimenter nos maisons et nos industries.

Nous avons également examiné les différents types de convertisseurs DC-DC qui jouent un rôle essentiel dans l'optimisation de l'énergie solaire, ainsi que les facteurs environnementaux tels que la température et l'éclairement qui peuvent influencer les performances des systèmes photovoltaïques.

A blue scroll graphic with a light blue background and a darker blue border. The scroll is unrolled in the center, with the top and bottom edges curled up. The text is centered on the unrolled portion.

CHAPITRE III :

Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons deux méthodes importantes de suivi du point de puissance maximale (MPPT), à savoir la logique floue et l'optimisation par essaim de particules (PSO). Nous nous concentrerons sur leur principe de fonctionnement, l'étude de leurs algorithmes, et enfin la présentation des avantages et des inconvénients de chacune d'elles.

III.2. Méthodes de poursuite du point de puissance maximale MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) joue un rôle essentiel dans l'optimisation des performances d'un système photovoltaïque. Son principe consiste à ajuster automatiquement le rapport cyclique α pour atteindre sa valeur optimale, permettant ainsi de maximiser la puissance fournie par le générateur photovoltaïque (GPV).

Comme le montre la figure III.1, une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque intègre cette commande MPPT, associée à un étage d'adaptation. Ce dernier assure une correspondance efficace entre le GPV et la charge. Dans le cadre de la conversion solaire, cet étage d'adaptation est généralement réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC. Son rôle est d'adapter la puissance générée par le GPV pour qu'elle corresponde à la puissance maximale P_{max} , garantissant ainsi un transfert optimal de l'énergie vers la charge.

La méthode de commande la plus répandue consiste à ajuster automatiquement le rapport cyclique afin de maintenir le GPV à son point de fonctionnement optimal, quelles que soient les variations des conditions atmosphériques. [20]

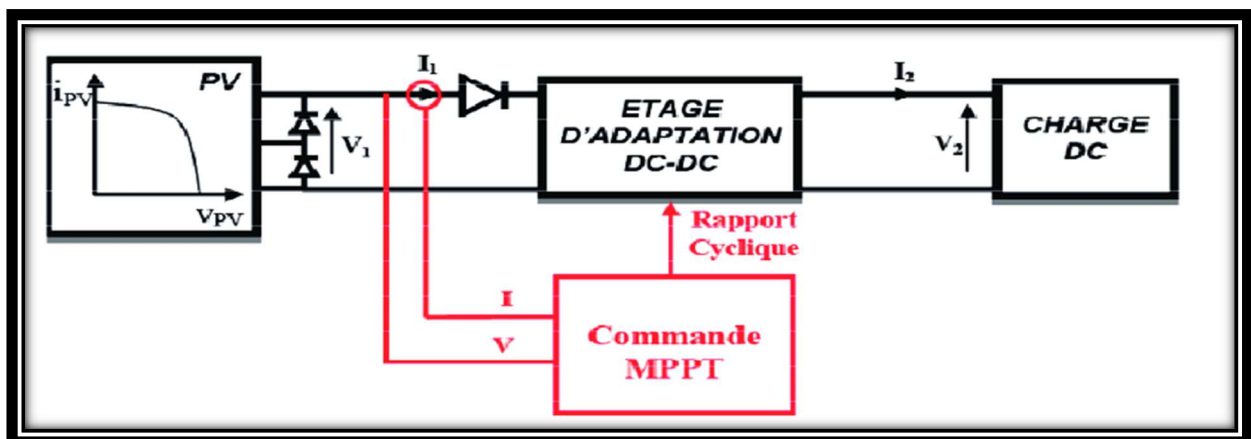


Figure III.1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [21]

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet d'extraire la puissance maximale possible du générateur photovoltaïque (GPV). Le point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté. Cependant, en raison des variations d'irradiation solaire et de température tout au long de la journée, ce point de fonctionnement évolue constamment [20].

Pour garantir un transfert optimal de l'énergie, la charge doit s'adapter en temps réel afin de suivre en permanence le point de puissance maximale (MPP). Cette adaptation est assurée par un suiveur MPPT, qui ajuste dynamiquement le point de fonctionnement électrique du GPV en modifiant le rapport cyclique de l'hacheur parallèle. Ainsi, l'impédance de la charge est ajustée pour correspondre à celle du module photovoltaïque, ce qui permet un transfert maximal de puissance vers la charge

Dans la littérature, plusieurs algorithmes ont été développés pour rechercher et suivre le point de puissance maximale (PPM). Dans notre travail, nous nous appuyons sur deux techniques de commande MPPT :

- L'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) est un algorithme offrant des résultats précis.
- L'algorithme basé sur la logique floue, qui propose une approche plus intelligente et adaptative pour optimiser l'extraction de puissance. [20]

III.3. Méthode de la logique floue

III.3.1. Historique et définition

Depuis des siècles, l'humanité cherche à comprendre et à maîtriser les incertitudes et les imperfections qui lui sont propres. Cette quête a conduit à l'émergence de la logique floue, qui s'appuie principalement sur la théorie des ensembles flous, introduite par Lotfi Zadeh en 1965 à Berkeley, ainsi que sur la théorie des possibilités développée en 1978. La publication de l'ouvrage "Fuzzy Sets " par Lotfi Zadeh a marqué un tournant décisif en proposant une alternative à la logique classique bivalente, la remplaçant par une approche multivaluée. Ce travail a introduit le concept de flou dans la littérature scientifique et a permis d'étendre la fonction indicatrice traditionnelle des ensembles classiques vers un modèle plus flexible et adaptatif. [22]

$$I_A(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

En une fonction appelée fonction d'appartenance $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$.

La combinaison des ensembles flous avec l'opérateur 'point' des fonctions d'appartenances :

$$I_{A \cap B}(x) = \min(I_A(x), I_B(x)) \quad (3.2)$$

$$I_{A \cup B}(x) = \max(I_A(x), I_B(x)) \quad (3.3)$$

$$I_{A^c}(x) = 1 - I_A(x) \quad (3.4)$$

$$A \subset B \text{ ssi } I_A(x) \leq I_B(x) \text{ pour tout } x \in X \quad (3.5)$$

La valeur d'appartenance $\mu(x)$ A mesure les degrés avec l'élément x appartenant à l'ensemble

$$\mu_A(x) = \text{degrés}(x \in A) \quad (3.6)$$

III.3.2. Principe de la logique floue

La logique floue propose une approche plus flexible que la logique binaire classique (vrai/faux) en permettant de manipuler des degrés de vérité. Au lieu de se limiter à des réponses strictement vraies ou fausses, elle introduit une gradation entre ces deux extrêmes. Cette

approche facilite la modélisation de concepts complexes et nuancés, notamment ceux issus du langage naturel ou de situations ambiguës difficiles à formaliser avec précision. La logique floue s'appuie sur des fonctions d'appartenance, qui attribuent à chaque valeur d'une variable un degré d'appartenance à une catégorie donnée. En combinant ces fonctions, il devient possible d'évaluer le degré de vérité d'une proposition et de guider les décisions en conséquence. [23]

III.3.3. Opérations sur les ensembles flous

III.3.3.1. L'union (Opérateur OU)

L'union de deux ensembles flous, A et B, donne naissance à un nouvel ensemble flou constitué des éléments de l'univers X, où chaque élément reçoit le degré d'appartenance le plus élevé entre ceux d'A et de B. Autrement dit, pour chaque élément x appartenant à X, on retient la valeur maximale entre $\mu_A(x)$ (le degré d'appartenance à A) et $\mu_B(x)$ (le degré d'appartenance à B). Cette opération est généralement exprimée à l'aide de la fonction maximum, qui permet de fusionner les fonctions d'appartenance des deux ensembles. En logique floue, l'union traduit le concept du " ou " , en sélectionnant toujours le degré d'appartenance le plus élevé parmi les deux. [23]

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.7)$$

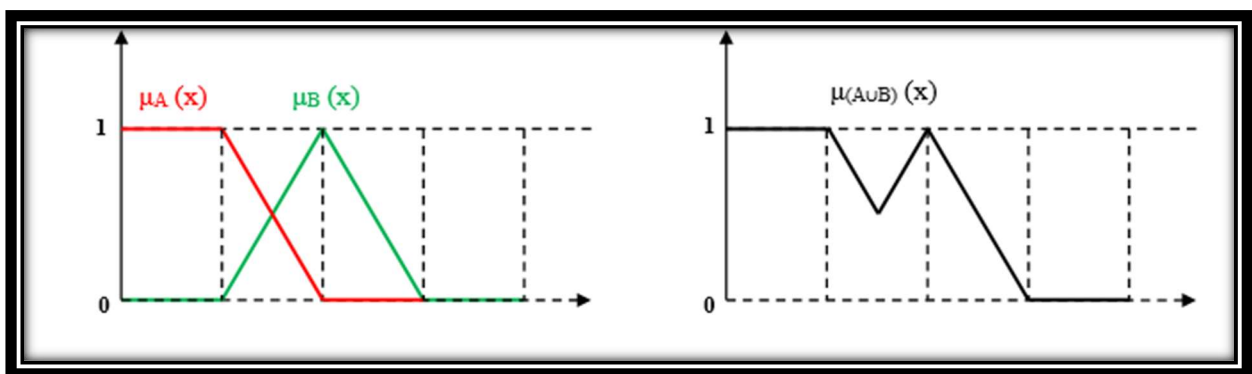


Figure III.2 : Courbes illustratives de l'union des sous-ensembles flous [23]

III.3.3.2. L'intersection (Opérateur ET)

L'intersection de deux ensembles flous A et B forme un nouvel ensemble flou contenant les éléments de X, où chaque élément reçoit le plus petit degré d'appartenance entre celui qu'il a dans A et celui qu'il a dans B. Concrètement, pour chaque élément x de X, on choisit la valeur la plus basse entre $\mu_A(x)$ (degré d'appartenance à A) et $\mu_B(x)$ (degré d'appartenance à B). Cette opération est souvent exprimée à l'aide de la fonction minimum, qui sert à fusionner les fonctions d'appartenance des deux ensembles. Ainsi, l'intersection reflète l'idée de "et" en logique floue, en privilégiant le degré d'appartenance le plus faible. [23]

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

(3.8)

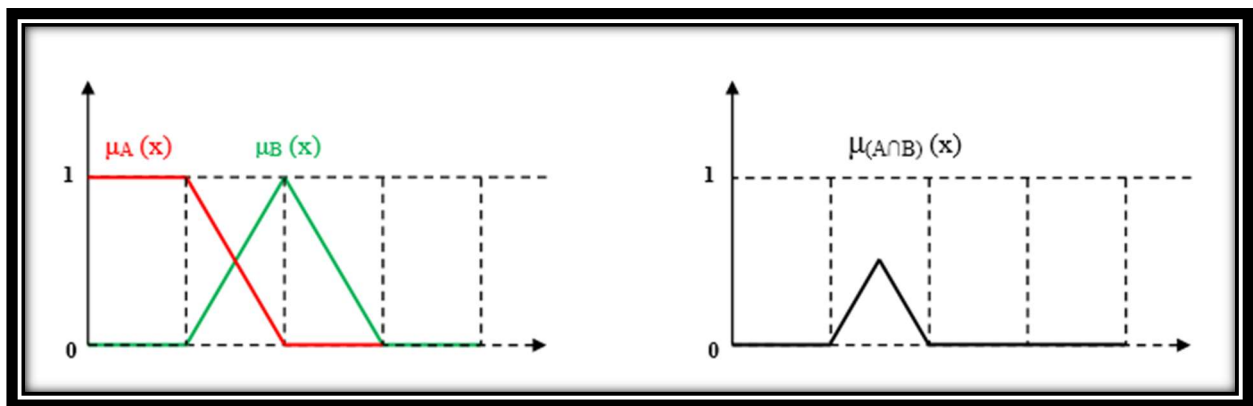


Figure III . 3: Courbe illustrative de l'intersection des sous-ensembles flous [23]

III.3.3.3. Le complément (Opérateur NON)

Le complément d'un ensemble flou A, défini sur l'univers X, regroupe les éléments de X qui n'appartiennent pas à A. En d'autres termes, il représente l'ensemble des éléments extérieurs à A. Mathématiquement, cette opération s'exprime en soustrayant de 1 le degré d'appartenance de chaque élément à A ($\mu_A(x)$). Ainsi, plus un élément est fortement associé à A, plus son appartenance à son complément est faible, et inversement. Cette transformation traduit en logique floue le concept de négation ou de "non". [23]

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.9)$$

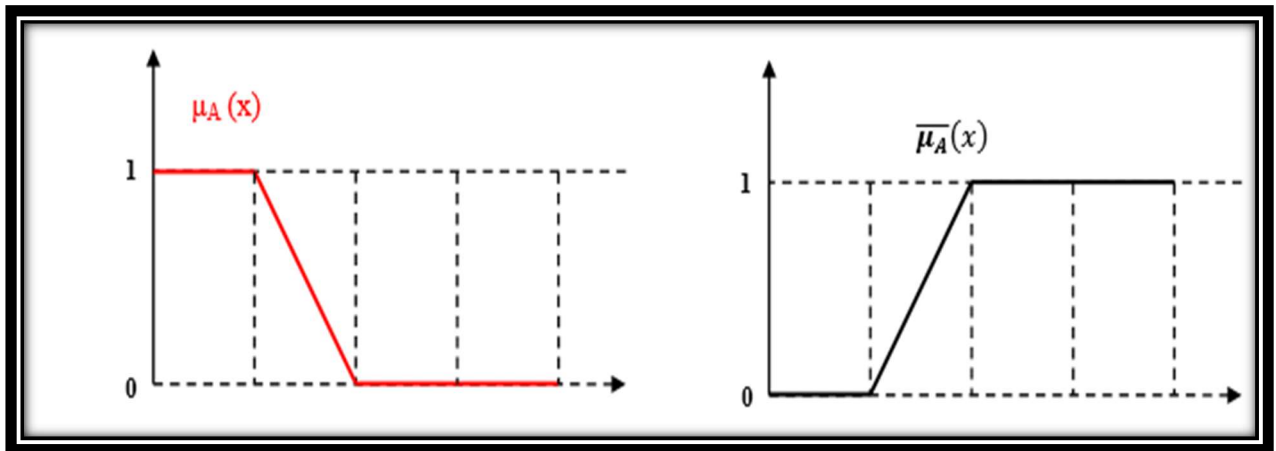


Figure III. 4: Courbe illustrative de le l'operateur NON [23]

III.3.3.4. Raisonnement flou

La logique classique a permis de formaliser des méthodes de déduction, offrant ainsi des outils pour dériver des conclusions certaines à partir de connaissances bien établies. Cependant, la logique floue élargit ces approches en les adaptant à des situations où les informations sont incomplètes, imprécises ou incertaines. Elle permet ainsi de traiter des cas où la rigidité de la logique classique montre ses limites, en intégrant une dimension de flexibilité et de nuance dans le raisonnement. [23]

III.4. Algorithme basée sur la logique floue

La commande basée sur la logique floue (FLC) est largement utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). Son principal avantage réside dans sa robustesse et son indépendance vis-à-vis d'un modèle mathématique précis du système. De plus, elle est capable de gérer efficacement les non-linéarités du système.

Cette approche repose sur deux variables d'entrée :

- L'erreur (E) : qui représente l'écart entre la puissance actuelle et la puissance maximale.
- La variation de l'erreur (ΔE) : qui indique la tendance de l'erreur (augmentation ou diminution).

La variable de sortie, notée $\Delta\alpha$, correspond à la variation du rapport cyclique. Cette valeur est utilisée pour ajuster le convertisseur statique et ainsi rechercher le point de puissance maximale. Elle est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée. [24]

Le fonctionnement de cet algorithme se déroule en trois étapes principales :

III.4.1. Étape de Fuzzification

Cette étape consiste à convertir les variables physiques d'entrée (E et ΔE) en ensembles flous. Les valeurs numériques sont ainsi transformées en variables linguistiques pouvant prendre l'une des sept valeurs suivantes [24] :

NG : Négatif Grand

NM : Négatif Moyen

NP : Négatif Petit

Z : Zéro (pas d'erreur)

PP : Positif Petit

PM : Positif Moyen

PG : Positif Grand

Ces valeurs linguistiques sont ensuite utilisées dans la structure de base de la commande logique floue, comme illustré dans la figure (III .5).

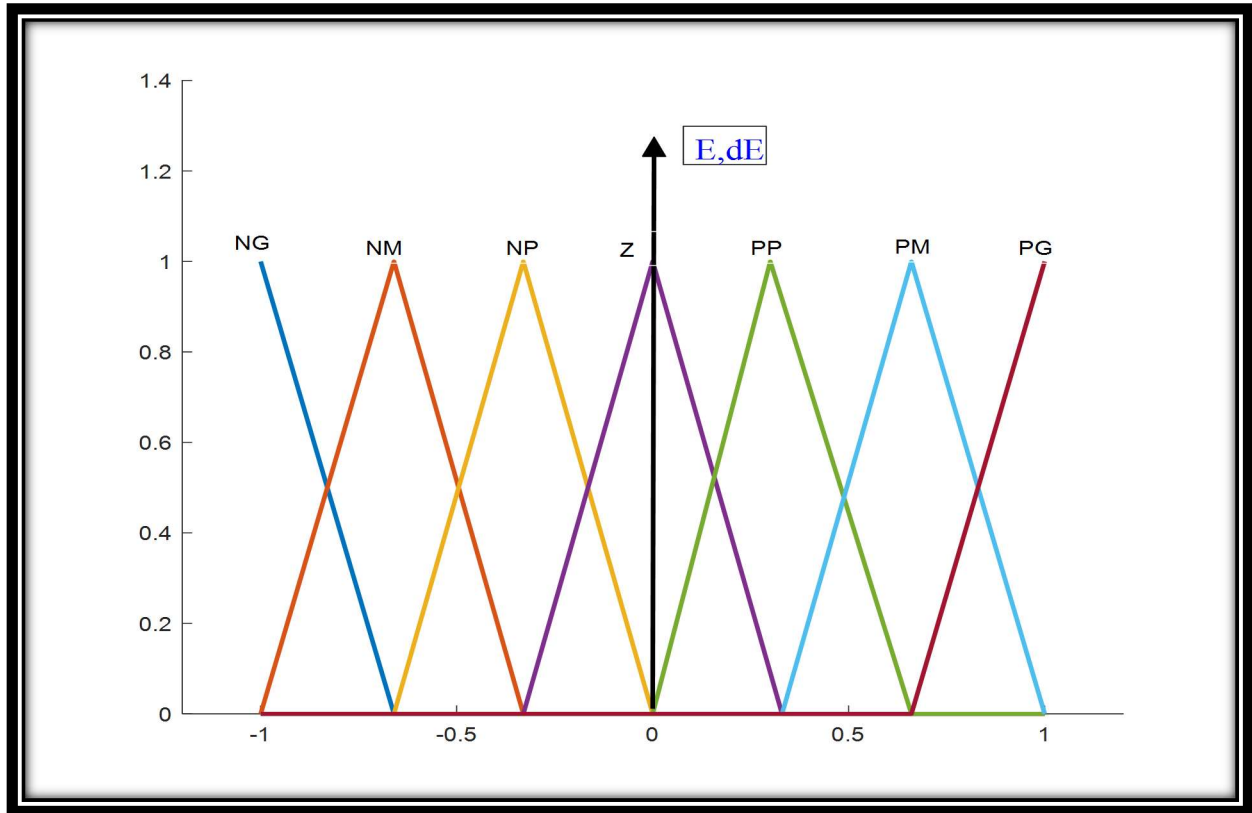


Figure III.5 : Structure de base de la commande floue

$$E = \frac{P(K) - P(k - 1)}{V(K) - V(k - 1)} \quad (3.10)$$

$$\Delta E = E(k) - E(k - 1) \quad (3.11)$$

III.4.2. Étape d'Inférence

L'étape d'inférence consiste à prendre des décisions en fonction des valeurs des variables d'entrée E (erreur) et ΔE (variation de l'erreur) afin de déterminer la variable de sortie $\Delta\alpha$ (variation du rapport cyclique). Cette décision s'appuie sur un tableau de règles d'inférence

(Tableau III.1), qui établit des relations logiques entre les entrées et la sortie en définissant des règles d'appartenance. [24]

Concrètement, ces règles permettent d'associer chaque combinaison des valeurs d'entrée à une valeur spécifique de la sortie. Par exemple :

- Si E est PG : Positif Grand et ΔE est Z Zéro (pas d'erreur)

Cela signifie que le point de fonctionnement est très éloigné du point de puissance maximale (PPM).

- Dans ce cas, selon la table de vérité, la valeur attribuée à la variable de sortie $\Delta\alpha$ sera Z Zéro (pas d'erreur) . Cela implique qu'une forte augmentation du rapport cyclique est nécessaire pour rapprocher le système du PPM.

DE \ E	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NG	PG	PG	PM	Z	NM	NG	NG
NM	PG	PM	PP	Z	NP	NM	NG
NP	PM	PP	PP	Z	NP	NP	NM
Z	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PP	NM	NP	NP	Z	PP	PP	PM
PM	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PG	NG	NG	NM	Z	PM	PG	PG

Tableau III.1 : de vérité pour une commande logique floue

III.4.3. Étape de Défuzzification

La défuzzification constitue la dernière étape du processus et s'applique exclusivement à la variable de sortie $\Delta\alpha$. Son objectif est de convertir cette variable linguistique en une valeur numérique utilisable pour piloter le convertisseur de puissance et permettre au système d'atteindre le point de puissance maximale (PPM).

Cette méthode présente d'excellentes performances en termes de précision et de rapidité de convergence vers le PPM. Cependant, elle présente un inconvénient majeur : sa précision dépend fortement de la complexité de la table de vérité utilisée. Par conséquent, il est essentiel d'utiliser un microcontrôleur doté d'une grande capacité de calcul. Cela entraîne toutefois une consommation énergétique plus élevée du microprocesseur ainsi qu'un coût supplémentaire. [24]

III.5. Avantages et inconvénients de la logique floue

La régulation par logique floue offre de nombreux atouts, mais présente également certaines limites. Parmi ses principaux avantages, on peut retenir les points suivants :

- Simplicité théorique : Elle permet une application aisée, même sur des systèmes complexes.
- Robustesse : Elle est capable de résister aux incertitudes et aux variations du système.
- Contrôle auto-adaptatif : Elle s'ajuste automatiquement aux changements et évolutions du procédé.
- Gestion des systèmes complexes : Elle permet une meilleure maîtrise des systèmes aux comportements non linéaires ou difficiles à modéliser.
- Performances dynamiques : Grâce à sa nature non linéaire, elle offre souvent des performances supérieures en termes de réactivité et de précision. [25]

Par contre les inconvénients sont :

- Réglage empirique : Son réglage repose principalement sur une approche expérimentale, ce qui peut limiter sa précision.

- Dépendance à l'expertise : Les performances du système dépendent fortement des compétences et de l'expérience de l'opérateur.
- Manque de directives claires : L'absence de méthodologie précise rend complexe la conception du réglage, notamment pour le choix des variables à mesurer, ainsi que pour la définition des étapes de fuzzification, d'inférence et de défuzzification.
- Approche artisanale : Son implémentation repose souvent sur une méthode peu structurée, ce qui peut compliquer l'intégration des connaissances de l'opérateur et rendre le processus moins reproductible. [25]

III.6. La méthode de l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO)

III.6.1. Définition de PSO

Pour aborder efficacement un problème d'optimisation complexe, souvent marqué par la présence de nombreuses solutions sous-optimales, l'utilisation d'une métaheuristique performante s'impose. Parmi les approches les plus répandues, les métaheuristiques à base populationnelle occupent une place de choix. L'une des plus remarquables est l'Optimisation par Essaim de Particules (OEP, ou PSO en anglais), introduite en 1995 [26] [27], qui a suscité un intérêt croissant dans la communauté scientifique.

Inspirée des comportements collectifs observés chez certains animaux — tels que les essaims d'abeilles, les vols coordonnés d'oiseaux ou encore les bancs de poissons — cette méthode repose sur la coopération entre particules. Celles-ci échangent continuellement des informations au cours de la recherche, en combinant leurs expériences individuelles et collectives pour progresser vers une solution optimale. Le succès de cette approche réside dans sa robustesse, sa souplesse d'adaptation, ainsi que dans son efficacité éprouvée face à une large gamme de problèmes [26] [28], faisant d'elle aujourd'hui l'une des métaheuristiques les plus populaires

L'optimisation par essaim de particules s'inspire du comportement collectif observé dans la nature. Chaque particule représente une solution potentielle, caractérisée par une position et une vitesse. Elle garde en mémoire sa meilleure performance passée, ainsi que celle de ses particules voisines (avec lesquelles elle échange des informations).

Le déplacement de chaque particule est influencé par trois éléments :

1. L'inertie : elle conserve une part de sa direction précédente,
2. L'expérience personnelle : elle est attirée par sa meilleure solution connue,
3. L'influence sociale : elle se rapproche des meilleures solutions identifiées par son voisinage.

Grâce à cette dynamique, l'essaim explore l'espace de recherche de manière collaborative et intelligente, ce qui permet une convergence progressive vers l'optimum global. [29]

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la Figure III.6.

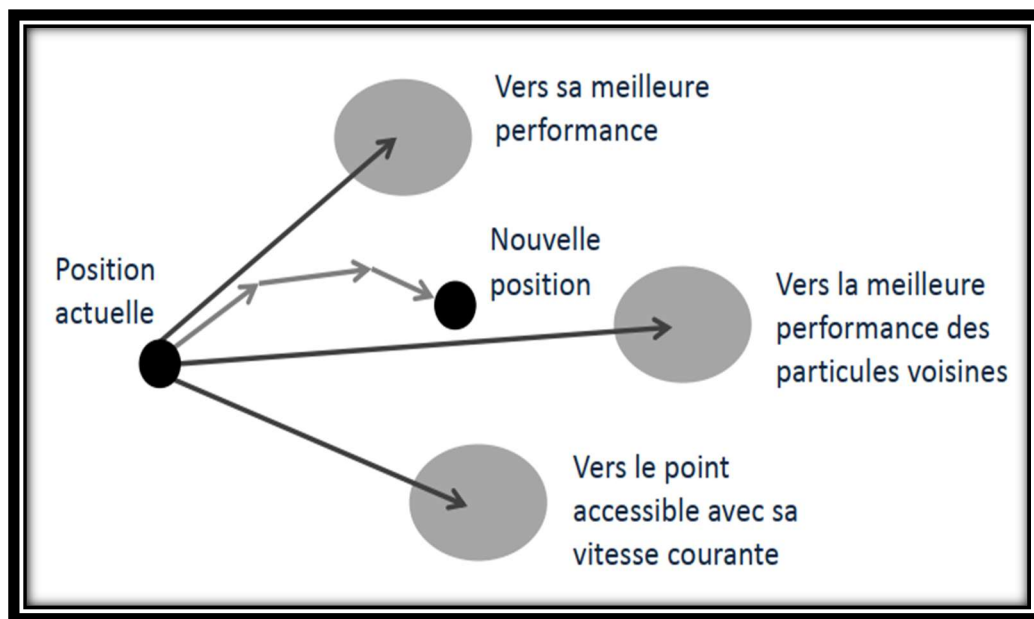


Figure III.6. Déplacement d'une particule [30]

III.6.2. Principe de fonctionnement de PSO

Les solutions potentielles d'une population, appelées particules, coexistent et évoluent simultanément en s'appuyant sur le partage de connaissances avec leurs voisines. Pendant leur exploration de l'espace de recherche, chaque particule génère une solution en utilisant son vecteur de vitesse. Elle ajuste ensuite cette vitesse pour améliorer sa position, en se basant à la fois sur sa propre expérience (c'est-à-dire la mémoire de la meilleure position

qu'elle a déjà atteinte) et sur l'expérience des autres particules de l'essaim (la meilleure solution trouvée collectivement).

Le mouvement de chaque particule est influencé par trois composantes principales [31]:

1. La composante d'inertie : la particule tend à conserver sa direction de déplacement actuelle.
2. La composante cognitive : la particule s'appuie sur son expérience personnelle pour se diriger vers la meilleure position déjà explorée.
3. La composante sociale : la particule prend en compte l'expérience de ses congénères pour se rapprocher de la meilleure position atteinte par l'ensemble de l'essaim.

Dans un espace de recherche de dimension D , chaque particule i de l'essaim est caractérisée par :

Vecteur position

$$\vec{x}_{ij} = (x_{i1} \ x_{i2} \ \dots \ x_{iD})^T \quad (3.12)$$

représentant la solution courante dans l'espace de recherche

Vecteur vitesse :

$$\vec{v}_{ij} = (v_{i1} \ v_{i2} \ \dots \ v_{iD})^T \quad (3.13)$$

Déterminant son déplacement et l'exploration de nouvelles solutions

La qualité de chaque position est évaluée par la fonction objectif $f(x^*_i)$. Chaque particule mémorise :

1.Meilleure position individuelle :

$$\vec{p}_{ij} = (p_{i1} p_{i2} \dots p_{iD})^T \quad (3.14)$$

(solution optimale personnelle historique)

2.Meilleure position collective :

$$\vec{g}_{ij} = (g_{i1} g_{i2} \dots g_{iD})^T \quad (3.15)$$

(Meilleure solution trouvée par le voisinage)

Le principe de la méthode d'essaim de particule est résumé par la figure suivante :

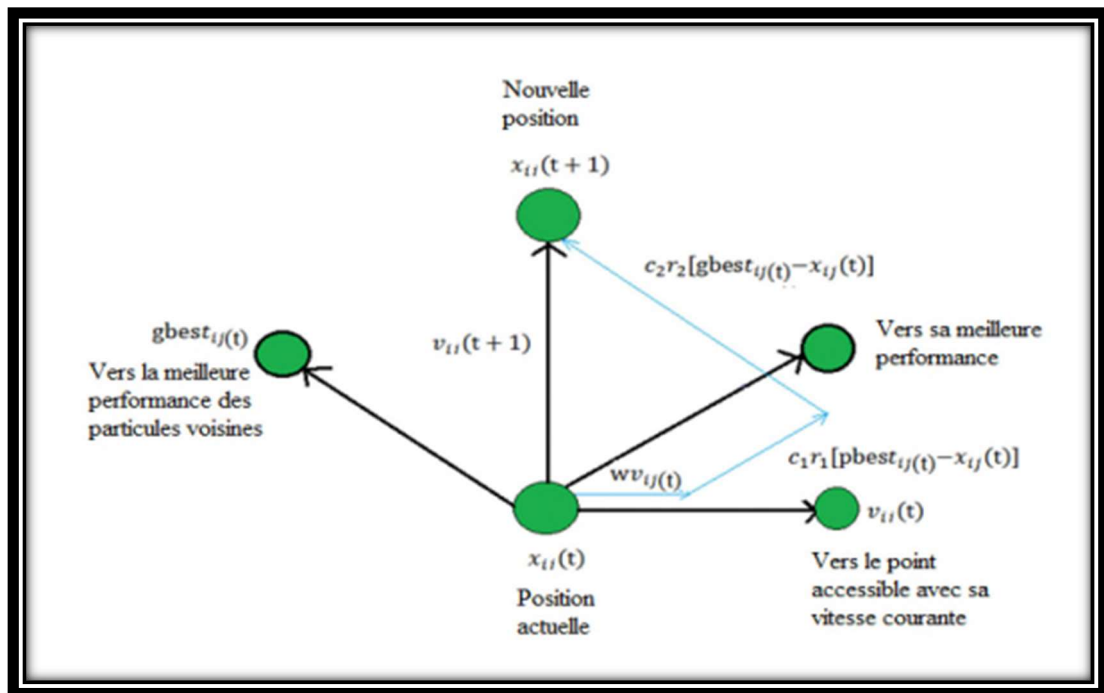


Figure III.7. Principe du déplacement d'une particule [32]

Le vecteur de vitesse est calculé à partir de l'équation suivante [31,32] :

$$v_{ij}(k) = wv_{ij}(k-1) + c_1r_1(p_{ij}(k-1) - x_{ij}(k-1)) + c_2r_2(g_{ij}(k-1) - x_{ij}(k-1)) \quad (3.16)$$

La position à l'itération de la particule i est alors définie par l'équation :

$$x_{ij}(k) = x_{ij}(k-1) + v_{ij}(k) \quad (3.17)$$

$$i = 1, 2, 3 \dots Np ; j = 1, 2, 3 \dots Nd ; k = 1, 2, 3 \dots Nkmax$$

Avec :

Np : est le nombre de particules de l'essaim.

Nd : est le nombre de variables du problème (c-à-d dimension d'une particule).

$Nkmax$: est le nombre maximal d'itérations.

$v_{ij}(k)$: est la vitesse de la j ème composante de la i ème particule de l'essaim, à la k ème itération.

p_{ij} : est la j ème composante de la meilleure position occupée par la i ème particule de l'essaim enregistrée dans les itérations précédentes (local best).

g_i : est la j ème composante de la meilleure position occupée par la i ème particule globale de l'essaim (global best).

$x_{ij}(k)$: est la j ème coordonnée de la position actuelle de la particule i ème, à la k ème itération.

w : est en général une constante appelée coefficient d'inertie.

c_1 et c_2 sont deux constantes appelées coefficients d'accélération.

r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0,1]$ à chaque itération et pour chaque dimension.

$w_{ij}(k-1)$: correspond à la composante physique du déplacement. Le paramètre w contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur. Il est à noter que, dans certaines applications, le paramètre w peut être variable.

$c1 \cdot r1 \cdot (p_{i,jbest-xij}(k-1))$: correspond à la composante cognitive du déplacement où $c1$ contrôle le comportement cognitif de la particule.

$c2 \cdot r2 \cdot (g_{i,best-xij}(k-1))$: correspond à la composante sociale du déplacement, où $c2$ contrôle l'aptitude sociale de la particule.

Les gammes appropriées de valeur pour $c1$ et $c2$ sont de 1 à 2, mais 2 est le plus approprié dans beaucoup de cas [38].

Le coefficient d'inertie peut être variable selon :

$$w = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} \right) * k \quad (3.18)$$

Où :

k_{max} , k sont respectivement le nombre maximum des itérations et le nombre d'itération courante.

w_{min} et w_{max} sont respectivement les coefficients minimum et maximum d'inertie.

Le coefficient d'inertie w joue un rôle fondamental dans les algorithmes de recherche, en assurant un équilibre entre l'exploration globale et l'exploitation locale. Un réglage judicieux de ce paramètre peut améliorer de manière significative l'efficacité de l'algorithme, en facilitant la convergence vers une solution optimale. D'après les résultats expérimentaux présentés dans [33], une diminution linéaire de w , allant de 0.9 à 0.4 au fil de la recherche, permet d'obtenir les meilleures performances.

III.6.3. Mécanisme de confinement

Il peut arriver qu'en raison de sa position et de sa vitesse, une particule se retrouve en dehors de l'espace de recherche lors de son déplacement.

Pour y remédier, l'algorithme utilise une stratégie de confinement qui permet de repositionner la particule à l'intérieur des bornes définies.

Ce processus consiste généralement à la ramener vers le point admissible le plus proche dans l'espace de recherche [34][35] [36].

$$\begin{cases} \text{si } x_{ij} > x_{jmax} & \text{alors } x_{ij} = x_{jmax} \\ \text{si } x_{ij} < x_{jmin} & \text{alors } x_{ij} = x_{jmin} \end{cases}$$

$$V_{ij} = 0$$

(3.19)

Où : x_{jmin} et x_{jmax} sont les valeurs limites du paramètre x_i

III.6.4. Déroulement d'algorithme

Pour expliquer le principe de l'algorithme PSO appliqué pour résoudre un problème d'optimisation, considérons le problème de minimisation [36] :

$$\begin{cases} \text{Min } f(x) \\ x \in D \end{cases}$$

(3.20)

La fonction fitness associé

$$fitness(x_j) = f(x_j)$$

(3.21)

L'algorithme PSO se déroule suivant les étapes suivantes [37] :

Étape 1 : Initialisation

- Génération aléatoire d'une population de particules (positions + vitesses) dans l'espace de recherche DD.
- Définition du critère d'arrêt (nombre d'itérations, précision, etc.).

Étape 2 : Évaluation

- Calcul de la fonction objectif pour chaque particule.

Étape 3 : Mise à jour des meilleures positions

- Mise à jour de la meilleure position personnelle (Pbest) de chaque particule.
- Mise à jour de la meilleure position globale (Gbest) de la population.

Étape 4 : Mise à jour des vitesses et positions

- Ajustement des vitesses et des positions selon les équations de mouvement du PSO.

Étape 5 : Confinement des particules

- Si une particule sort des limites, application d'un mécanisme de retour dans l'espace admissible (ex. équation 3.19).

Étape 6 : Vérification du critère d'arrêt

- Si le critère n'est pas atteint → retour à l'étape 2.
- Sinon → arrêt de l'algorithme et retour de la solution optimale (Gbest).

La Figure III.8 montre l'organigramme qui résume ces étapes :

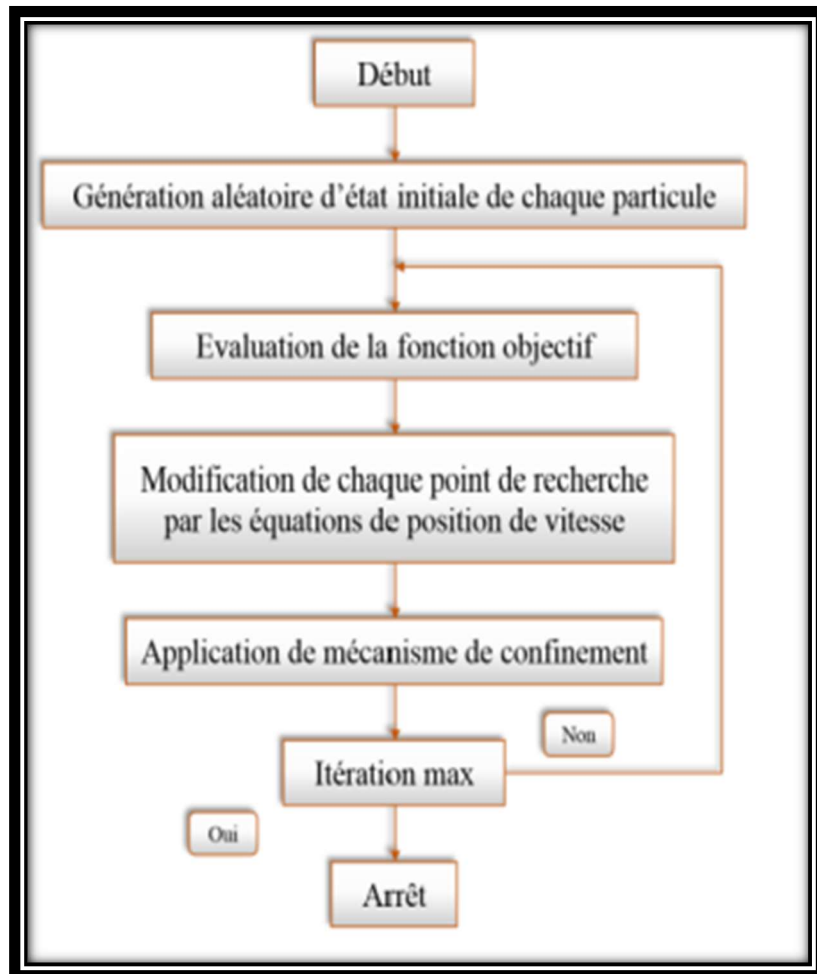


Figure III.8. Organigramme générale de la méthode PSO [32]

III.7. Avantages et inconvénients de PSO

L'algorithme PSO présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes classiques, notamment grâce à son exploration aléatoire de l'espace de solutions. Simple à mettre en œuvre, il permet d'obtenir rapidement des résultats de qualité avec un nombre limité de paramètres à ajuster.

Cependant, bien qu'il converge souvent plus vite que d'autres algorithmes évolutionnaires, une augmentation du nombre d'itérations ne garantit pas systématiquement une amélioration de la solution.

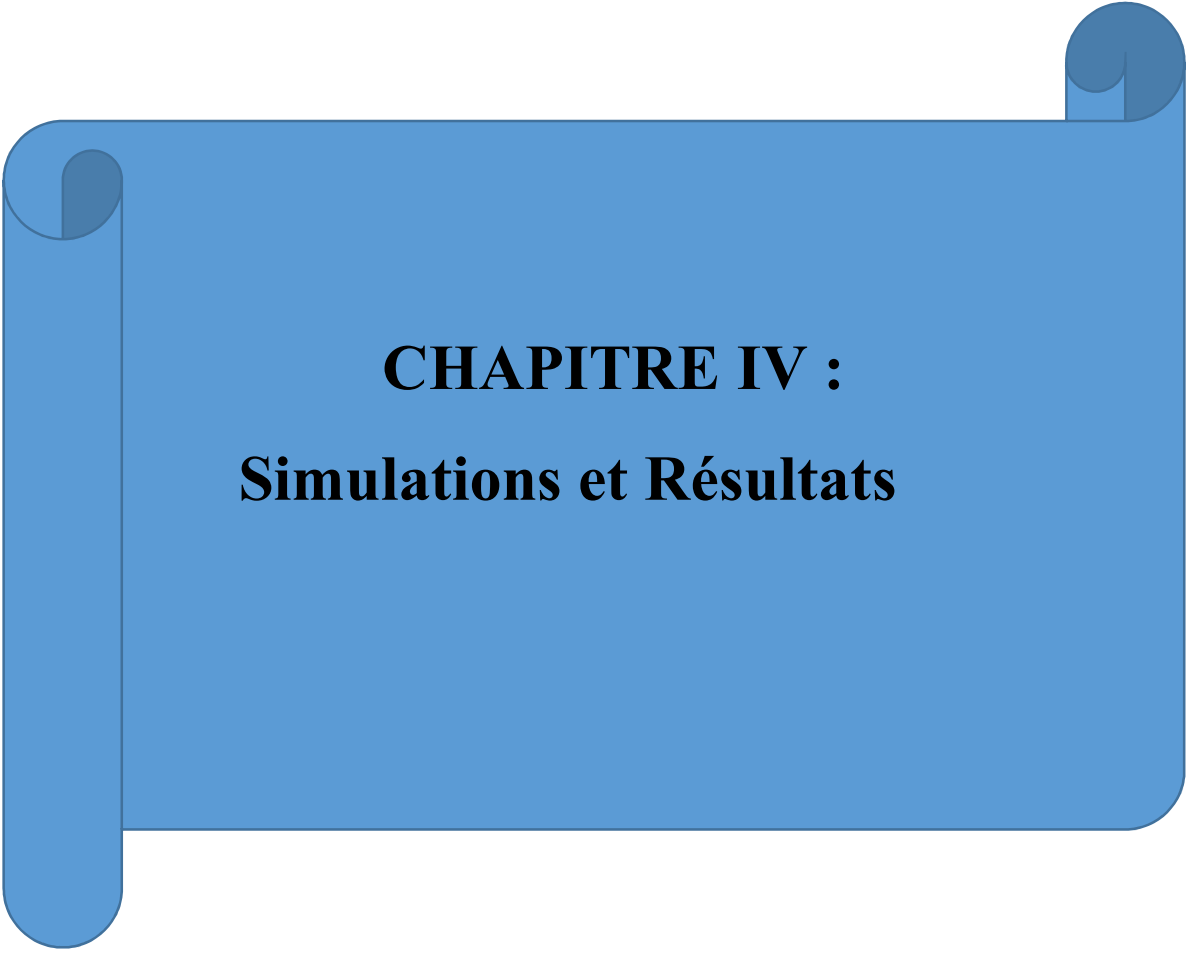
Les principaux inconvénients du PSO sont :

La convergence prématurée de l'essaim, qui peut mener à des solutions sous-optimales.

Sa nature stochastique, le rendant très sensible aux paramètres initiaux : toute modification peut influencer son comportement et affecter la qualité des solutions obtenues. [38]

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude approfondie à la fois de l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO) et de la logique floue. Cette étude a montré que ce sont deux techniques efficaces pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT), en raison de leur faible taux d'oscillations et de leur rapidité de performance par rapport aux autres méthodes.

A blue scroll graphic with a vertical strip on the left and a horizontal strip on the right, both with rounded ends. The text is centered on the horizontal strip.

CHAPITRE IV :

Simulations et Résultats

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans un système photovoltaïque en utilisant deux méthodes différentes : la « logique floue (Logique Floue) » et « l'optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization - PSO) ».

À partir de ces résultats, nous analysons les performances des deux méthodes dans des conditions variable de température et d'irradiation solaire. Nous mettons également en évidence les différences entre elles en termes de vitesse de réponse, de précision du suivi et de stabilité du système autour du point de puissance maximale.

IV.2. Les caractéristiques de panneau photovoltaïque utiliser

Eclairement standard	$E=1000 \text{ W/m}^2$
Température standard	$T=25^\circ\text{C}$
Puissance maximale	$P=82\text{W}$
Tension de circuit ouvert	$V_{co}=21.7\text{V}$
Courant de court- circuit	$I_{cc}=4.8\text{A}$

Tableau IV.1 : Les caractéristiques de panneau photovoltaïque

IV.3. Schéma d'un système photovoltaïque sous PSC dont le MPP est suivi à base de l'algorithme PSO

La (Figure III.6) rassemble tous les éléments d'un système photovoltaïque sous les conditions d'ombrage partiel (PSC), dont le point de puissance maximale est suivi par la méthode MPPT basant sur l'algorithme PSO

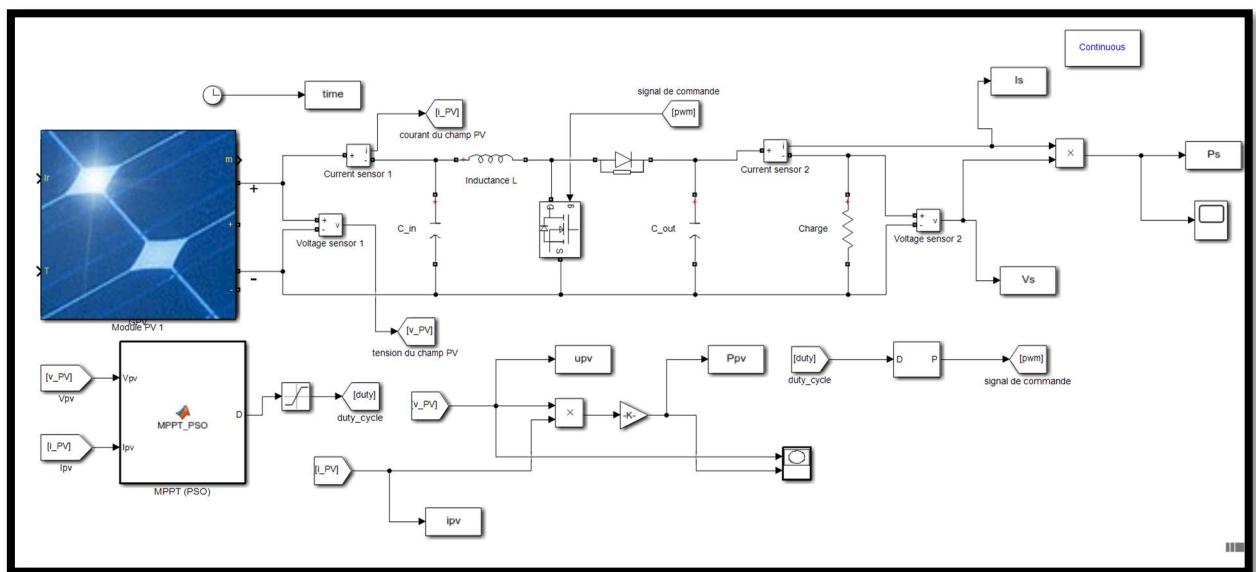


Figure IV.1 : Schéma de la méthode MPPT basant sur l'algorithme PSO sous MATLAB/SIMULINK

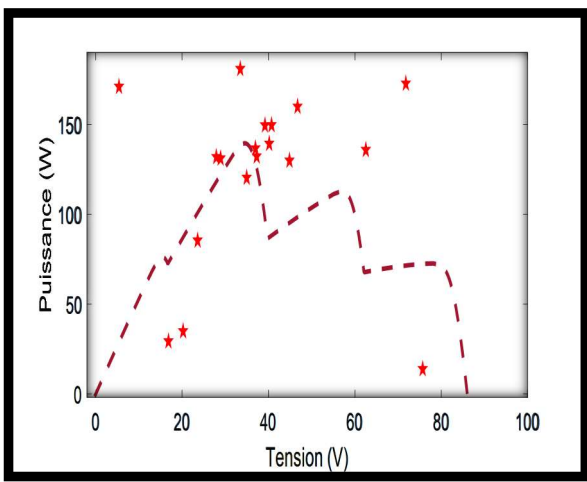
Afin de suivre le point de puissance maximale, le courant et la tension générés par le champ photovoltaïque sont captés et envoyés à un contrôleur basé sur l'algorithme PSO. Ce contrôleur calcule la puissance maximale produite pour chaque valeur de courant et de tension du système, comme expliqué précédemment. Ensuite, il détermine le cycle de travail (entre 0 et 1), qui est converti en un signal analogique (PWM) et utilisé pour activer le mosfet, commandant ainsi le convertisseur DC/DC. Cela permet de maintenir un fonctionnement à une tension optimale correspondant à la puissance maximale. Dans cette étude, nous avons appliqué les conditions PSC pour observer les résultats lorsque les modules du champ photovoltaïque sont soumis à des conditions d'ensoleillement inégales. Le bloc "Champ PV", présenté dans la (Figure III.6), comprend des modules connectés en série, chacun étant équipé

d'une diode by-pass installée en parallèle. Ces modules sont exposés à la même température, mais à des irradiances différentes, simulant ainsi des conditions d'ombrage partiel (PSC).

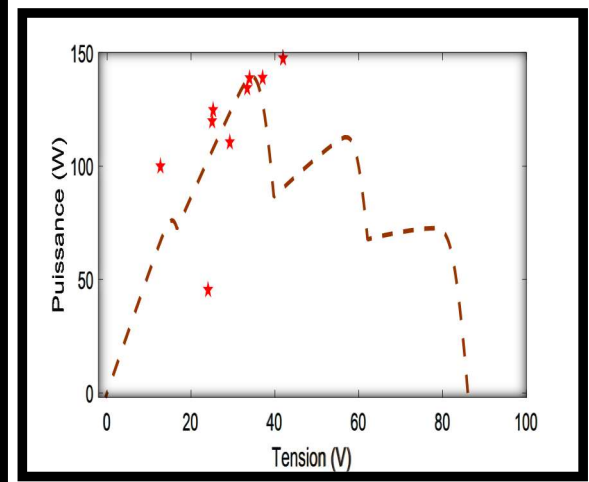
IV.4. Poursuite du point MPP par la méthode MPPT basée sur PSO

À travers l'exécution de la simulation illustrée dans la figure (IV.1) le suivi du point de puissance maximale globale a été réalisé en utilisant l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO). Les figures ci-dessous expliquent, étape par étape, la procédure de poursuite du point de puissance maximale (MPP) à l'aide de cet algorithme, comme illustré dans la figure (IV.2)

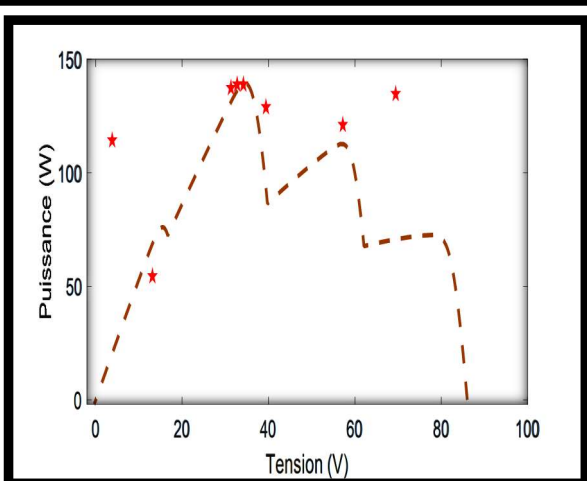
1



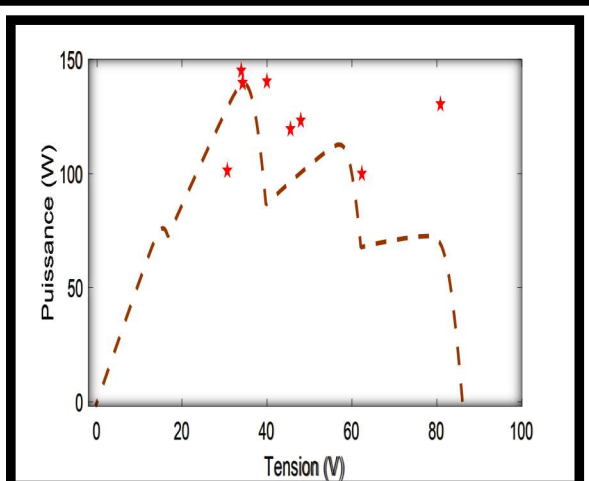
2



3



4



5

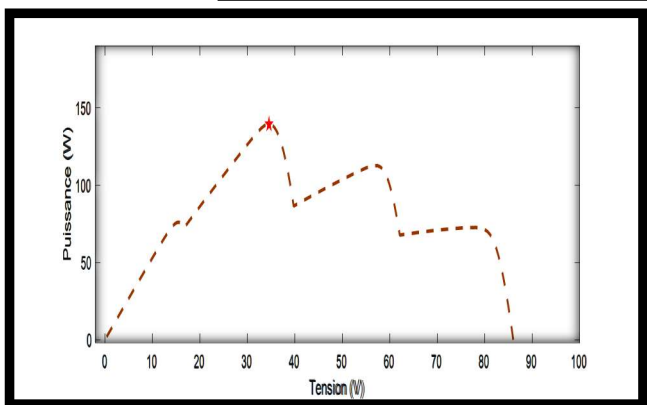


Figure IV.2: Quelques étapes de procédure de la technique MPPT basant sur PSO

Commentaire et interprétation

Première étape

La courbe de puissance en fonction de la tension est présentée, où l'on observe l'existence d'un point de puissance maximale global ainsi que trois points de puissance maximale locaux. Cette multiplicité de sommets indique que le système photovoltaïque fonctionne sous des conditions d'ombrage partiel (PSC), ce qui entraîne l'apparition de plusieurs sommets sur la courbe de puissance.

Deuxième étape

L'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) basé sur l'optimisation par essaim de particules (PSO) commence à fonctionner. Au cours de cette étape, on observe que les particules se dirigent vers les régions des sommets dans une tentative de localiser les points de puissance optimaux, qu'ils soient locaux ou globaux.

Troisième étape

La technique MPPT poursuit l'identification des sommets de la courbe de puissance. À cette étape, quatre sommets sont identifiés, chacun représentant un point de puissance optimale locale, associé à un rapport cyclique spécifique (D_{opt_i}).

Quatrième étape

Parmi les points visités lors du calcul de la fonction de fitness, le point présentant la plus grande puissance est sélectionné. Ce point est considéré comme le point de puissance maximale global et est associé à un rapport cyclique optimal (D_{opt_g}).

Cinquième étape

Dans cette dernière étape, la précision de la technique utilisée apparaît clairement. Le rapport cyclique optimal (D_{opt_g}) est appliqué afin de stabiliser le fonctionnement du système photovoltaïque à la tension optimale ($V_{optimale}$), correspondant au point de puissance maximale global. La méthode proposée se distingue par sa capacité à atteindre le point de puissance maximale global, contrairement aux méthodes traditionnelles comme la méthode Perturb and Observe (P&O) ou la logique floue, qui s'arrêtent souvent au premier sommet rencontré, même s'il s'agit seulement d'un maximum local.

IV.5. Résultat de simulation MPPT par la logique floue

IV.5.1. Fonctionnement du système flou

IV.5.1.1. Schéma de fonctionnement

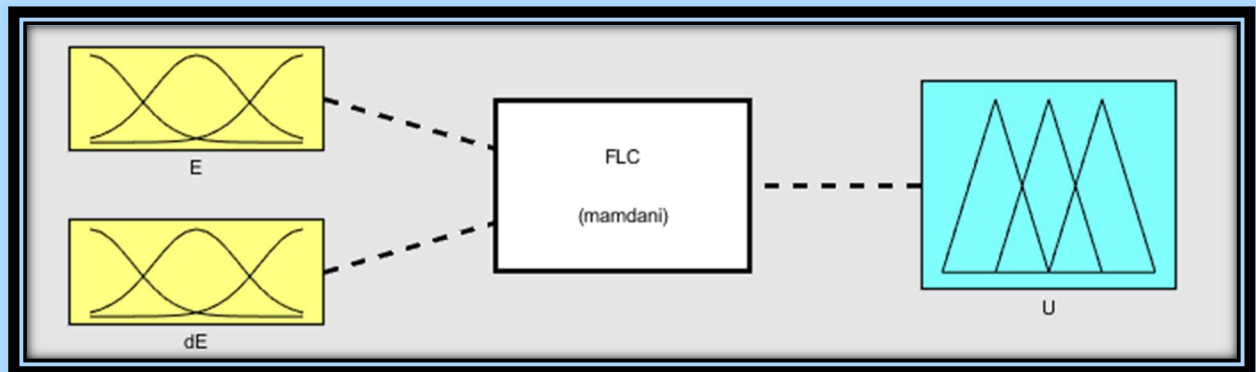


Figure IV.3 : Copie du système flou conçu via la fuzzy logic toolbox de Matlab

IV.5.1.2. Partition floue définie via la fuzzy logic

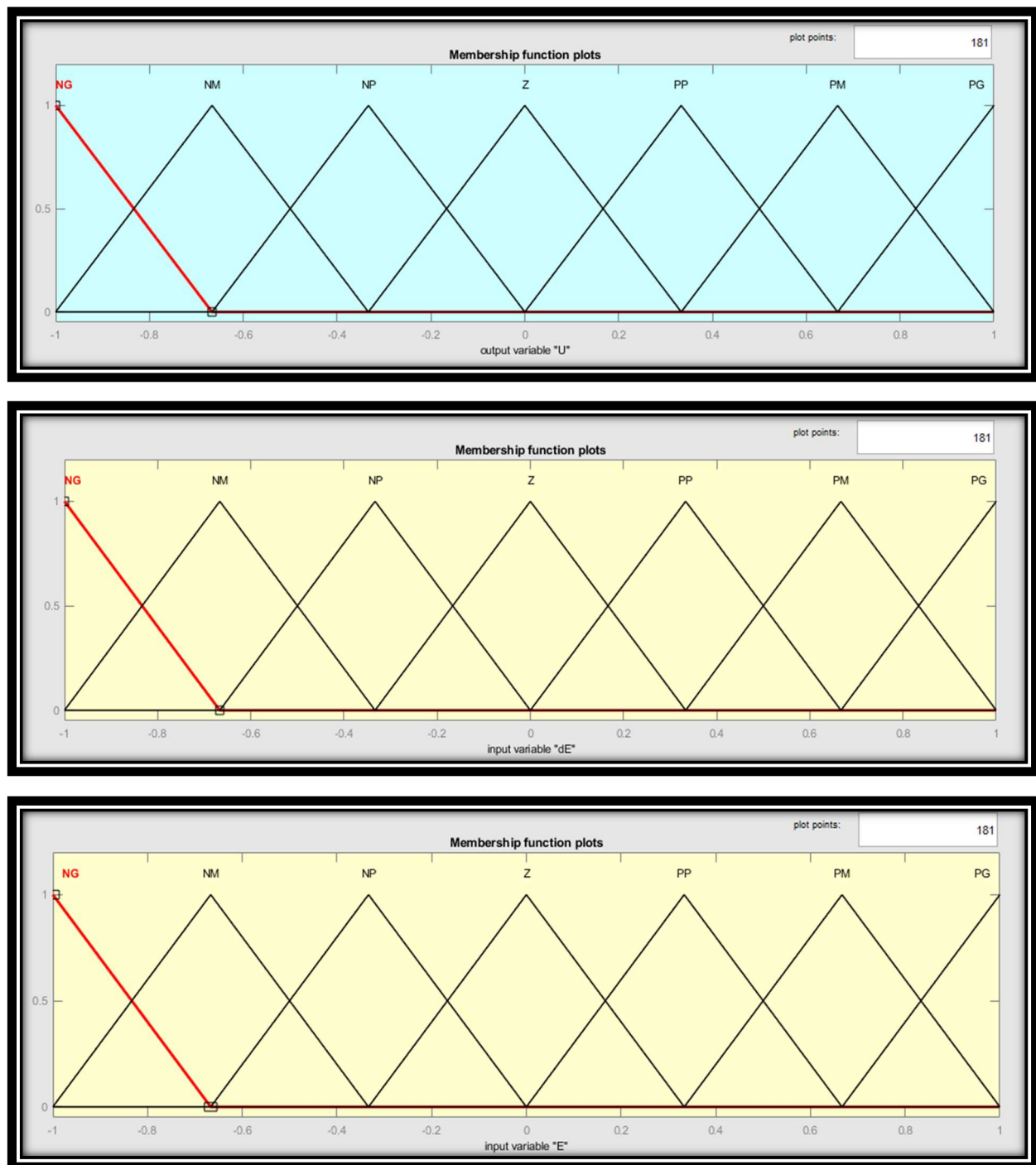


Figure IV.4 : Copie d'écran de la partition floue définie via la fuzzy logic
toolbox de Matlab

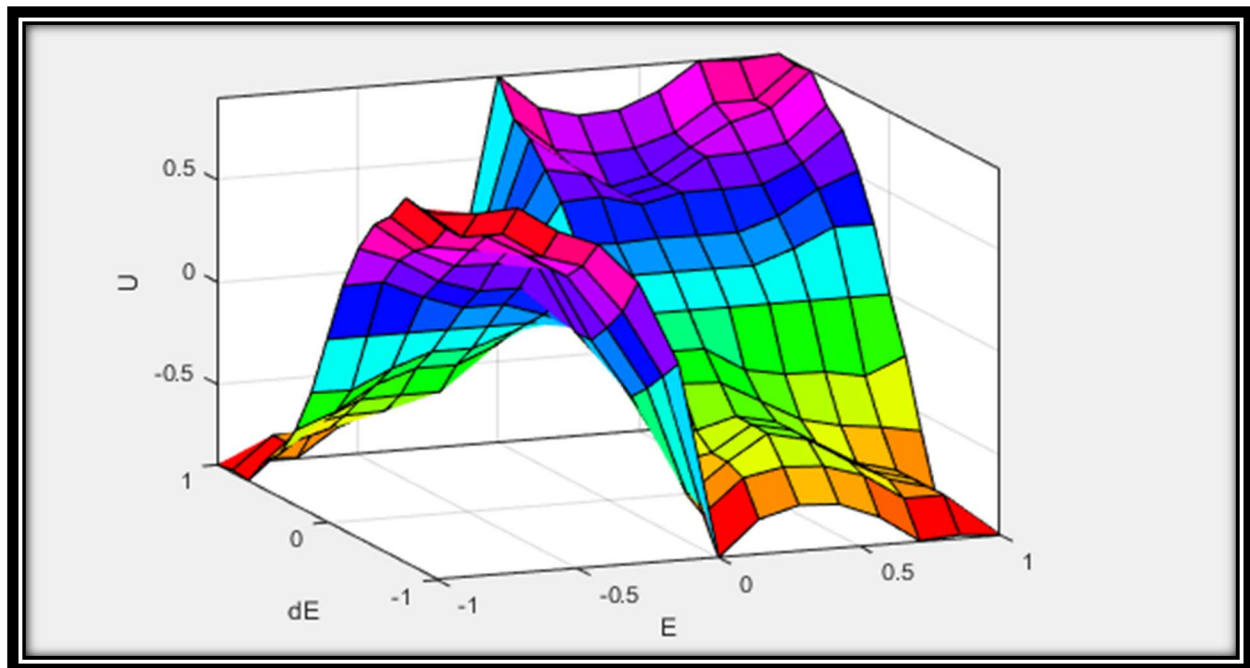


Figure IV.5 : La surface des règles

IV.6. Résultat de simulation MPPT par la logique floue

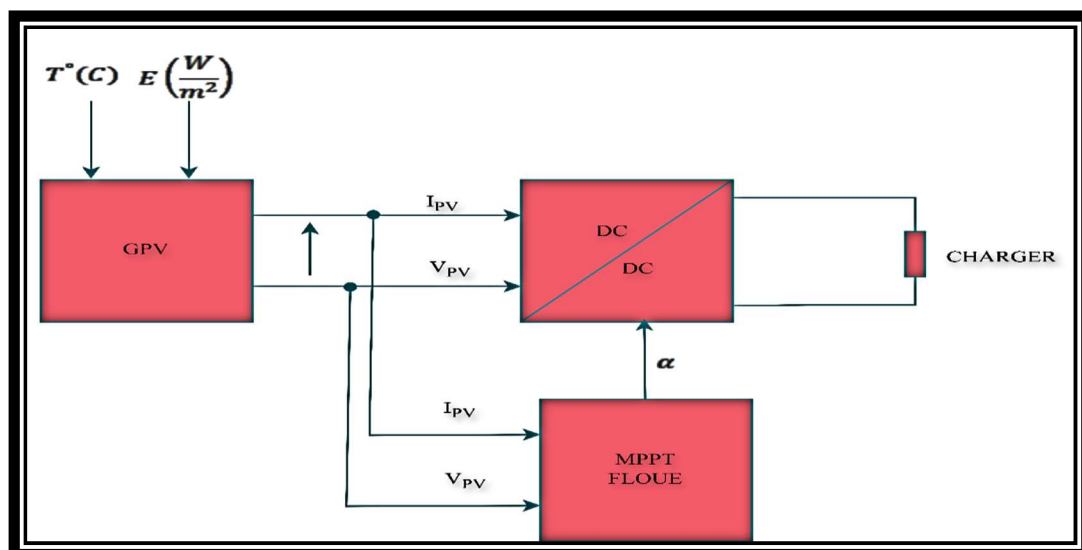


Figure IV.6: Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque basé sur la logique floue

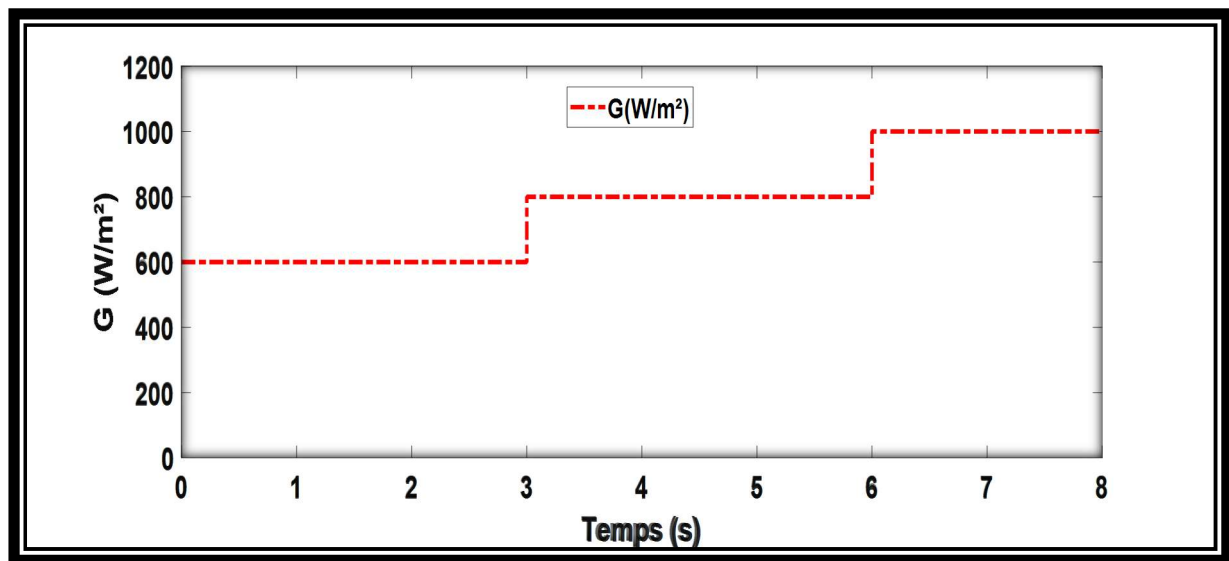


Figure IV.7: Les variations de l'éclairement solaire au fil du temps

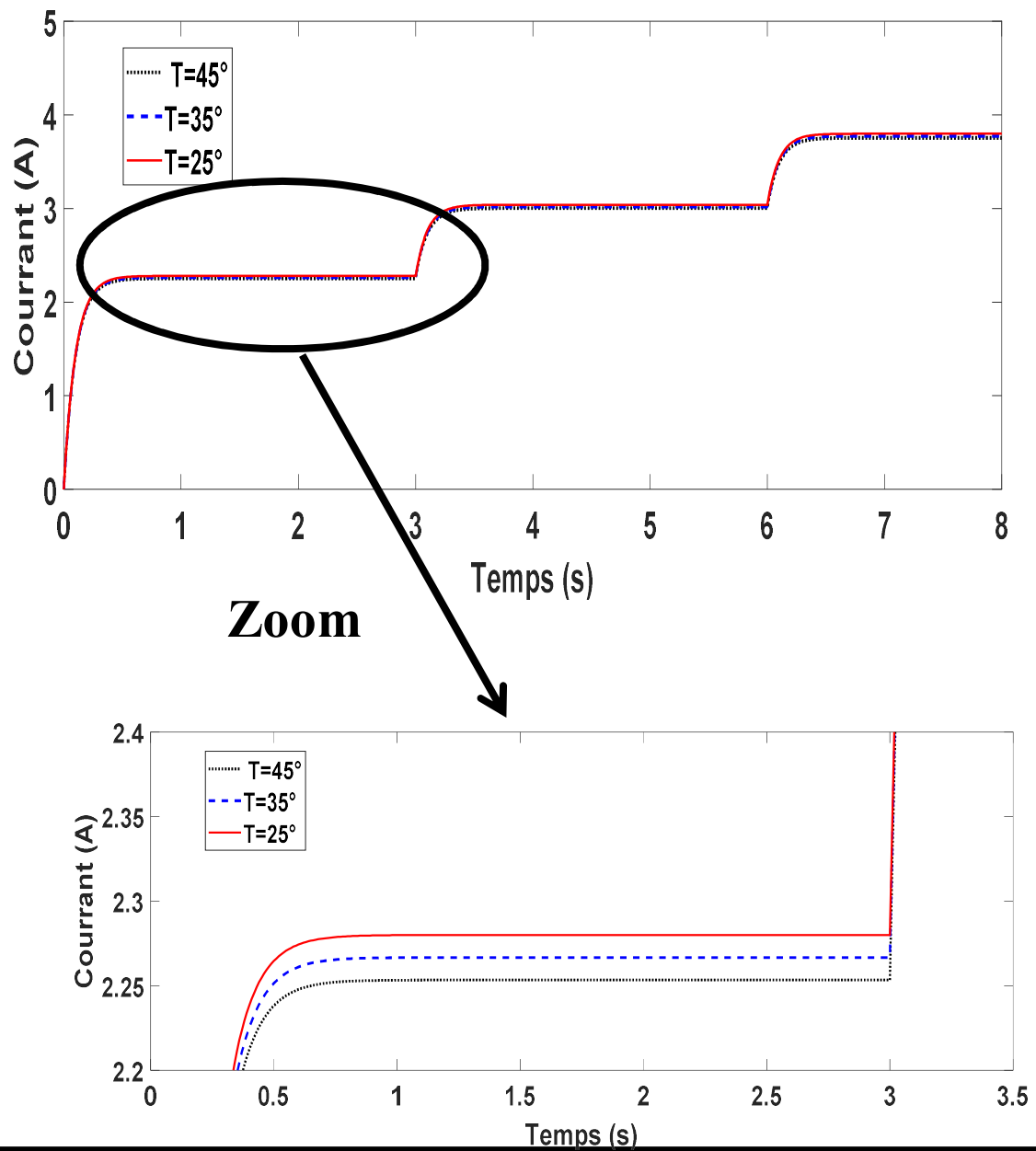


Figure IV.8: Variation du courant en fonction de temps du PV pour un changement de L'éclairement

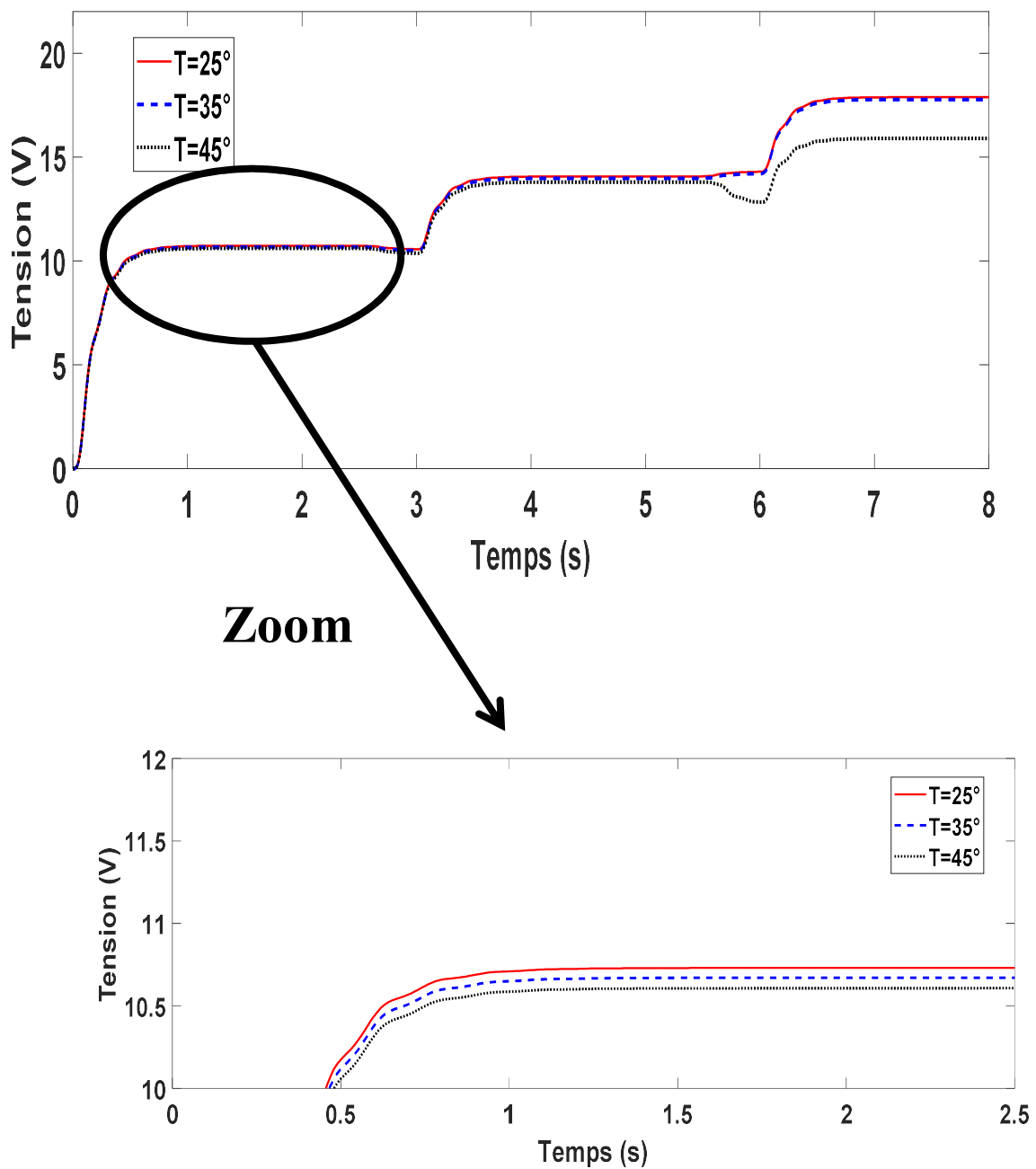


Figure IV.9: Variation de tension avec le temps du PV pour un changement de
L'éclairement

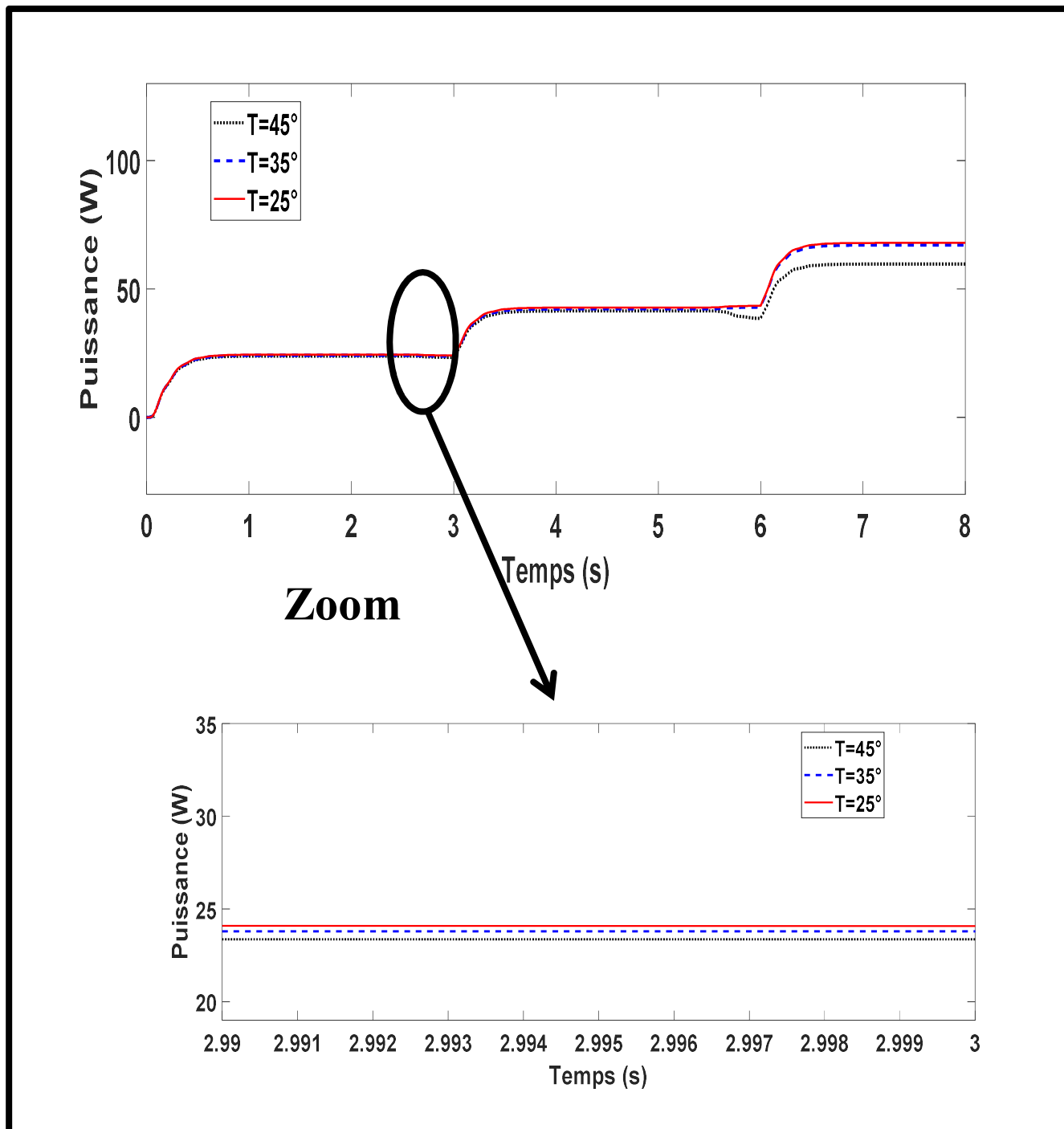


Figure IV. 10: Variation de puissance instantanée avec le temps du PV pour un
Changement l'éclairement

Commentaire et interprétation

Le processus de contrôle de l'erreur (E) et de sa variation (ΔE) repose sur des fonctions d'appartenance classées en sept catégories, comme illustré dans la (figure III.5). La base de règles de contrôle a été construite à partir de la matrice de règles présentée dans le (tableau III.1). La (figure IV.7) représente les variations de l'irradiance solaire au fil du temps, tandis que la (figure IV.8) montre la réponse du courant de sortie du système photovoltaïque à ces variations. Lorsque le système est exposé à une irradiance solaire de 600 W/m^2 , le courant atteint $2,2 \text{ A}$ durant une phase transitoire d'environ $0,5$ seconde. Avec une augmentation de l'irradiance à 800 W/m^2 , le système ajuste automatiquement le courant de sortie à une nouvelle valeur optimale, atteignant 3 A . Lorsque l'irradiance augmente de nouveau à 1000 W/m^2 , le système réagit rapidement en modifiant le courant à $3,5 \text{ A}$ en seulement $0,2$ seconde, et ce, dans des conditions de température différentes.

Ces résultats soulignent l'importance de réduire le temps de transition vers l'état stable afin d'améliorer l'efficacité du système photovoltaïque. La (figure IV.9) illustre la réponse de la tension du système aux variations de l'irradiance solaire, suivant un comportement similaire à celui du courant. Le contrôleur basé sur la logique floue a montré une capacité d'adaptation rapide pour atteindre les valeurs optimales de tension : 18 V à 1000 W/m^2 , 16 V à 800 W/m^2 et 11 V à 600 W/m^2 .

La (figure IV. 10) présente l'évolution de la puissance instantanée du système photovoltaïque sous différentes conditions d'irradiance. Une puissance maximale d'environ 60 W a été enregistrée à 1000 W/m^2 , 40 W à 800 W/m^2 et 20 W à 600 W/m^2 . Ces résultats démontrent l'efficacité du contrôleur à logique floue dans le suivi du point de puissance maximale (MPPT) sous des conditions d'irradiance variables.

IV.7. Conclusion

À la fin de ce travail, l'efficacité du modèle proposé pour le système photovoltaïque, qui intègre le générateur solaire, le convertisseur et l'algorithme MPPT, a été démontrée. Grâce à la simulation réalisée avec SIMULINK, la validité des modèles mathématiques et la précision des performances ont été confirmées.

Les résultats ont montré que l'algorithme MPPT utilisé est capable de diriger le système vers le point de puissance maximale globale, même en présence d'ombrage partiel, grâce à un contrôle optimal via le rapport cyclique (D_{opt_g}). Cela confirme son efficacité dans l'amélioration de l'exploitation de l'énergie solaire et l'augmentation du rendement du système photovoltaïque.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons présenté une étude méthodique et approfondie sur la modélisation et le contrôle d'un système photovoltaïque, en mettant l'accent sur l'amélioration des performances de ce type de système sous l'influence de différentes conditions environnementales.

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les composants du système photovoltaïque ainsi que ses classifications, en clarifiant les différences entre les systèmes autonomes et ceux connectés au réseau électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons traité la modélisation des éléments fondamentaux du système, notamment la cellule photovoltaïque, et analysé l'impact du rayonnement solaire et de la température sur ses performances. Nous avons également étudié et analysé trois types de convertisseurs électriques : 'Buck', 'BOOST' et 'Buck-Boos', en mettant en lumière le rôle de chacun dans l'amélioration de l'efficacité de la conversion énergétique au sein du système.

Par la suite, nous avons appliqué deux techniques différentes pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT), à savoir : la logique floue (Fuzzy Logic) et l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO – Particle Swarm Optimization), chaque technique ayant été simulée sous des conditions variables d'irradiation et de température.

Les résultats des simulations ont révélé ce qui suit :

- Les performances du système photovoltaïque sont fortement influencées par les variations soudaines de l'irradiation solaire et de la température.
- La puissance électrique augmente avec l'intensité du rayonnement solaire, tandis qu'elle diminue avec l'élévation de la température, en raison de la baisse de l'efficacité des cellules et de la diminution de la tension générée.
- L'algorithme PSO a démontré une supériorité claire par rapport aux méthodes traditionnelles, notamment en cas d'ombrage partiel, où il a réussi à identifier avec précision le point de puissance maximale global.
- Le système de contrôle basé sur la logique floue s'est distingué par sa rapidité de réponse et son efficacité face aux variations d'irradiation, grâce à un ajustement rapide

CONCLUSION GENERALE

de la tension et du courant pour atteindre des performances optimales, particulièrement dans des conditions d'ensoleillement stable.

En conclusion, cette étude confirme que les deux approches "PSO" et "logique floue" constituent des outils efficaces pour améliorer les performances des systèmes photovoltaïques, que ce soit en présence d'un rayonnement constant ou sous l'effet d'un ombrage partiel, chaque méthode pouvant être choisie en fonction de la nature de l'application et des conditions environnementales.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] BOUCHAMA Messaoud , LAOUAR Mohammed Islam ; Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques (2018) ; (Mémoire de Master; Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel)
- [2] SAAD Mohamed, KARBI Ismail ; Commandes non-linéaire d'un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique (2023) ; (Mémoire de Master ; UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA)
- [3] Gamour Hamida; Dimensionnement et optimisation techno-économique d'un system photovoltaïque pour alimenter un lieu religieux par la méthode PSO et RETScreen (2021) ; (Mémoire de Master; UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA)
- [4] <https://www.leguideduchauffage.com/photovoltaique-sur-reseau/> (4 -6 -2025)
- [5] Salmi Ahmed ; Commande avancée d'un système photovoltaïque (2023) ; (Mémoire de Master; UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA)
- [6] <https://www.solaris-store.com/content/42-principe-de-fonctionnement-panneau-solaire> (4 -6 -2025)
- [7] BENOTMANE YASSINE ; Commande MPPT à base de la logique floue appliquée à un Système Photovoltaïque (2020) ; (Mémoire de Master ; Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen)
- [8] TATI Fethallah, BEN LAMOUDI Oussama ; Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue (2018) ; (Mémoire de Master; UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA)

- [9] Slimani Houssam Eddine ; Saou-seif Eddine; Application de la méthode d'optimisation PSO pour le réglage de la commande PID d'un robot mobile Omnidirectionnel (2024) ; (Mémoire de Magister; UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI (OUM EL BOUAGHI))
- [10] rodot, m.La conversion de l'energie solaire en energie electrique par les semi-conducteurs: thermopiles et photopiles ; (1976).
- [11] sofia, belaid lalouni. ;Cours énergie solaire photovoltaïque. (2015). (Université a. Mira de bejaia).
- [12]. Mr. HAFFAF Ahmed Mr. MERZOUGUI Hakim ; Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant PSO (2020) ; (Mémoire Master ; Université Djilali Bounaama Khemis Miliana)
- [13] HELALI KAMELIA Modélisation ; D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative . (2012) ; (Mémoire MAGISTER ; TIZI-OUZOU)
- [14] BENREDJEM SAMI, Djeroud Ines. Effet des Différents Types de Modèle sur les Caractéristiques de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque. (2021).
- [15]. http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/5277/1/Etude_theorique_des_cellules_solaires_PV_or_organiques_structure_reseau_interpenetre_polymere_conjuge_fullerene_et_cellules_Graetzel.pdf (4 -6 -2025)
- [16]. GUENIF NOUR AL ISLAM / CHERFI HOUSSEM EDDINE MOURAD ; Étude et simulation d'un système photovoltaïque (2021) ; (Mémoire Licence ; ANNABA)
- [17]. https://www.ummtto.dz/dspace/bitstream/handle/ummtto/8855/DjiliCelia_FarebK_arma.pdf?sequence=1 (4 -6 -2025)

- [18]. https://www.researchgate.net/figure/Figure-2-6-Schema-de-3-cellules-photovoltaiques-associees-en-parallele_fig9_356172065 (4 -6 -2025)
- [19]. FERRAH fateh ; Etude et simulation d'un étage MPPT Pour un système à énergie renouvelable . (2013) ; (Mémoire MASTER ; OUM EL BOUAGHI)
- [20] . BENOTMANE YASSINE ; Commande MPPT à base de la logique floue appliquée à un Système Photovoltaïque (2020) ; (Mémoire de Magister; Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen)
- [21]
- https://www.researchgate.net/figure/Chaine-elementaire-de-conversion-PV-associee-a-une-commande-MPPT-13_fig16_311509207 (4 -6 -2025)
- [22] . Mordjaoui Mourad ; MODELISATION DES EFFETS ELECTROMAGNETIQUES « Apport de la logique floue et neuro-floue » (2008) ; (DOCTEUR EN SCIENCE ; L'UNIVERSITE DE BATNA)
- [23] BELMELLAT Salim ; BEDJGUELEL Cilya ; Commande par logique floue appliquée à la gestion d'un système hybride. (2023) ; (Mémoire de Master ; Université A.Mira de Béjaia)
- [24] HIZI NADIR ; DJABOREBBI TAKY-EDDINE; Etude comparative des commandes MPPT pour les systèmes photovoltaïques (2022) ; (Mémoire de Master ; UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA)
- [25] Lahmar oussama ; Djeddi seif eddine ; Etude comparative entre la commande par logique floue Et régulateur PI d'un MCC (2019) ; (Mémoire de Master ; UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA)

[26]. Youcef Bekakra ; Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation (2014) ; (thèse de Doctorat en sciences, université de Biskra).

[27]. J. Kennedy, R. Eberhart, «Particle swarm optimization», Proc. of IEEE International Conf. on Neural Networks, pp. 1942-1948, 1995.

[28]. C. Blum, D. Merkle, «Swarm intelligence, introduction and applications», (2008) Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[29] ZAGHBA Layachi ; Etude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques (2017) ; (thèse de Doctorat en sciences; Université Mohamed Khider – Biskra)

[30]

https://www.researchgate.net/figure/Figure-31-Deplacement-dune-particule_fig5_350291153 (4 - 6 -2025)

[31] Cooren, Y ; Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'optimisation par Essaim Particulaire Applications en génie médical et en électronique (2008) . (Thèse de doctorat, Université de Paris 12 Val de Marne, Paris).

[32] ELARBI RABAH SOFIANE;Règlage optimal de la commande PID fractionnaire par PSO (2022) ; (Mémoire de Master ; Université Blida 1)

[33] R. EBERHART et Y. Shi, «Comparing inertial weights and constriction factor in particle swarm optimization», Proceeding of the International Congress on Evaluationing Computation, San Diego, California, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, pp. 84 88, 2000.

- [34] CHALANE Idir,OUARI Tarek; Optimisation des paramètres d'un PID par essaims particulaires(PSO). (2017) ; (Mémoire de Master ; Université A. MIRA de Bejaia)
- [35] M.T Huynh ; Application de l'Optimisation par Essaim Particulaire à la représentation de matrice de préférence valuées (2009) ; (Université Libre De Bruxelles).
- [36] R Mansouri ; Contribution a l'analyse et la synthèse des systèmes d'ordre fractionnaire par la représentation d'état (2008) ; (thèse de Doctorat en Electrotechnique UMMTO).
- [37] R Qi, B Hu, P.H Cournede « PSOTS: A Particle Swarm Optimization Toolbox in Scilab » 978_1_4244_4453_3/09/2009 IEEE.
- [38] BELOUFA NAIMA ; ARDJANI IKRAM; Modélisation d'un contrôleur PI-PSO pour la régulation de la vitesse d'un moteur asynchrone (2020) ; (Mémoire de Master ; Université Dr. Tahar Moulay de Saïda)