

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

## Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

### Thème

**Optimisation intelligentes d'un système photovoltaïque**

**Préparé par :**

- KEBANE Kahina
- AMIR Naima

**Dirigé par:**

Mme. OUALI. Kahina  
M. KHIREDINE Abdelkrim

**Examiné par:**

Mme. IDJDARENE  
M. TAFININE

**Année universitaire : 2023/2024**

## Dédicace

*À ma chère mère, Karima,*

*Ce travail t'est dédié. Ton amour, ton soutien et tes sacrifices ont guidé chacun de mes pas. Ta force et ta sagesse m'inspirent à chaque étape de ma vie. Je te dois tout ce que je suis aujourd'hui. Merci pour tout, Maman.*

*À mon cher père, M. Tayeb,*

*Ce travail t'est également dédié. Ta patience, tes conseils avisés et ton soutien constant ont été des piliers dans ma vie. Ta détermination et ta générosité m'ont toujours inspirée. Je te suis infiniment reconnaissante pour tout ce que tu as fait pour moi.*

*Merci, Papa.*

*À mes sœurs et frère, Massi, Tinehinane et Thilelli,*

*Votre tendresse, votre soutien indéfectible et votre amour inconditionnel m'ont insufflé la force de persévérer et de réussir. Je vous suis profondément reconnaissante pour votre présence précieuse dans ma vie.*

*À mes chers amis, Radia, Oussama, Houda, Werda, Biba, Rosa..*

*Votre soutien, vos encouragements et votre aide m'ont portée dans les moments les plus difficiles. Je vous en serai éternellement reconnaissante.*

*À vous tous, merci pour votre soutien et votre amour inconditionnel. Ce travail de recherche vous est dédié, avec tout mon amour et ma gratitude éternelle.*

**Kahina...**

## Dédicace

*Je dédie ce travail à mes parents. Leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants ont été une source inépuisable de motivation et de force. Merci de croire en moi, de m'avoir soutenue dans les moments de doute, et d'avoir toujours été présents à mes côtés. Votre patience, vos sacrifices et vos précieux conseils m'ont permis de surmonter les défis et d'atteindre cet objectif important.*

*À mes frères et sœurs, merci pour votre solidarité, votre soutien moral et vos encouragements. Vos paroles réconfortantes et votre amour ont été des piliers essentiels tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation.*

*Je dédie ma sincère gratitude à toutes mes amies et à tous les étudiants de ma promotion pour leur soutien et leur amitié précieux tout au long de notre parcours académique.*

**Naima.**

## Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu pour nous avoir accordé la sagesse, la patience et la détermination nécessaires à la réalisation de ce mémoire. Sa présence constante et ses bénédictions nous ont soutenus dans les moments les plus difficiles.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre directrice de recherche, Madame OUALI Kahina, pour sa précieuse supervision, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce mémoire. Sa patience, sa disponibilité et son expertise ont été essentielles pour mener à bien ce projet. Merci pour votre encouragement et votre confiance en nos capacités.*

*Nous remercions également notre Co-encadrant, Monsieur KHIRDINE Abdelkrim, pour son accompagnement, ses suggestions pertinentes et son aide précieuse. Son soutien et ses conseils ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier l'ensemble des enseignants et des membres du département ATE pour leurs enseignements de qualité et leur soutien tout au long de notre cursus.*

*Enfin, nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail. Leur expertise, leurs observations et leurs recommandations seront inestimables pour l'amélioration de notre recherche. Merci pour le temps et l'attention que vous avez consacrés à la lecture et à l'évaluation de notre mémoire.*

## ***Table de matière:***

Table de matière: .....	iii
Liste de figures: .....	vi
Liste des tableaux: .....	viii
Introduction générale : .....	1
Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque .....	2
I.1 Introduction .....	3
I.2 Rayonnement solaire : .....	3
I.3 La conversion photovoltaïque : .....	4
I.3.1 L'effet photovoltaïque.....	4
I.3.2 Cellules photovoltaïques .....	4
I.3.3 Technologie de fabrication des cellules solaires .....	5
I.3.3.1 Cellules monocristallines.....	5
I.3.3.2 Cellules poly cristallines.....	6
I.3.3.3 Cellules à couches minces .....	6
I.3.3.4 Cellules à base des composés III-V .....	7
I.3.3.5 Cellules à base des nitrures.....	7
I.3.4 Circuit électrique équivalent de la cellule PV .....	8
I.3.5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque .....	9
I.3.5.1 Courant de court-circuit, $I_{cc}$ : .....	9
I.3.5.2 Tension de circuit ouvert, $V_{co}$ : .....	9
I.3.5.3 Point de puissance maximale PM : .....	9
I.3.5.4 Facteur de forme, FF : .....	10
I.3.5.5 Le rendement de conversion ( $\eta$ ) .....	10
I.3.6 Paramètres influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	10
I.3.6.1 Influence de l'éclairement .....	10
I.3.6.2 Influence de la température .....	12
I.4 Panneau photovoltaïque.....	13
I.4.1 Association en série.....	13
I.4.2 Association parallèle .....	14
I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	15
I.5.1 Avantages .....	15
I.5.2 Inconvénients .....	15
I.6 Conclusion.....	16

Chapitre II : Etat de l'art d'une commande MPPT .....	17
II.1 Introduction .....	18
II.2 Les différentes chaînes de conversion photovoltaïque et leurs évolutions.....	18
II.2.1 Connexion directe source-charge .....	18
II.2.2 Convertisseur Boost .....	21
II.2.3 Convertisseur Buck .....	23
II.2.4 Convertisseur Buck-Boost.....	24
II.2.5 Convertisseur Cuk .....	25
II.2.6 Convertisseur Sepic.....	26
II.3 Comparaison des différents convertisseurs DC-DC .....	27
II.4 La commande MPPT .....	28
II.4.1 Principe de fonctionnement du MPPT .....	28
II.4.2 Les algorithmes de la commande MPPT.....	29
II.4.2.1 Algorithme Perturber et Observer (P&O).....	29
II.4.2.2 MPPT à base de réseaux de neurones artificiels .....	31
II.4.2.3 MPPT à base de logique floue (FL).....	34
II.5 Conclusion.....	35
Chapitre III : Simulation Des Méthodes MPPT Pour Système Photovoltaïque.....	37
III.1 Introduction .....	38
III.2 Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque .....	38
III.2.1 Simulation d'un convertisseur DC-DC (BOOST) .....	39
III.2.2 Simulation du panneau Photovoltaïque.....	40
III.2.2.1 Influence de la température et de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque.....	41
III.2.3 Simulation du système photovoltaïque avec des algorithmes de commande MPPT	42
III.2.3.1 Simulation avec la Méthode Perturb and Observe (P&O).....	43
III.2.3.1.1 Résultats de simulation sous les conditions environnementales constantes	43
III.2.3.1.2 Résultats de simulation sous des conditions environnementales variables	45
III.2.3.1.3 Analyse et Synthèse des Résultats de la Méthode P&O .....	48
III.2.3.2 Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT basée sur ANN (Artificial Neural Network) .....	49
III.2.3.2.1 Résultats de simulation sous les conditions environnementales constantes	51

III.2.3.2.2	Résultats de simulation sous des conditions environnementales variables	52
III.2.3.3	Simulation du Système Photovoltaïque avec la Commande MPPT Basée sur la Logique Floue.....	56
III.2.3.3.1	Fonctions d'Appartenance des Variables d'Entrée et de Sortie .....	57
III.2.3.3.2	Résultats de simulation sous les conditions environnementales constantes	58
III.2.3.3.3	Résultats de simulation sous des Conditions Environnementales Variables	59
III.2.3.4	Comparaison des Méthodes MPPT.....	63
III.2.3.4.1	Résultats de Simulation et Analyse des Résultats.....	64
III.3	Conclusion.....	65
	Conclusion générale .....	66
	Bibliographie :.....	68
	Résumé:.....	71
	ABSTRACT:.....	71
	:ملخص.....	71

## **Liste de figures:**

Figure 1: Spectre d'irradiance solaire [1].	4
Figure 2: principe de la conversion photovoltaïque	5
Figure 3: cellule photovoltaïque monocristalline	6
Figure 4 : Cellule photovoltaïque poly cristalline	6
Figure 5 : Cellule photovoltaïque amorphe à couche mince.	7
Figure 6: Modèle électrique d'une cellule solaire photovoltaïque	8
Figure 7: Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire photovoltaïque	9
Figure 8: Influence d'éclairement sur la caractéristique courant tension (I-V).	11
Figure 9: Influence d'éclairement sur la caractéristique puissance tension (P-V).	11
Figure 10: Influence de température sur la caractéristique (P-V).	12
Figure 11: Influence de température sur la caractéristique (I-V).	12
Figure 12: Panneau solaire photovoltaïque.	13
Figure 13: Association de $N_s$ cellules en série.	14
Figure 14: Association de $N_p$ cellules en parallèle.	14
Figure 15: Schéma de Connexion directe GPV-Charge par une diode anti-retour.	19
Figure 16: Le point de fonctionnement d'un générateur PV en fonction de la charge en connexion directe.	20
Figure 17: Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge.	20
Figure 18: Convertisseur Boost et ses formes d'ondes des courants et tensions [20].	21
Figure 19: Circuit équivalent du Boost quand K est fermé.	22
Figure 20: Circuit de Boost quand K est ouvert.	22
Figure 21: Formes d'ondes du convertisseur Buck (courants à gauche, tension à droite). [20].	24
Figure 22: Convertisseurs Buck et ses formes d'ondes des courants et tensions [21].	25
Figure 23: Schéma de base d'un convertisseur Cuk. [20]	26
Figure 24: Schéma de base d'un convertisseur SEPIC.	26
Figure 25: Schéma du principe de la méthode P&O [27].	29
Figure 26: Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O). [30]	30
Figure 27: La structure d'un neurone artificiel.	31
Figure 28: Organigramme du principe du fonctionnement de la commande neuronale.	33
Figure 29: Structure de base du contrôleur flou.	35
Figure 30: chaîne de conversion d'énergie solaire.	38
Figure 31: Schéma de simulation d'un convertisseur DC-DC (BOOST).	39
Figure 32: Tension d'Entrée et de Sortie du Convertisseur BOOST.	39
Figure 33: Variation de la caractéristique puissance-tension du panneau photovoltaïque à une température constante de 25°C pour différents niveaux d'éclairement.	41
Figure 34: Variation de la caractéristique puissance/tension du panneau photovoltaïque pour différentes températures avec un éclairement constant de 1000 W/m <sup>2</sup> .	42
Figure 35: Schéma de simulation du système photovoltaïque adapté par la méthode (P&O) pour la commande MPPT.	43
Figure 36: La température et l'éclairement constant en fonction du temps.	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 37: La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps (Méthode P&O).	44
Figure 38: Puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du Temps (Méthode P&O).	44
Figure 39: La variation de l'éclairement en fonction du temps.	45
Figure 40: La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps (Méthode P&O).	46
Figure 41: Puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du Temps (Méthode P&O).	46
Figure 42: La variation de la température en fonction du temps.	47
Figure 43: La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps.	47
Figure 44: Puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du Temps.	48
Figure 45: Schéma de simulation de sous-système ANN.	50
Figure 46: Schéma de simulation du système photovoltaïque adapté par la méthode ANN pour la commande MPPT.	50



<i>Figure 47:La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps .....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 48: Puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du Temps .....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 49:La variation de l'éclairement en fonction du temps. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 50:La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 51: Puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du Temps .....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 52:La variation de la température en fonction du temps. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 53:La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 54:La puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 56: Schéma de simulation du système photovoltaïque adapté par la méthode la logique floue pour la commande MPPT.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 55:Le schéma Simulation de sous-système FLC.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 57:Fonctions d'Appartenance des Variables d'Entrée et de Sortie pour la Méthode MPPT Basée sur la Logique Floue. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 58:La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en Fonction du Temps. ....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 59:La puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en Fonction du Temps. ....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 60:La variation de l'éclairement en fonction du temps. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 61:La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en Fonction du Temps. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 62:La puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en Fonction du Temps. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 63:La variation de la température en fonction du temps. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 64:La puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en Fonction du Temps. ....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 65:La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en Fonction du Temps. ....</i>	<i>62</i>

## ***Liste des tableaux:***

<i>Tableau 1 : Les gains statiques des différents convertisseurs DC/DC.....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 2: Les paramètres du panneau photovoltaïque. ....</i>	<i>40</i>



## ***Introduction générale :***

L'augmentation exponentielle de la demande énergétique mondiale, couplée aux préoccupations environnementales croissantes liées à l'épuisement des combustibles fossiles, a incité la communauté scientifique et industrielle à intensifier leurs efforts pour trouver des alternatives durables. Parmi ces alternatives, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) émerge comme une solution de premier plan grâce à son potentiel quasi illimité et sa capacité à générer une électricité propre et renouvelable.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule photovoltaïque. L'association de plusieurs cellules en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Pour maximiser l'efficacité et la rentabilité des systèmes photovoltaïques, il est essentiel de surmonter les défis techniques liés à la conversion optimale de l'énergie solaire en électricité utilisable.

L'objectif de ce mémoire est de contribuer à cette optimisation en explorant les techniques avancées de suivi du point de puissance maximale (MPPT), indispensables pour garantir que les systèmes PV opèrent à leur rendement optimal en toutes conditions.

Notre mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre offre un cadre théorique complet sur l'énergie photovoltaïque, détaillant les principes de base, les technologies de cellules solaires, ainsi que les facteurs influençant leur efficacité.

Le second chapitre est dédié aux méthodes MPPT, fournissant une description détaillée des réseaux de neurones, de la logique floue et de la méthode P&O, et analysant leurs mécanismes de fonctionnement, avantages et inconvénients.

Dans le troisième chapitre présente la simulation de ces méthodes sur MATLAB Simulink, permettant une évaluation comparative basée sur des critères de performance clés tels que la rapidité de convergence, la précision du suivi et la robustesse face aux variations environnementales. Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre travail.

# **Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque**

### 1.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs de la lumière.

L'objectif de ce chapitre est d'aborder les principes de l'énergie solaire photovoltaïque. Dans un premier temps, nous examinerons l'origine de l'énergie solaire photovoltaïque, puis nous focaliserons sur les cellules photovoltaïques, les panneaux photovoltaïques, ainsi que les éléments qui influencent le rendement de ces systèmes photovoltaïques. Finalement, nous analyserons les bénéfices et les inconvénients de cette technologie durable.

### 1.2 Rayonnement solaire :

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/ m<sup>2</sup>. Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/ m<sup>2</sup> à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons.

L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

h : la constante de Planck (J.S)

C : la vitesse de la lumière, (m/S)

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (1.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique Figure 1 compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns mètre. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm),

47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm),

44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm).

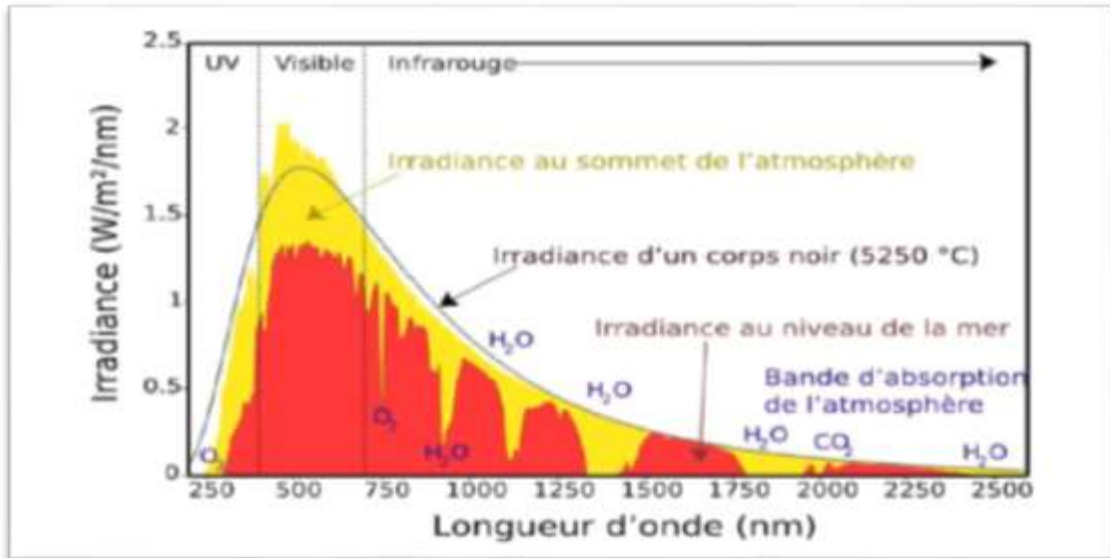


Figure 1: Spectre d'irradiance solaire [1].

### I.3 La conversion photovoltaïque :

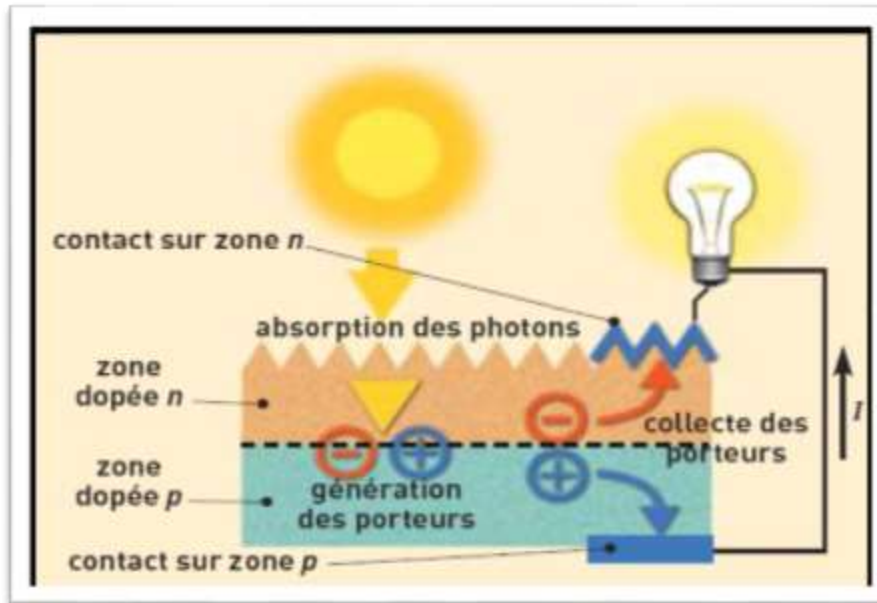
#### I.3.1 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique qui a été découvert en 1939 par Edmond Becquerel. Lorsqu'un photon frappe le matériau semi-conducteur, il arrache un électron à la surface, créant ainsi un courant électrique.

Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, pouvant alimenter des appareils ou recharger des batteries.

#### I.3.2 Cellules photovoltaïques

L'utilisation de l'effet photovoltaïque dans les cellules solaires permet de transformer directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité, en produisant et en transportant des charges électriques positives et négatives dans un matériau semi-conducteur, sous l'influence de la lumière. Il y a deux parties dans cette cellule : l'une avec un excès d'électrons et l'autre avec un déficit d'électrons, appelées respectivement dopée de type n et dopée de type p. En contactant la première avec la seconde, les électrons en surplus présents dans le matériau n se propagent dans le matériau p. La zone dopée initialement n devient positivement chargée, tandis que la zone dopée initialement p est négativement chargée.



**Figure 2: principe de la conversion photovoltaïque**

Ainsi, un champ électrique se forme entre elles, qui cherche à repousser les électrons vers la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (appelée p-n) a été créée. On obtient une diode en ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p. Quand la jonction est éclairée, les photons d'une énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite transmettent leur énergie aux atomes, chacun faisant passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. En appliquant une charge aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n se connectent aux trous de la zone p par le biais de la connexion extérieure, ce qui entraîne une variation de potentiel. [2]

### **I.3.3 Technologie de fabrication des cellules solaires**

#### **I.3.3.1 Cellules monocristallines**

Le silicium fondu, utilisé pour fabriquer des cellules photovoltaïques monocristallines, se solidifie en un seul cristal de grande taille qui est ensuite découpé en fines tranches, appelées "wafers", généralement de couleur bleue homogène. Ces cellules présentent plusieurs avantages, notamment un excellent rendement d'environ  $150 \text{ Wc/m}^2$  et une longue durée de vie de près de 30 ans, ce qui les rend très performantes et durables. Toutefois, elles ont des inconvénients, comme un coût de fabrication élevé et une performance réduite en cas d'éclairage limité, ce qui peut affecter leur efficacité dans des environnements peu ensoleillés. [3]





Figure 3: cellule photovoltaïque monocristalline

### 1.3.3.2 Cellules poly cristallines

Lors du refroidissement du silicium pour la fabrication de cellules photovoltaïques poly cristallines, plusieurs cristaux se forment, donnant aux cellules une couleur bleue marbrée avec des motifs distincts liés à la disposition des cristaux. Ces cellules offrent un rendement satisfaisant, d'environ  $100 \text{ Wc/m}^2$ , une longue durée de vie de près de 30 ans, et sont plus abordables que les cellules monocristallines. Cependant, leur principal inconvénient réside dans leur faible performance en conditions de faible éclairage, ce qui limite leur efficacité dans des environnements peu ensoleillés.[3]

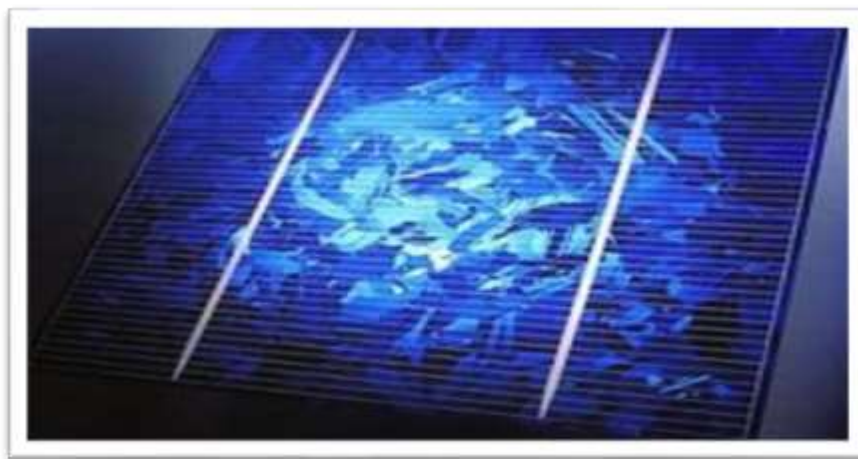


Figure 4 : Cellule photovoltaïque poly cristalline

### 1.3.3.3 Cellules à couches minces

Les cellules photovoltaïques à couches minces sont fabriquées en projetant un gaz de silicium sur une feuille de verre, ce qui leur confère une couleur gris foncé ou marron. Utilisées

couramment dans les calculatrices et montres solaires, elles ont un rendement modéré en faible luminosité. Parmi leurs avantages, elles fonctionnent bien avec une faible luminosité, sont plus abordables que les autres types de cellules et sont moins sensibles aux températures élevées. Cependant, leur durée de vie est courte, environ 10 ans, avec une dégradation progressive des performances, et leur efficacité en plein soleil est faible (environ  $60 \text{ Wc/m}^2$ ), nécessitant de couvrir de plus grandes surfaces pour générer la même quantité d'énergie que les cellules en silicium cristallin. [3]



**Figure 5 : Cellule photovoltaïque amorphe à couche mince.**

### **1.3.3.4 Cellules à base des composés III-V**

Les cellules photovoltaïques à base de composés III-V, comme le GaAs (Arséniure de Gallium) et l'InP (Phosphure d'Indium), sont conçues pour maximiser le rendement en réduisant les pertes liées à l'absorption incomplète des photons et aux pertes thermiques. Ces matériaux ont un gap direct et une valeur proche de l'optimum, ce qui les rend plus efficaces que le silicium. Bien que leur coût élevé limite leur utilisation sur Terre, elles sont idéales pour les applications spatiales, où leur résistance aux rayonnements cosmiques et aux températures élevées en orbite en fait une solution optimale. [4]

### **1.3.3.5 Cellules à base des nitrures**

Les cellules solaires à base de nitrures d'éléments III, tels que le GaN (Nitrure de Gallium), l'AlN (Nitrure d'Aluminium) et l'InN (Nitrure d'Indium), tirent parti de leurs propriétés semi-conductrices et réfractaires, ce qui les rend adaptées à des environnements extrêmes, comme les hautes températures et les fortes puissances. Grâce à leurs gaps directs

couvrant tout le spectre visible et au-delà, ces matériaux sont également utilisés en optoélectronique. Récemment, les nitrures sont exploités pour développer des cellules solaires très efficaces, offrant de nouvelles perspectives dans les technologies solaires. [5]

### I.3.4 Circuit électrique équivalent de la cellule PV

Plusieurs modèles électriques sont utilisés pour modéliser les cellules photovoltaïques. Le modèle le plus simple d'une cellule PV est le modèle électrique à une diode illustrée dans la figure I. Ce modèle consiste en une source de courant ( $I_{ph}$ ), une diode (D), une résistance série ( $R_s$ ), et d'une résistance parallèle ( $R_p$ ) [6].

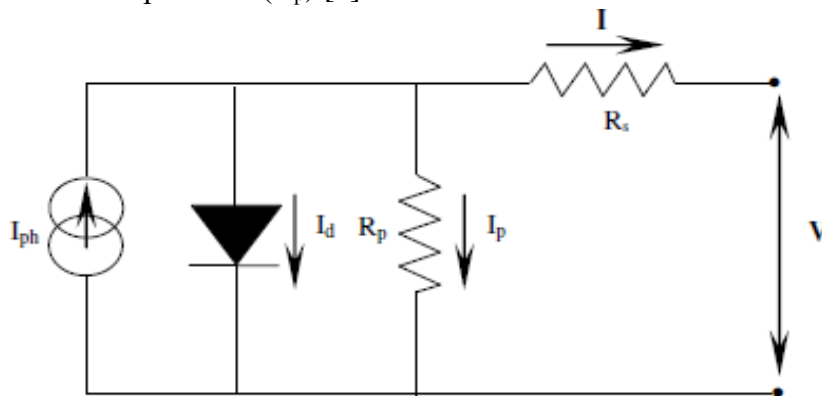


Figure 6: Modèle électrique d'une cellule solaire photovoltaïque

Le courant de sortie fourni par la cellule solaire est obtenu par l'application de la loi de Kirchhoff, dans le circuit équivalent ci-dessus.

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.3)$$

D'où:

$$I_d = I_s (e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1) \quad (I.4)$$

$$I_p = \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (I.5)$$

Avec :

$I_d$  : Courant traversant la diode.

$I_p$ : Le courant délivré par la résistance parallèle.

A partir de ces équations nous pouvons en déduire l'expression du courant délivré par la cellule photovoltaïque :

$$I = I_{ph} - I_s (e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (I.6)$$

I : le courant de la cellule PV.

V: la tension de la cellule PV.

q : Charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$ ).

n : Facteur d'idéalité de la jonction comprise entre 1 et 2.

k : Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  j/K).

T: est la température de la cellule PV en Kelvin ( $K^\circ$ ).

### I.3.5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule peut être représenté par la courbe  $I=f(V)$ , qui indique l'évolution du courant généré par la cellule photovoltaïque en fonction de la tension à ces bornes depuis le court-circuit, jusqu'au circuit ouvert.

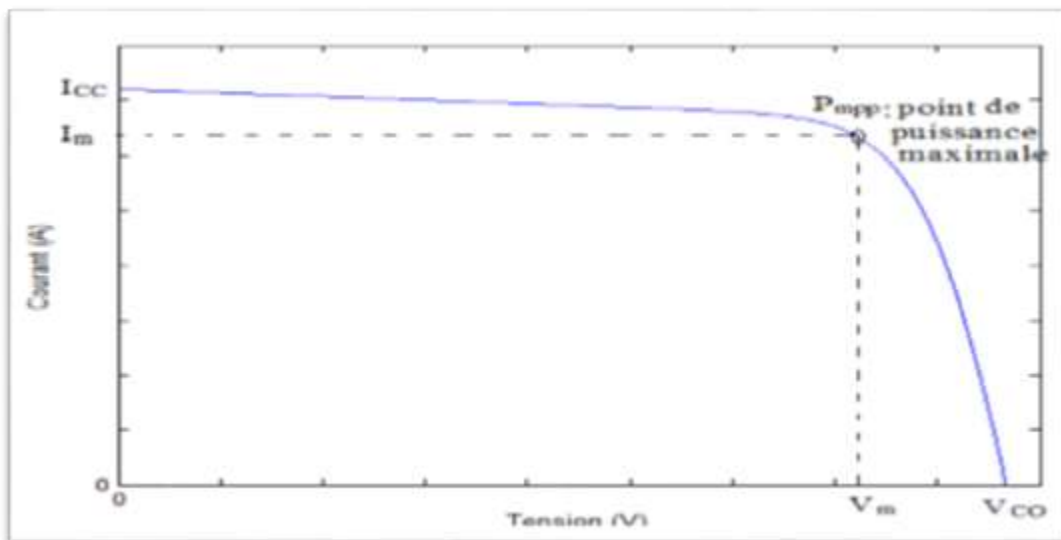


Figure 7: Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire photovoltaïque.

D'après la caractéristique courant-tension, il est possible de déduire les paramètres électriques de la cellule :

#### 1.3.5.1 Courant de court-circuit, $I_{cc}$ :

Il s'agit du courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle.

#### 1.3.5.2 Tension de circuit ouvert, $V_{co}$ :

La tension à circuit ouvert correspondant à la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.

#### 1.3.5.3 Point de puissance maximale PM :

La région de la courbe caractéristique comprise entre  $I_{cc}$  et  $V_{co}$  correspond au fonctionnement de la cellule comme générateur. Son utilisation optimale consiste à faire

fonctionner une charge sous la tension maximale ( $U_m$ ) et à un courant maximal ( $I_m$ ). Au point  $P_m$ , situé au coude de la caractéristique d'après la figure 7, la puissance de la cellule est maximale pour l'éclairement considéré. Ce point dit de puissance maximale, « point de charge idéal de la cellule » est associé à une tension dite tension maximale  $U_m$  et de courant maximal  $I_m$ .

### 1.3.5.4 Facteur de forme, FF :

Le facteur de forme est un indicateur de l'efficacité du panneau, calculé comme le rapport entre la puissance maximale réelle du panneau et le produit de sa tension à circuit ouvert et de son courant de court-circuit [7], son expression est donnée par :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1.7)$$

### 1.3.5.5 Le rendement de conversion ( $\eta$ )

C'est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident  $P_{in}$ . On appelle rendement le rapport de la puissance fournie ( $P_{max}$ ) sur la puissance du rayonnement solaire incident ( $P_{in}$ ). [8]

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{S \cdot G} \quad (1.8)$$

Avec :

G : représente le flux lumineux reçue par unité de surface ( $W/m^2$ ).

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

## 1.3.6 Paramètres influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### 1.3.6.1 Influence de l'éclairement

Les figures 8 et 9 représentent respectivement les caractéristiques courant tension (I-V) et puissance tension (P-V) en fonction de l'éclairement :

La température est fixée pour différentes valeurs de l'éclairements.

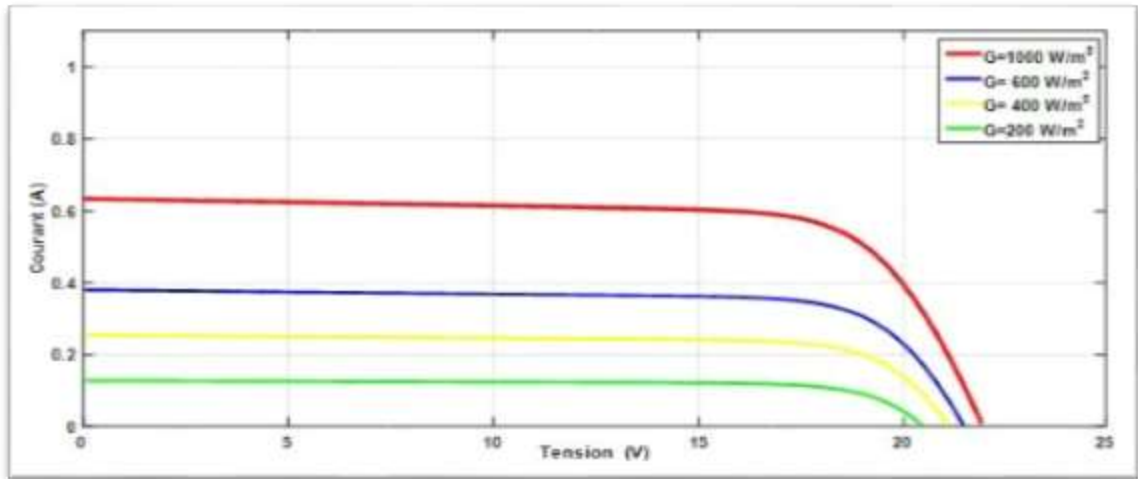


Figure 8: Influence d'éclairement sur la caractéristique courant tension (I-V).

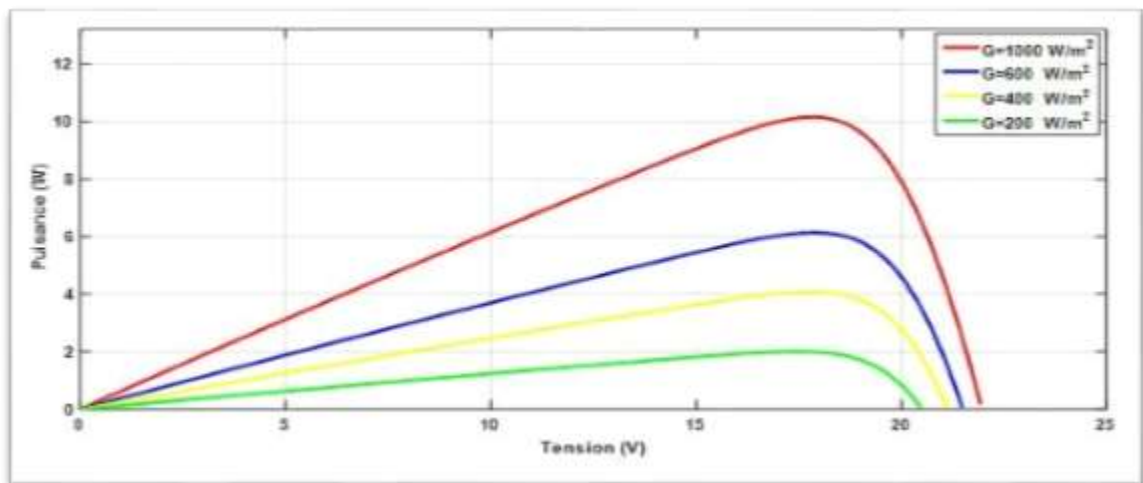


Figure 9: Influence d'éclairement sur la caractéristique puissance tension (P-V).

Le courant produit par la cellule est pratiquement proportionnel à l'intensité lumineuse. Pour des éclairements variables et une température constante, le courant  $I_{cc}$  augmentera considérablement lorsque l'intensité lumineuse augmentera. Cependant, la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  ne diminuera que légèrement, ce qui implique que la puissance optimale de la cellule ( $P_m$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement et les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension [9].

### 1.3.6.2 Influence de la température

Les figures 10 et 11 représentent respectivement les caractéristiques puissance tension (P-V) et courant tension (I-V) sous un éclairement fixe et pour différentes températures.

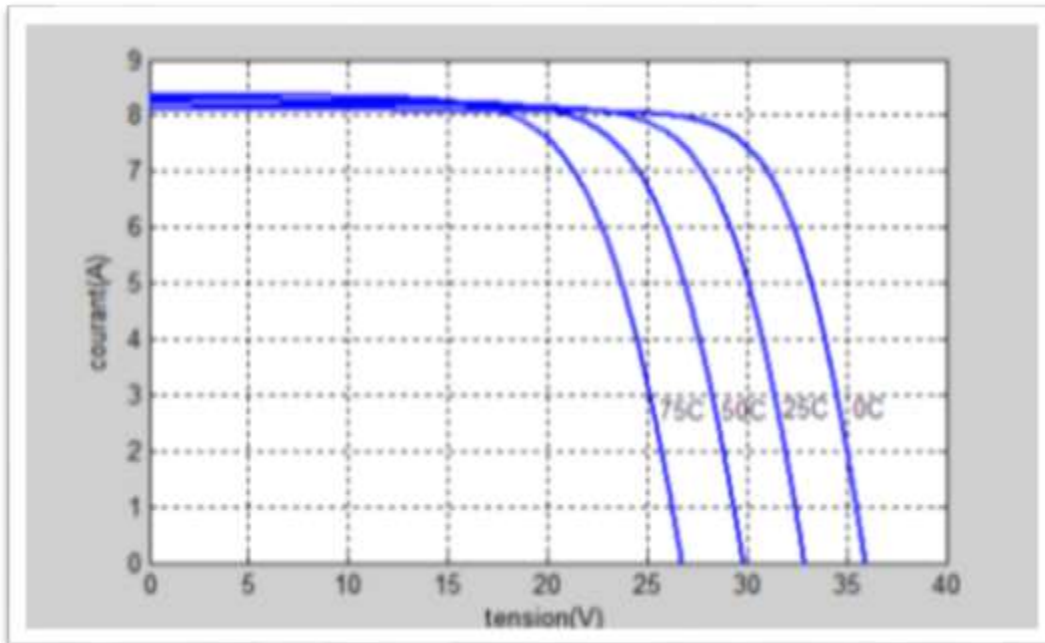


Figure 10: Influence de température sur la caractéristique (I-V).

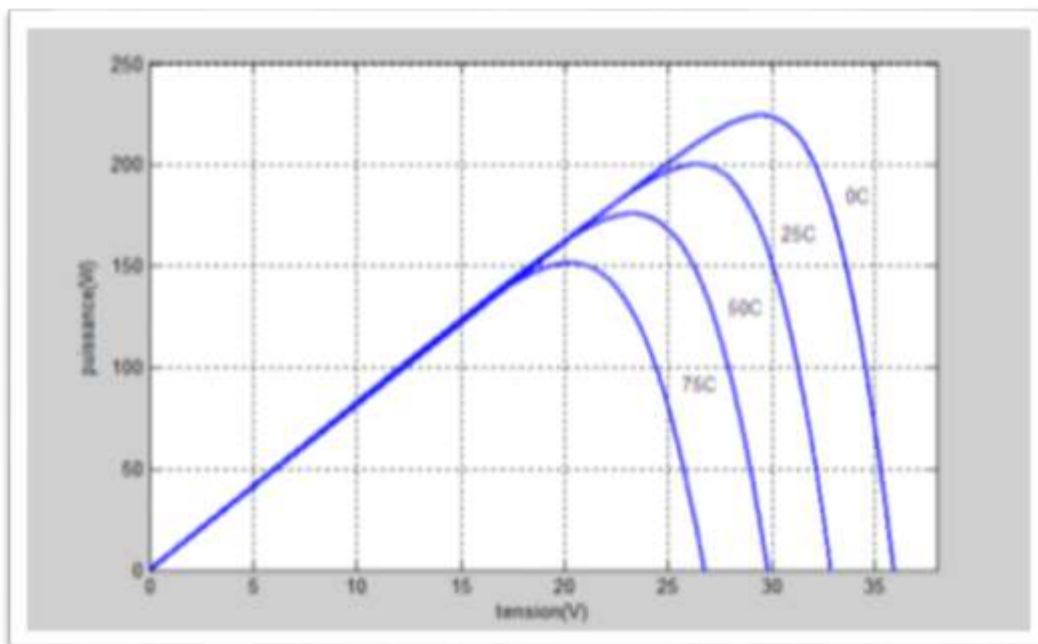
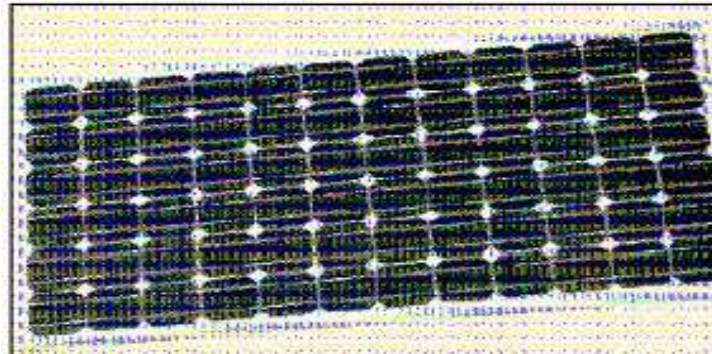


Figure 11: Influence de température sur la caractéristique (P-V).

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension de la cellule photovoltaïque, lorsque la température augmente, le courant augmente alors que la tension décroît. Cela se traduit par une baisse de puissance [9].

### I.4 Panneau photovoltaïque

Le module photovoltaïque [10] est par définition un ensemble de cellules solaires assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition au rayonnement utile. En effet, une photopile élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique moins de 3 W avec une tension de l'ordre d'un volt (1 V) : entre 0,5 et 1,5 V selon les technologies. Afin de produire plus de puissance, les cellules sont assemblées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque (figure 12).



**Figure 10: Panneau solaire photovoltaïque.**

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique [11].

#### I.4.1 Association en série

Plusieurs cellules photovoltaïques sont mises en série pour obtenir la tension désirée comme l'indique la Figure 13.a. Chaque cellule produit un courant continu dont la puissance dépend de la surface de la cellule. Les différentes cellules sont montées en série pour former des modules qui délivrent des tensions normalisées, la tension résultante est la somme des tensions de nombre des cellules associées, quant à la puissance maximale de l'ensemble est égale à la puissance maximale d'une cellule multipliée par le nombre de cellules reliées [12].

Au cas de «  $N_s$  » cellules identiques montées en série, il suffit de dilater la caractéristique d'une cellule d'un facteur «  $N_s$  » dans la direction de l'axe des tensions comme indiqué en Figure 13.b.



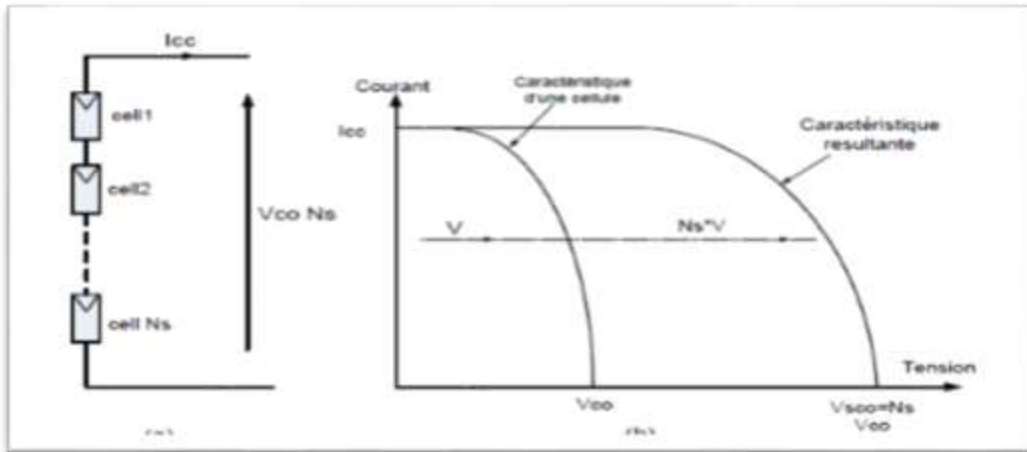


Figure 11: Association de  $N_s$  cellules en série.

#### I.4.2 Association parallèle

La caractéristique courant-tension obtenue lors du montage en parallèle de deux cellules identiques montre que la puissance maximale de l'ensemble est égale au double de la puissance maximale d'une cellule et la tension optimale est la même pour une seule cellule alors que le courant optimal de l'ensemble est égal au double du courant optimal d'une seule cellule.

Ce résultat se généralise sans difficulté au cas de «  $N_p$  » cellules identiques montées en parallèle, Figure 14.a, il suffit de dilater la caractéristique d'une cellule d'un facteur «  $N_p$  » dans la direction de l'axe des courants, comme on le voit en Figure 14.b [12].

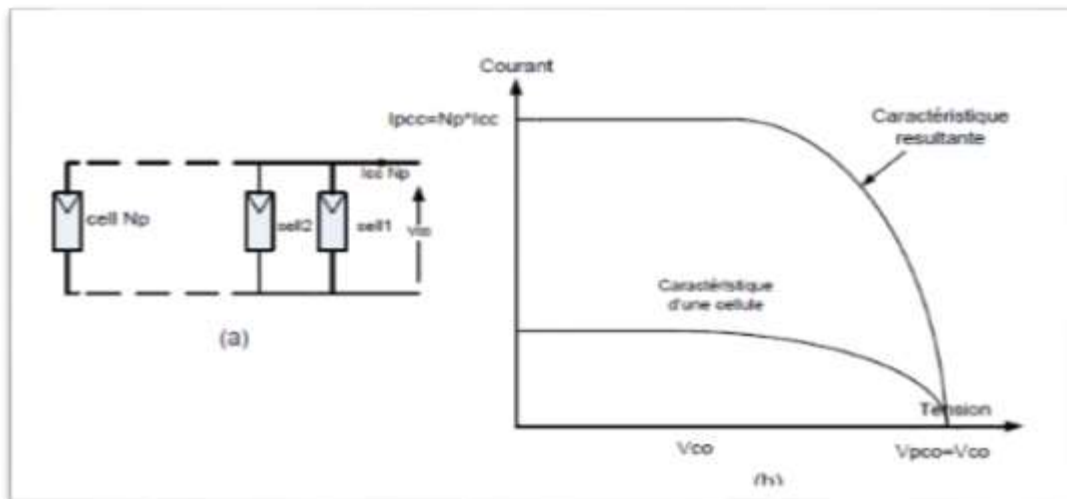


Figure 12: Association de  $N_p$  cellules en parallèle.

### I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque représente une solution durable et respectueuse de l'environnement pour répondre aux besoins croissants en énergie. Toutefois, comme toute source d'énergie, elle présente à la fois des avantages et des inconvénients. [13] [14] [15] [16]

#### I.5.1 Avantages

✓ **Énergie renouvelable** : L'énergie solaire est une ressource renouvelable inépuisable. Elle repose sur la lumière du soleil, disponible quotidiennement.

✓ **Réduction des émissions de gaz à effet de serre** : La production d'énergie photovoltaïque génère beaucoup moins de gaz à effet de serre que les technologies traditionnelles.

✓ **Faible coût d'entretien** : Les systèmes photovoltaïques ont généralement des coûts d'entretien faibles, ce qui en fait une option économique à long terme.

✓ **Autonomie énergétique** : Les installations photovoltaïques offrent la possibilité d'atteindre une certaine autonomie énergétique, particulièrement utile dans les régions éloignées.

✓ **Longue durée de vie** : Les panneaux photovoltaïques ont une durée de vie relativement longue, généralement garantie jusqu'à 25 ans, ce qui assure une production continue sur une longue période.

✓ **Diversification énergétique** : L'énergie solaire contribue à la diversification du bouquet énergétique, réduisant la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles.

✓ **Absence de bruit et de pollution** : Les systèmes photovoltaïques ne produisent aucun bruit ni pollution lors de leur fonctionnement, contrairement aux centrales électriques conventionnelles.

✓ **Applications décentralisées** : Les installations photovoltaïques peuvent être déployées à différentes échelles, des petits systèmes résidentiels aux grandes centrales solaires, offrant une flexibilité d'application.

✓ **Création d'emplois** : Le développement de l'industrie photovoltaïque contribue à la création d'emplois dans les secteurs de la fabrication, de l'installation et de la maintenance.

#### I.5.2 Inconvénients

✓ **Coût initial élevé** : L'installation initiale d'un système photovoltaïque peut être coûteuse, bien que les coûts aient considérablement diminué ces dernières années.

- ✓ **Dépendance aux conditions météorologiques** : L'énergie solaire est influencée par les conditions météorologiques, ce qui peut entraîner une production variable.
- ✓ **Utilisation de matériaux rares** : Certains types de panneaux solaires requièrent des matériaux rares, posant des problèmes potentiels de durabilité et de disponibilité à long terme.
- ✓ **Emprise au sol** : Les installations photovoltaïques à grande échelle peuvent nécessiter de vastes étendues de terrain, posant des défis dans les zones densément peuplées.
- ✓ **Intensité énergétique de la fabrication** : La fabrication des panneaux solaires nécessite une quantité substantielle d'énergie, bien que cette empreinte énergétique diminue avec les progrès technologiques.
- ✓ **Gestion des déchets** : La gestion des déchets provenant des panneaux solaires en fin de vie nécessite une attention particulière pour minimiser l'impact environnemental.
- ✓ **Intermittence de la production** : La production d'électricité photovoltaïque est intermittente, nécessitant des systèmes de stockage ou un complément d'autres sources d'énergie.
- ✓ **Impact visuel** : Les grandes installations photovoltaïques peuvent avoir un impact visuel sur le paysage, ce qui soulève des préoccupations esthétiques.
- ✓ **Recyclage des panneaux** : Le recyclage des panneaux solaires en fin de vie peut être complexe et coûteux, nécessitant des efforts supplémentaires pour assurer une gestion durable des déchets.

### 1.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mettre en lumière l'importance de l'énergie solaire photovoltaïque dans le contexte actuel de transition énergétique. En comprenant l'effet photovoltaïque, les différents types de cellules et les paramètres électriques des panneaux photovoltaïques, il devient évident que cette source d'énergie renouvelable présente un potentiel considérable. Cependant, pour garantir son efficacité à grande échelle, il est impératif de comprendre les facteurs influençant le rendement de ces systèmes et de peser attentivement les avantages par rapport aux inconvénients. Ce chapitre fournit ainsi une base solide pour poursuivre l'exploration de l'optimisation intelligente d'un système photovoltaïque, en se basant sur une compréhension approfondie de ses fondements et de ses défis.

## **Chapitre II : Etat de l'art d'une commande MPPT**

## **II.1 Introduction**

Il existe des méthodes spécifiques pour optimiser le fonctionnement des dispositifs afin d'atteindre leurs performances maximales, même sans connaître à l'avance ces points ni les causes des variations. Pour les sources d'énergie comme les panneaux solaires, cela consiste à rechercher le point de puissance maximale. La commande MPPT vise à ajuster le générateur à sa charge pour maximiser le transfert de puissance. Ce chapitre se concentre sur l'étude détaillée des méthodes de poursuite de ce point optimal, en couvrant à la fois les algorithmes classiques et modernes.

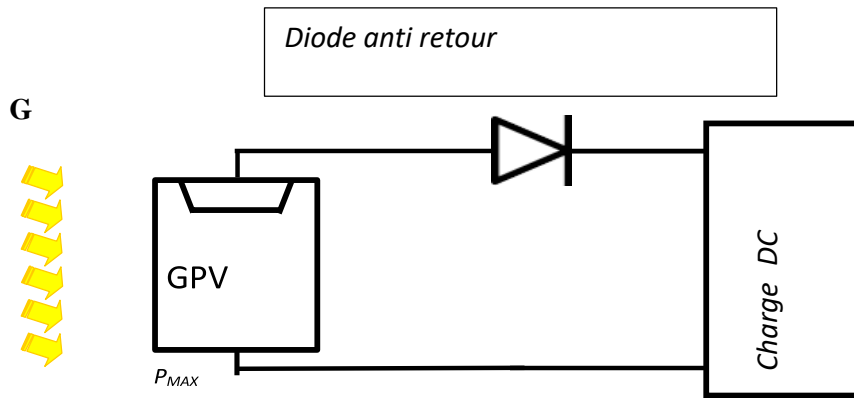
## **II.2 Les différentes chaînes de conversion photovoltaïque et leurs évolutions**

On peut concevoir les systèmes de conversion photovoltaïque en suivant deux approches principales.

- ✓ La connexion directe source-charge.
- ✓ La connexion indirecte source-charge.

### **II.2.1 Connexion directe source-charge**

De nos jours, il existe encore de nombreuses applications qui permettent une connexion directe entre un GPV et une charge. Ce choix repose principalement sur la facilité d'utilisation et la grande fiabilité, principalement due à l'absence d'électronique, sans oublier le faible coût. Si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, la batterie pourrait donc se décharger sur le générateur PV et en plus l'endommager irréversiblement. Ainsi, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. Cette configuration est illustrée à la figure 15. [17]



**Figure 13: Schéma de Connexion directe GPV-Charge par une diode anti-retour.**

En effet, le point de fonctionnement du GPV est le résultat de l'intersection de la caractéristique I-V du GPV et celle de la charge.

Nous supposons que la charge est de nature continue (DC). Effectivement, une charge alternative ne peut pas être utilisée pour une connexion directe car le GPV offre un courant continu. Pour connecter un GPV à une source de courant alternative, il est indispensable d'avoir un étage d'adaptation spécifique de type onduleur. [18] [19]

Il existe trois catégories principales de charges DC : une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant. [17]

Les caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur PV ainsi que les caractéristiques I(V) des trois types de charges ont été représentées sur la figure 16. En premier lieu, il est possible de repérer le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur atteint son maximum ( $P_{MAX}$ ) pour un courant optimal ( $I_{OPT}$ ) et une tension optimale ( $V_{OPT}$ ), appelé PPM. Par la suite, on peut déterminer le point de rencontre entre les caractéristiques I(V) du générateur et celles des trois types de charges : Le point A pour une charge résistive, point B correspond à une charge de type source de tension, et le point C correspond à une charge de type source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement  $P_A$ ,  $P_B$  et  $P_C$ , et ces valeurs sont inférieures à la puissance maximale disponible  $P_{MAX}$ . [17]

En résumé, la figure 17 illustre comment le type de charge directement connectée à un GPV affecte le point de fonctionnement et la puissance maximale qui peut être obtenue. Cela met en évidence l'importance de choisir la bonne méthode de connexion en fonction du type de charge pour maximiser l'efficacité du système photovoltaïque.

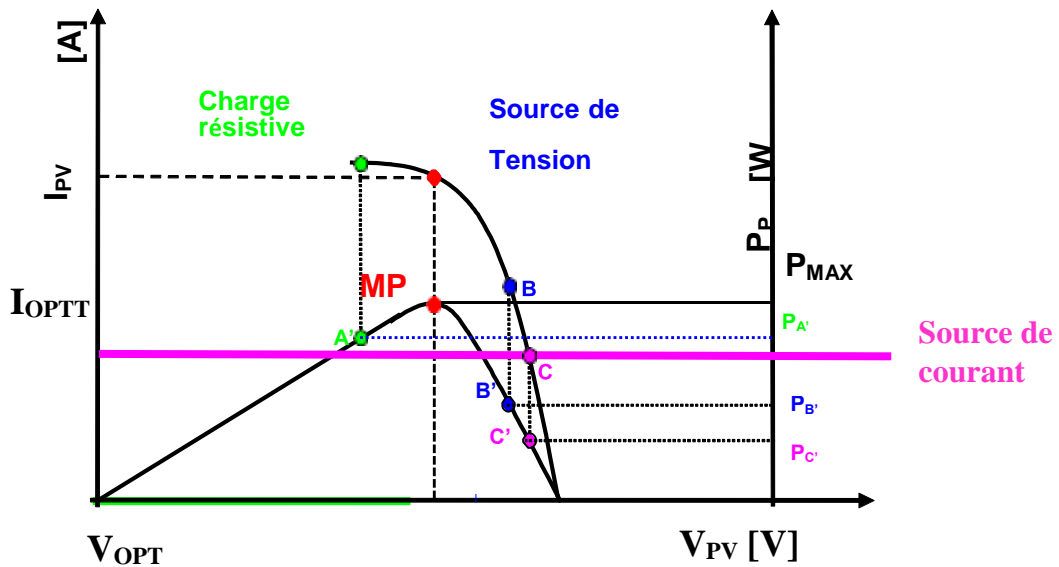


Figure 14: Le point de fonctionnement d'un générateur PV en fonction de la charge en connexion directe.

La connexion indirecte, également connue sous le nom de connexion par étage d'adaptation, représente une approche clé pour maximiser l'efficacité de l'extraction de puissance des panneaux solaires. Cette méthode implique l'utilisation d'étages d'adaptation (comme des convertisseurs DC-DC) entre les panneaux solaires et le système de stockage ou le réseau, ce qui permet de mieux adapter les caractéristiques du système photovoltaïque à l'environnement et aux charges connectées.

L'objectif principal de cette approche est de maintenir le point de puissance maximale (Maximum Power Point, MPP) des panneaux solaires en dépit des variations environnementales telles que la variation d'intensité lumineuse ou les écarts de température. En incorporant des étages d'adaptation, la connexion indirecte vise à minimiser les pertes et à améliorer la conversion énergétique dans des conditions non idéales.

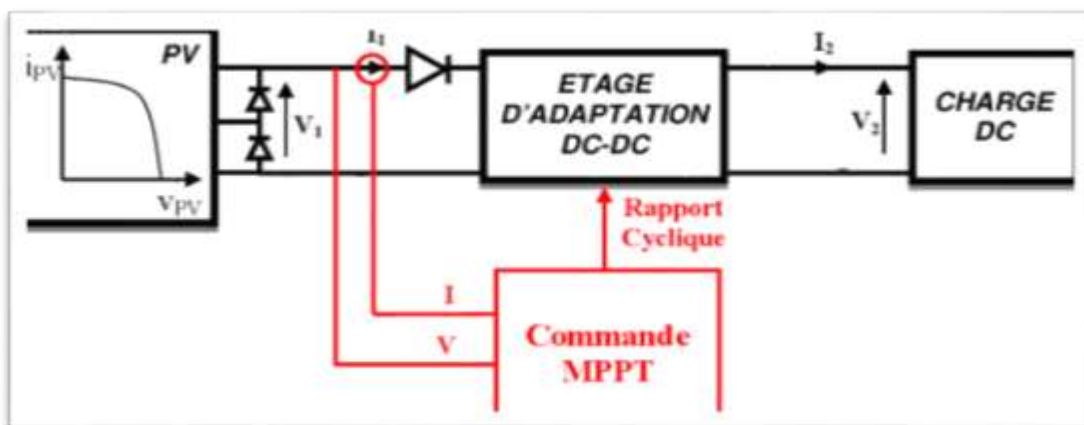


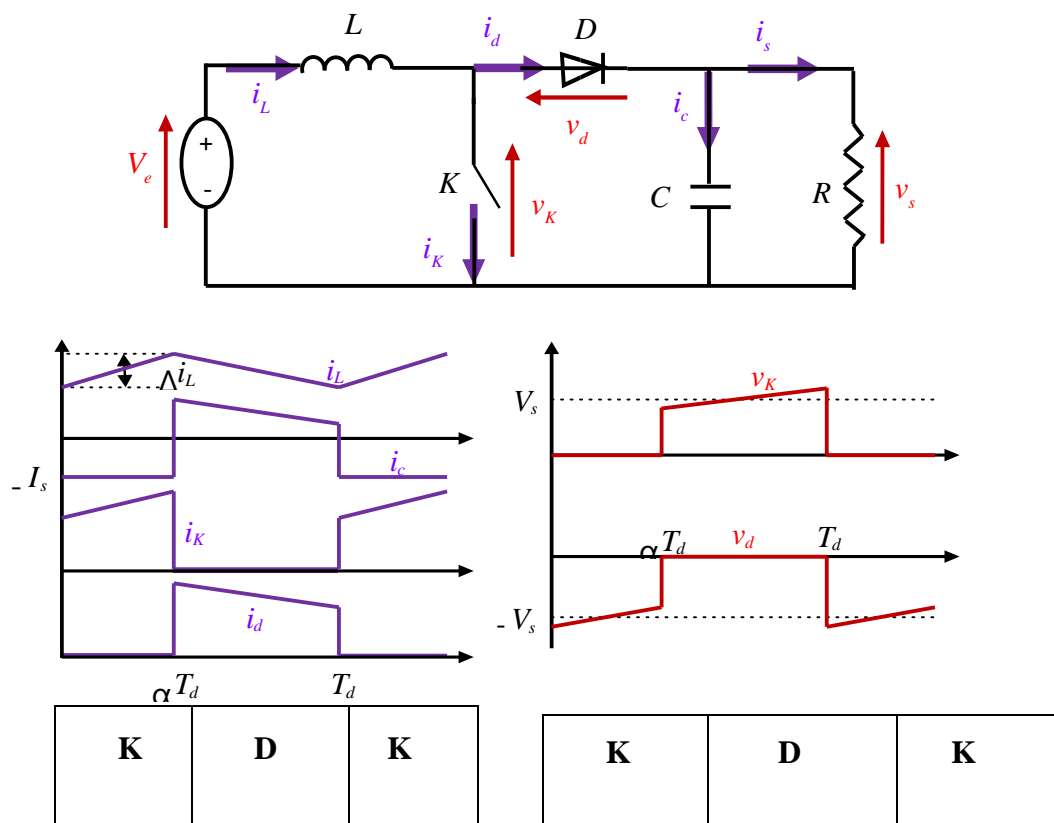
Figure 15: Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge.

## II.2.2 Convertisseur Boost

Un convertisseur Boost est un hacheur parallèle constitué de deux semi-conducteurs, un interrupteur commandable K (IGBT ou MOSFET) et d'une diode D. Le commutateur K contrôlé par un signal modulé en largeur d'impulsion (MLI) avec une période de commutation fixe  $T_d$  et un rapport cyclique  $\alpha$  variable. La conduction des deux interrupteurs est complémentaire. Lorsque K est fermé, D est ouvert et lorsque K est ouvert, D est fermé. A chaque cycle K s'éteint du temps 0 à  $\alpha T_d$  et ouvert de  $\alpha T_d$  à  $T_d$ .

Il existe deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inducteur est annulé (conduction discontinue) ou non (conduction continue). Nous nous intéressons à ce dernier, qui est le plus important.

La figure 18, donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite).



**Figure 16: Convertisseur Boost et ses formes d'ondes de courant et tension [20].**



- En fermant l'interrupteur K ( $0 < t < \alpha T_d$ ), le circuit du convertisseur devient

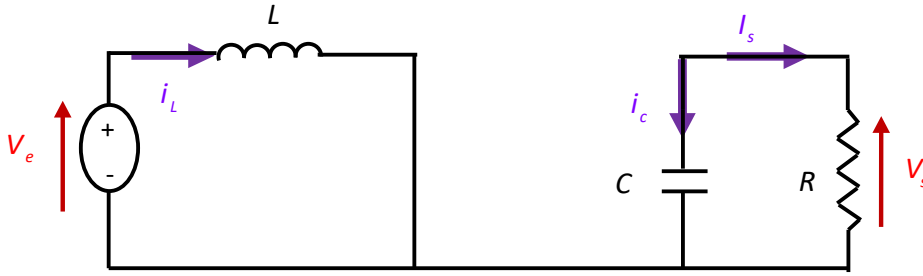


Figure 17: Circuit équivalent du Boost quand K est fermé.

$$V_e = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \quad (\text{II.2})$$

$$\frac{C}{dt} dV_s = -i_s \quad (\text{II.3})$$

La valeur minimale du courant dans l'inductance est  $I_{min}$ .

Le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale  $I_{max}$  à l'instant ( $t = \alpha T$ ) :

$$\text{D'où} \quad I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \quad (\text{II.4})$$

- Lorsque l'interrupteur K est ouvert ( $\alpha T_d < t < T_d$ ), le circuit du convertisseur devient :

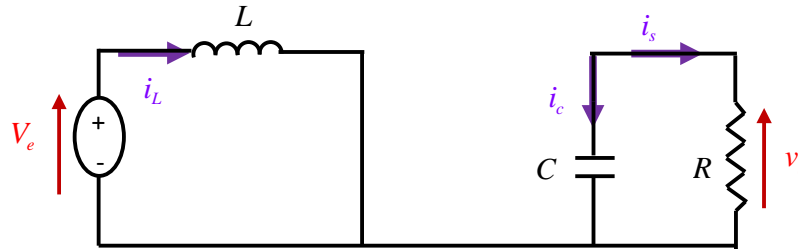


Figure 18: Circuit de Boost quand K est ouvert.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{II.5})$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (\text{II.6})$$

Au moment où ( $t = T_d$ ), le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{min}$  :

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (\text{II.7})$$

La valeur moyenne de la tension de sorties  $V_s$  peut être déduite en égalisant les valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (II.4) et (II.7) :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (\text{II.8})$$

La valeur moyenne du courant dans l'inductance peut être calculée en utilisant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique.

Dans le cas où la puissance de sortie est égale à celle de l'entrée, le courant de sortie  $I_s$  et le courant à l'entrée  $I_L$  sont donnés par la relation :

$$I_L = \frac{1}{1-\alpha} I_s \quad (\text{II.9})$$

Selon les équations (II.3) et (II.4), on peut tirer respectivement l'expression d'ondulation de la tension de sortie et l'expression d'ondulation du courant dans l'inductance :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C} T = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha)RCf} \quad (\text{II.10})$$

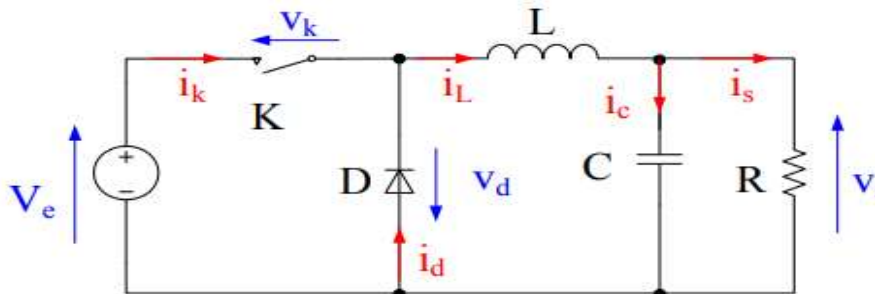
$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_e}{Lf} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

f : la fréquence de découpage.

### II.2.3 Convertisseur Buck

Lorsque ce convertisseur fonctionne en mode de conduction continue, on a les formes d'ondes de courant et de tension de la figure 21 ;



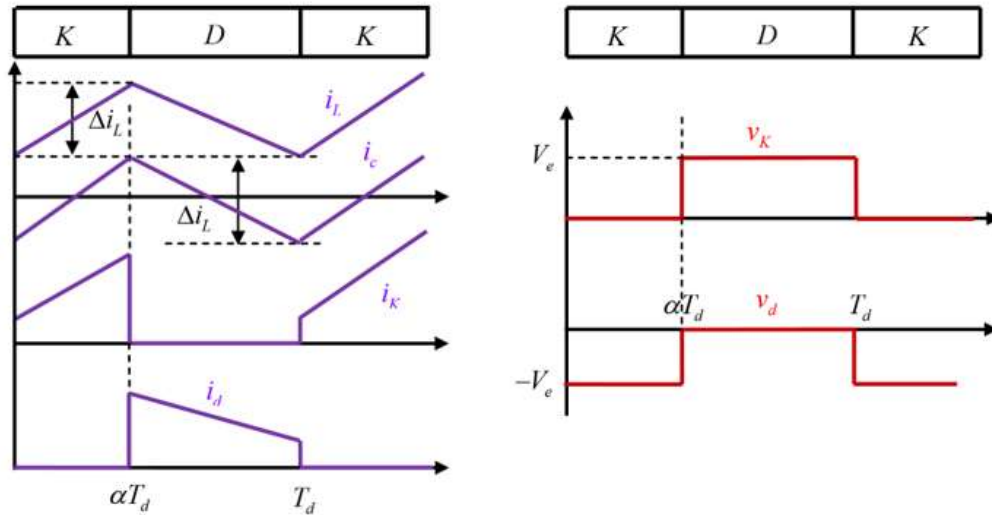


Figure 19: Formes d'ondes du convertisseur Buck (courants à gauche, tension à droite).

[20].

On donne respectivement la tension de sortie en valeur moyenne, l'oscillation du courant dans l'inductance et l'oscillation de la tension de sortie :

$$V_s = \alpha \cdot V_e \quad (\text{II.12})$$

$$\Delta i_L = \frac{\alpha(1-\alpha) V_e}{L \cdot f} \quad (\text{II.13})$$

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_L}{8 \cdot C \cdot f} = \frac{\alpha \cdot (1-\alpha) \cdot V_e}{8 \cdot C \cdot L \cdot f^2} \quad (\text{II.14})$$

Le convertisseur agit donc comme un abaisseur de tension.

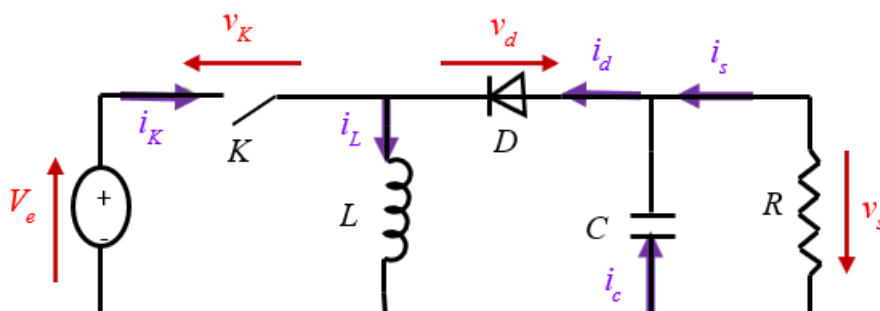
Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :

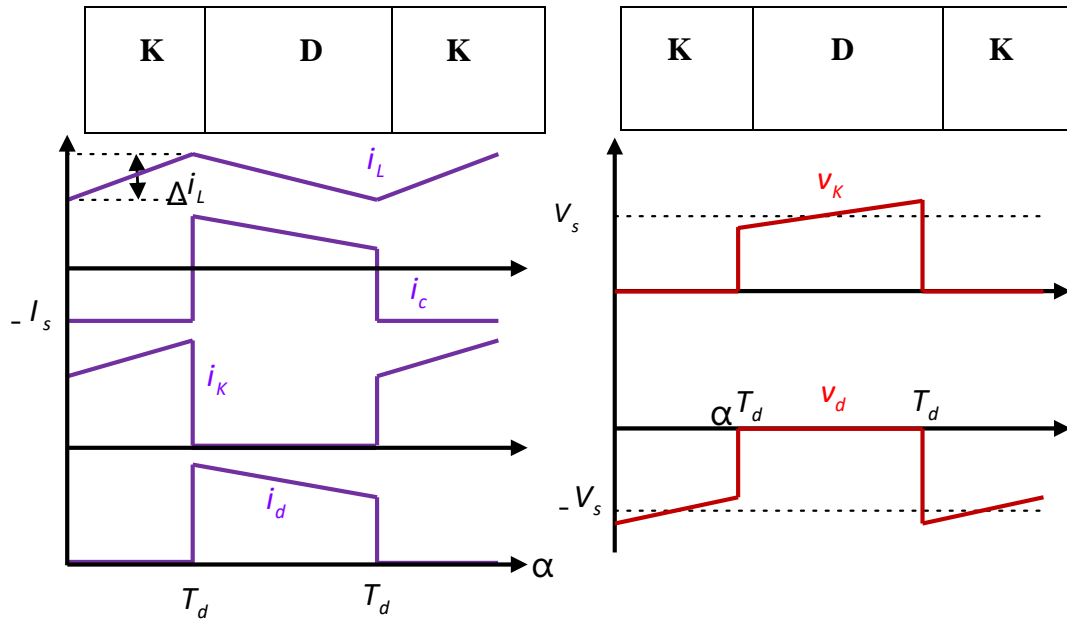
$$I_L = I_S \quad (\text{II.15})$$

## II.2.4 Convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur Buck-Boost est également appelé abaisseur-élevateur par son aptitude à fournir une tension plus faible, ou plus élevée que celle appliquée en son entrée. Ceci dépend de la valeur du rapport cyclique.

La figure 22 illustre le circuit électrique du convertisseur Buck-Boost et ses formes d'ondes de courant et de tension.





**Figure 20: Convertisseurs Buck et ses formes d'ondes des courants et tensions**  
[21].

La tension de sortie en valeur moyenne est donnée par :

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e \quad (\text{II.16})$$

Ondulation du courant dans l'inductance est donnée par :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha}{L.f} \cdot V_e \quad (\text{II.17})$$

Ondulation de la tension de sortie est donnée par :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha^2}{(1-\alpha) \cdot R.C.f} \cdot V_e \quad (\text{II.18})$$

## II.2.5 Convertisseur Cuk

Le convertisseur Cuk est un type de convertisseur DC/DC utilisé pour convertir une tension continue en une autre tension continue de niveau inférieur ou supérieur, tout en pouvant inverser la polarité de la tension de sortie sans recourir à un transformateur. Le schéma de base est illustré à la Figure 23.

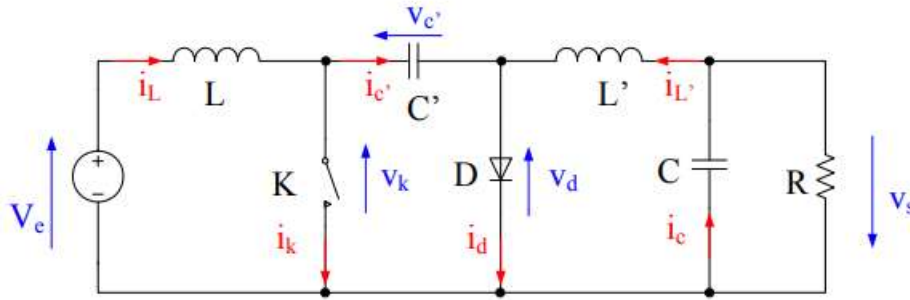


Figure 21: Schéma de base d'un convertisseur Cuk. [20]

La tension de sortie moyenne est donnée par :

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot V_e \quad (\text{II.19})$$

La relation entre les courants moyens est :

$$I_L = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_{L'} = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_s \quad (\text{II.20})$$

## II.2.6 Convertisseur Sepic

Le convertisseur SEPIC (Single-Ended Primary Inductance Converter) est un convertisseur DC/DC qui permet de convertir une tension continue en une autre tension continue de valeur différente (plus faible ou plus grande). [23]

Le Sepic est semblable au Buck-Boost mais a l'avantage d'avoir une sortie non inversée (la tension de sortie est de la même polarité que la tension d'entrée).

Le circuit de principe du convertisseur Sepic est illustré à la Figure 24.

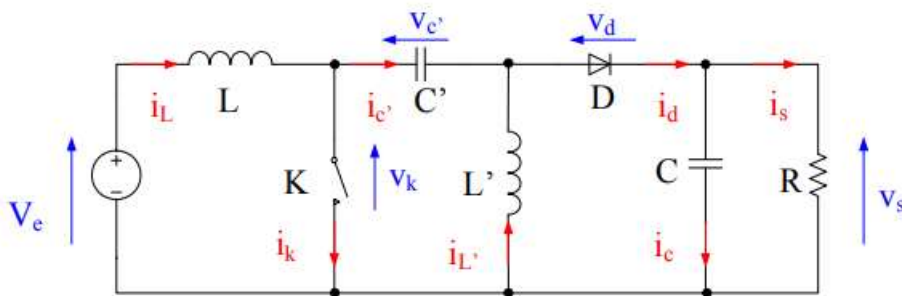


Figure 22: Schéma de base d'un convertisseur SEPIC.

La tension de sortie en valeur moyenne est donnée par :

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot V_e \quad (\text{II.21})$$

La relation entre les valeurs moyennes des courants est donnée par :

$$I_L = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_{L'} = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_s \quad (\text{II.22})$$

### II.3 Comparaison des différents convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC/DC jouent un rôle crucial dans les applications modernes d'électronique de puissance, notamment dans les systèmes photovoltaïques. Les convertisseurs Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk et SEPIC présentent des caractéristiques distinctes qui les rendent adaptés à diverses utilisations. Le convertisseur Buck est idéal pour réduire la tension, tandis que le Boost est utilisé pour augmenter la tension. Le convertisseur Buck-Boost combine les fonctionnalités des deux précédents, permettant de produire une tension de sortie soit supérieure, soit inférieure à la tension d'entrée. Le convertisseur Cuk offre un courant d'entrée et de sortie continus, ce qui réduit le bruit électromagnétique, mais il génère une tension de sortie inverse. Le SEPIC, quant à lui, permet également de produire une tension de sortie supérieure ou inférieure à l'entrée, tout en maintenant la même polarité de sortie que l'entrée, ce qui le rend favorable pour les systèmes nécessitant une tension non inversée. En termes de performances, les convertisseurs SEPIC se distinguent par leur faible ondulation de courant d'entrée et une exigence de circuit de commande simple, ce qui les rend idéaux pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques sous diverses conditions atmosphériques. [24]

Le tableau II.1 ci-dessous compare les gains statiques des différents convertisseurs DC/DC étudiés. [24]

**Tableau 1 : Les gains statiques des différents convertisseurs DC/DC.**

Convertisseur	Gain statique $\frac{V_s}{V_e}$
Buck	A
Boost	$\frac{1}{1 - \alpha}$
Back Boost	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$
Cuk	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$
SEPIC	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$

Le gain statique, défini comme le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée, varie selon le type du convertisseur et le rapport cyclique ( $\alpha$ ). Comme on peut constater dans le tableau, pour un convertisseur Buck, le gain est directement proportionnel à ( $\alpha$ ), ce qui signifie que la tension de sortie sera toujours inférieure à la tension d'entrée. En revanche, un convertisseur Boost, présente un gain inversement proportionnel à ( $1-\alpha$ ), ce qui permet une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée.

Les convertisseurs Buck Boost, Cuk et SEPIC partagent des caractéristiques similaires avec des variations dans leur capacité à inverser la polarité ou à maintenir la polarité d'entrée, influençant ainsi leurs applications spécifiques.

## **II.4 La commande MPPT**

La recherche du point de puissance maximal (Maximum Power Point Tracking, ou MPPT) est une technique utilisée pour optimiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques en ajustant dynamiquement les conditions de fonctionnement pour maximiser la puissance extraite de la source d'énergie renouvelable [25].

### **II.4.1 Principe de fonctionnement du MPPT**

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est une technologie utilisée dans les systèmes solaires pour maximiser l'extraction d'énergie des panneaux photovoltaïques (PV). En raison des caractéristiques non linéaires de la courbe courant-tension des panneaux photovoltaïques, MPPT ajuste en permanence le point de fonctionnement électrique du système pour garantir que les panneaux photovoltaïques fonctionnent avec une efficacité optimale.

L'utilisation d'algorithmes traditionnels comme Perturb and Observe (P&O) ou Incremental Conductance (IncCond) ont été couramment utilisés, mais l'introduction des algorithmes basés sur l'intelligence artificielle (IA) a révolutionné ce domaine. Les algorithmes d'IA, y compris les réseaux de neurones artificiels, les algorithmes de logique floue, améliorent considérablement les performances des contrôleurs MPPT. Ces algorithmes peuvent apprendre en temps réel et s'adapter aux changements des conditions environnementales, telles que l'irradiation solaire et la température, pour mieux prévoir et optimiser le point de puissance maximale. [25]

## II.4.2 Les algorithmes de la commande MPPT

Pour optimiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques, plusieurs méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont employées. Nous allons présenter les algorithmes de commande les plus populaires.

### II.4.2.1 Algorithme Perturber et Observer (P&O)

Le principe de fonctionnement de l'algorithme Perturb and Observe (P&O) repose sur trois étapes : observation et perturbation, décision, et itération.

D'abord, l'algorithme mesure la puissance de sortie actuelle du panneau photovoltaïque (PV), en calculant le produit de la tension et du courant. Ensuite, il perturbe légèrement cette tension ou ce courant. Après la perturbation, une nouvelle mesure de la puissance de sortie est effectuée. Dans la phase de décision, si la puissance de sortie augmente après la perturbation, l'algorithme continue à perturber dans la même direction, indiquant un rapprochement du point de puissance maximale (MPP). En revanche, si la puissance diminue, l'algorithme inverse la direction de la perturbation pour se rapprocher du MPP. Ce processus d'observation, de perturbation et de prise de décision se répète continuellement, assurant que le système oscille autour du MPP, optimisant ainsi la collecte d'énergie malgré les variations des conditions environnementales. [26]

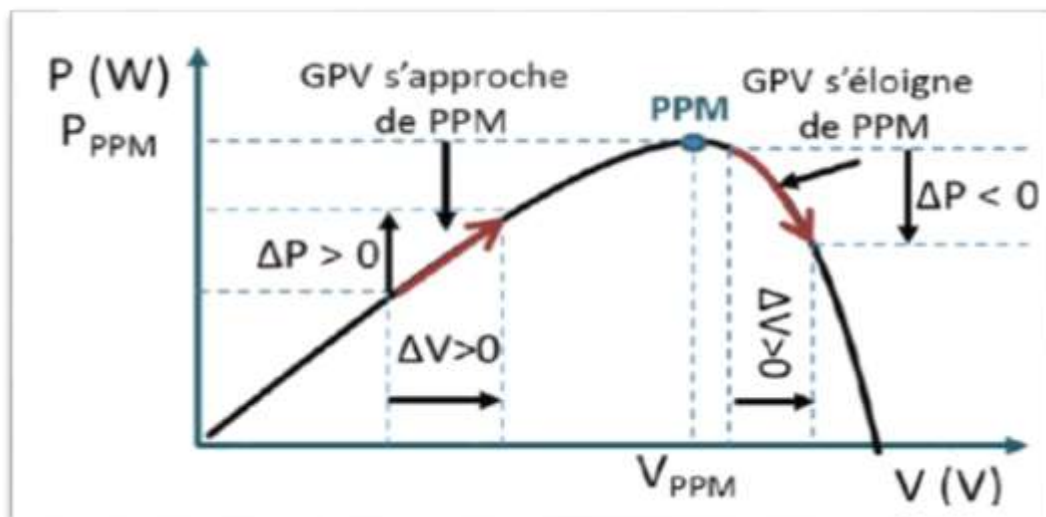
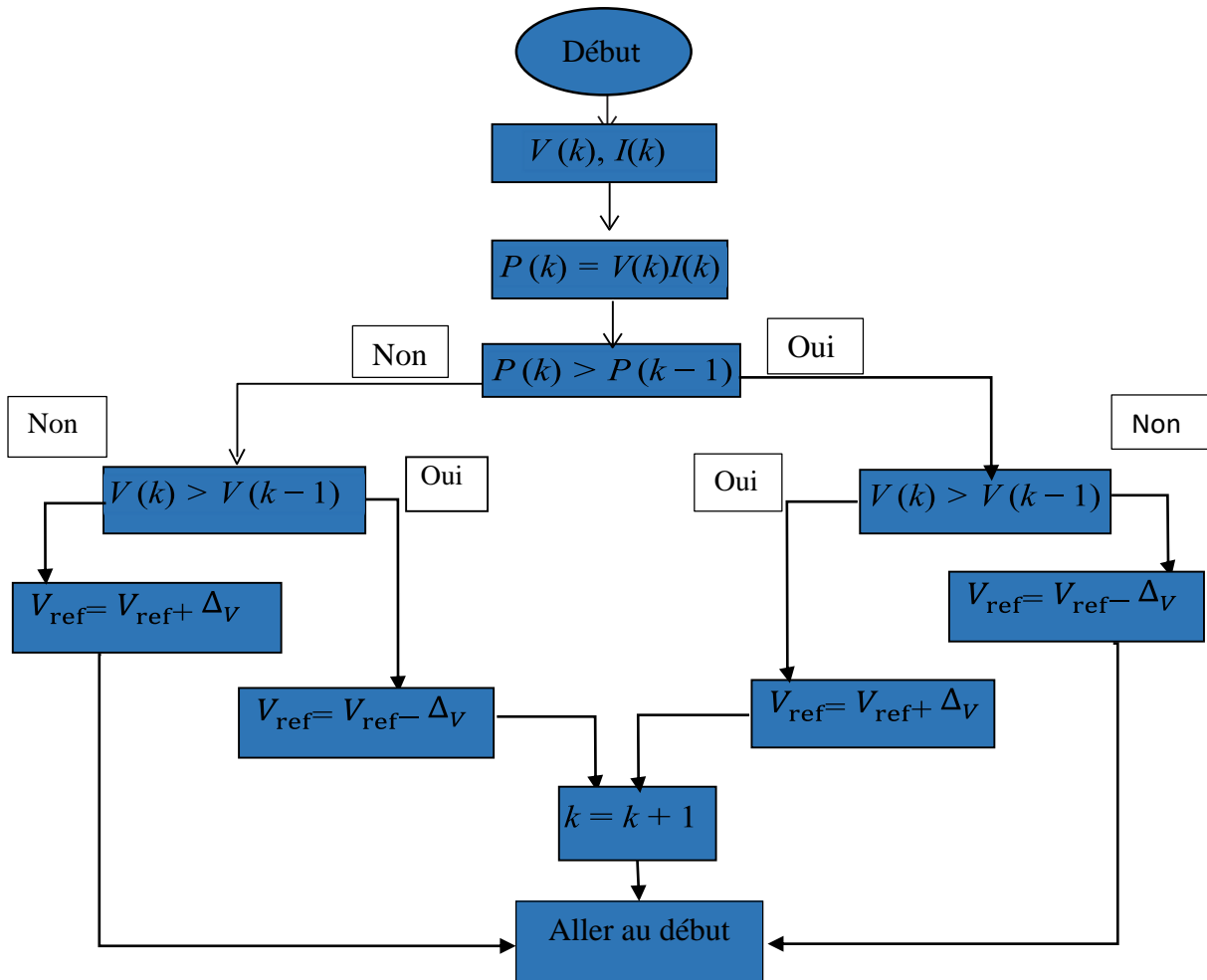


Figure 23: Schéma du principe de la méthode P&O [27].

La figure 26 représente l'algorithme Perturber et Observer (P&O) où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.





**Figure 24: Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O). [30]**

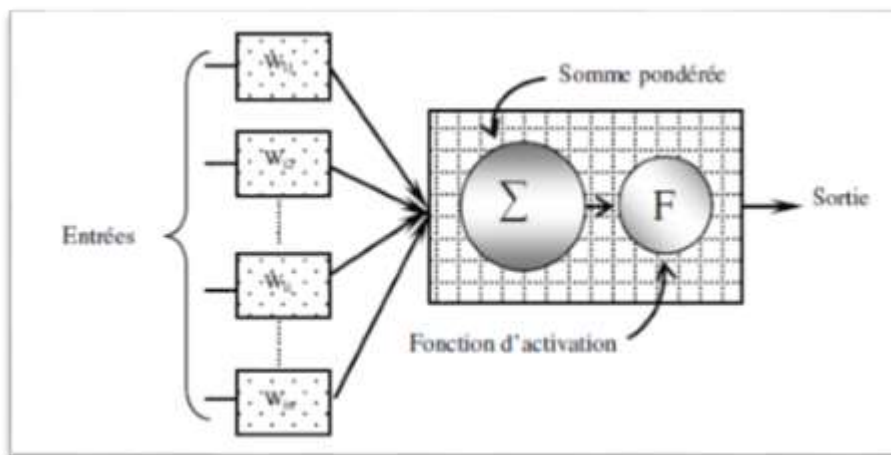
L'organigramme de la figure 26 décrit un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour un système photovoltaïque. Le processus commence par la mesure de la tension  $\mathbf{V}(\mathbf{k})$  et du courant  $\mathbf{I}(\mathbf{k})$  à l'instant  $\mathbf{k}$ . Ensuite, il compare la puissance actuelle  $\mathbf{P}(\mathbf{k})$  à la puissance précédente  $\mathbf{P}(\mathbf{k}-1)$ . Si la puissance actuelle est supérieure à la puissance précédente, le diagramme vérifie si la tension actuelle  $\mathbf{V}(\mathbf{k})$  est supérieure à la tension précédente  $\mathbf{V}(\mathbf{k}-1)$ . Si oui, l'algorithme incrémente la référence de tension  $\mathbf{V}_{\text{ref}}$ , sinon il la décrémente. Si la puissance actuelle est inférieure ou égale à la puissance précédente, une comparaison similaire de tensions est effectuée : si  $\mathbf{V}(\mathbf{k})$  est supérieure à  $\mathbf{V}(\mathbf{k}-1)$ , l'algorithme décrémente  $\mathbf{V}_{\text{ref}}$ , sinon il l'incrémente. Ce processus continue en boucle afin de constamment ajuster  $\mathbf{V}_{\text{ref}}$ , pour maximiser la puissance extraite du système photovoltaïque.

Un des avantages majeurs de la méthode P&O est sa simplicité de mise en œuvre et son coût relativement faible. Cependant, elle présente des limitations notables, telles que la réponse

dynamique lente, l'erreur en régime permanent, et les oscillations autour du point de puissance maximale (MPP).

#### II.4.2.2 MPPT à base de réseaux de neurones artificiels

Un neurone est une fonction non linéaire, paramétrée, à valeurs bornées. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire ; Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont ou à chacune de ces entrées est associée un poids  $w$ , représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones aval [6].



**Figure 25: La structure d'un neurone artificiel.**

La méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisant les réseaux de neurones artificiels est une technique avancée visant à optimiser les performances des systèmes photovoltaïques. Elle exploite la capacité des réseaux de neurones à modéliser des relations complexes et non linéaires, ce qui est particulièrement avantageux pour les systèmes photovoltaïques soumis à des variations d'ensoleillement et de température.

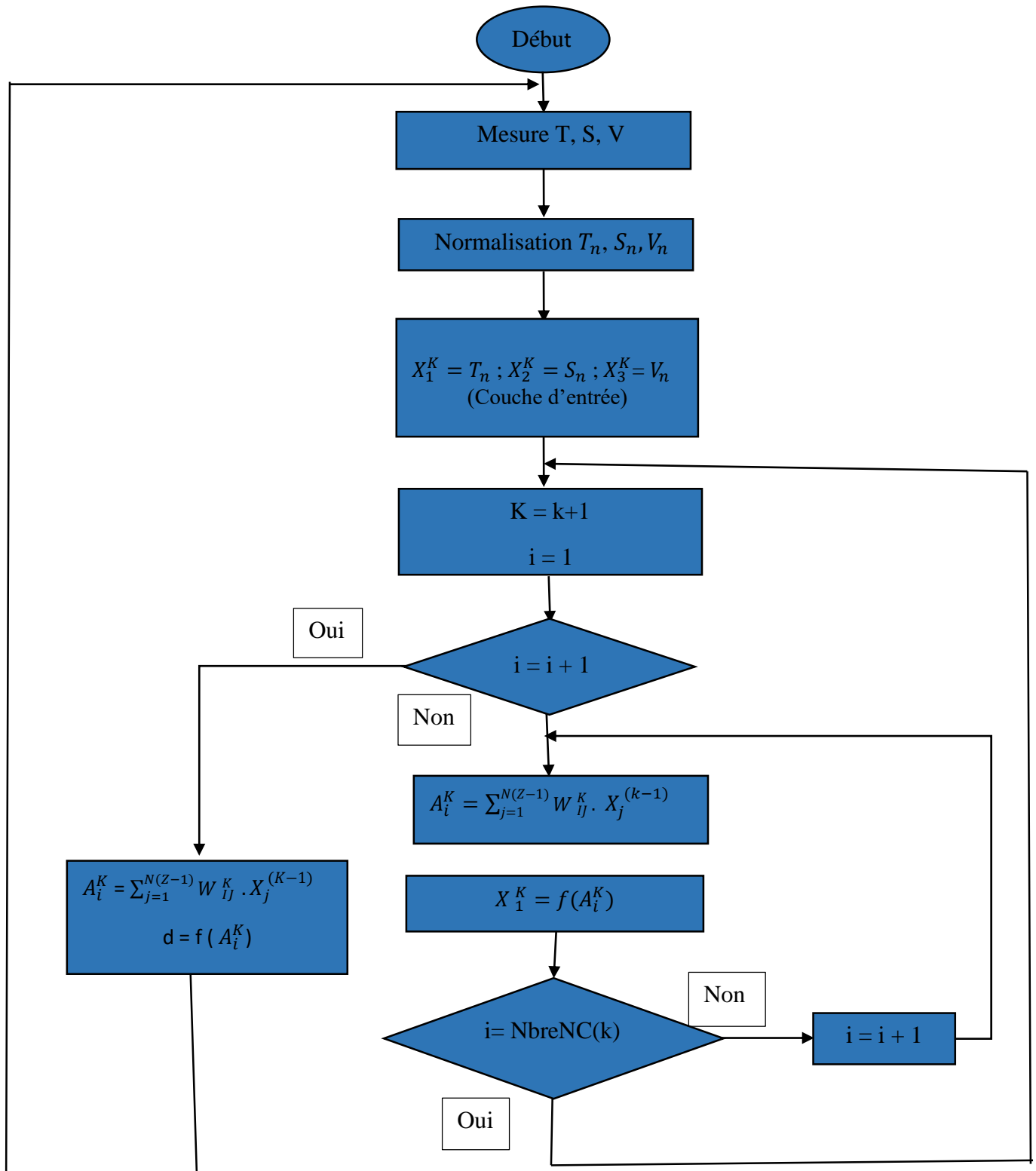
Un réseau de neurones artificiels est constitué de couches de neurones interconnectés qui collaborent pour résoudre des problèmes complexes. Pour le MPPT, le réseau de neurones est formé pour prédire le point de puissance maximale (MPP) en se basant sur des paramètres d'entrée tels que la tension et le courant du panneau photovoltaïque. L'entraînement du réseau se fait généralement avec des données historiques couvrant différentes conditions d'ensoleillement et de performances des panneaux. [28]

## ➤ **Principe de fonctionnement**

La méthode MPPT par réseaux de neurones suit plusieurs étapes clés : la collecte de données, l'entraînement du réseau de neurones, et l'application en temps réel. Des données de tension, de courant et de puissance sont collectées sous diverses conditions d'ensoleillement et de température. Ces données sont utilisées pour entraîner le réseau de neurones à associer les conditions d'entrée aux sorties souhaitées, en utilisant des algorithmes d'apprentissage pour minimiser l'erreur de prédiction.

Une fois entraîné, le réseau est intégré au système de contrôle du MPPT. En temps réel, il prédit le point de puissance maximale à partir des mesures en direct et ajuste les paramètres du système pour optimiser la puissance extraite. Cette méthode offre une réponse rapide et précise aux variations environnementales, réduisant les pertes d'énergie et améliorant l'efficacité globale du système photovoltaïque. [28]

La figure 28 illustre l'organigramme du principe du fonctionnement de la commande neuronale pour MPPT. [29]



**Figure 26: Organigramme du principe du fonctionnement de la commande neuronale.**

L'organigramme ci-dessus présente le fonctionnement de la commande neuronal dans un système photovoltaïque, montrant ses étapes depuis la collecte des données jusqu'à

l'application de la commande optimisée. Le processus commence par la mesure de l'ensoleillement, de la température et de la tension du panneau, suivie par le prétraitement de ces données. Celles-ci sont ensuite introduites dans un réseau de neurones entraîné, qui génère une commande optimisée pour ajuster la tension ou le courant du convertisseur DC-DC, maximisant ainsi la puissance extraite. Une boucle de rétroaction continue permet d'ajuster en temps réel les paramètres en fonction des variations environnementales, tandis que le réseau de neurones est régulièrement mis à jour pour améliorer sa précision et sa robustesse.

Cet organigramme offre une vue claire et structurée du processus de commande neuronale, illustrant l'interaction dynamique entre les différentes étapes pour un rendement optimal. [29]

### II.4.2.3 MPPT à base de logique floue (FL)

Les commandes basées sur la logique floue sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs [31]. L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. La logique floue est une des méthodes de contrôle les plus puissants. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités.

Cette fonctionnalité du contrôleur flou démontre son efficacité et le rend parmi les meilleurs dispositifs de suivi PPM.

Cette approche est basée sur deux concepts essentiels : celui de la décomposition d'une plage de variation d'une variable sous forme de nuances linguistiques : "faible", "moyen", "élevé" ... et des règles provenant de l'expertise de l'opérateur humain, qui expriment, sous forme linguistique, comment doivent évoluer les commandes du système en fonction des variables observées. Le contrôleur de flou MPPT proposée comporte deux variables entrées et une sortie voire figure 29. Les deux entrées sont l'erreur E, et la variation d'erreur CE et une variable de sortie  $\Delta D$  (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée. Ces deux grandeurs sont définies par [32] :

$$\mathbf{E(j)} = \frac{P_{PV(j)} - P_{PV(j-1)}}{V_{PV(j)} - V_{PV(j-1)}} \quad \mathbf{II.23}$$

$$\mathbf{CE(j)} = \mathbf{E(j)} - \mathbf{E(j - 1)} \quad \mathbf{II.24}$$

Avec :

$P_{pv}(j)$  et  $V_{pv}(j)$  sont respectivement: la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

- A partir de l'entrée  $E(j)$  on peut savoir la position du point de fonctionnement pour la charge à l'instant  $j$  par rapport au point de puissance maximale.
- La valeur de l'entrée  $CE(j)$  exprime la direction de déplacement de ce point.

Le schéma illustré dans la figure 29 est une représentation explicative de l'algorithme en logique floue.

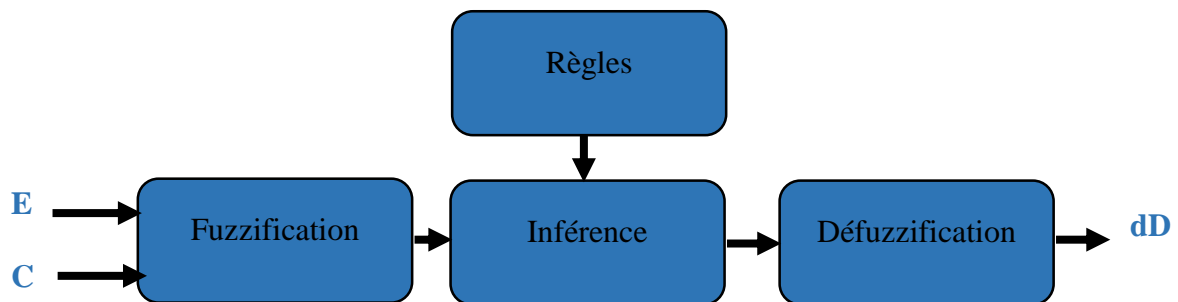


Figure 27: Structure de base du contrôleur flou.

Le fonctionnement de l'algorithme à base de la logique floue se fait en trois blocs :

- ✓ **La fuzzification** permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous.
- ✓ **L'inférence** dans cette étape, on prend des décisions. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance qui contenaient un ensemble de règles floues basées sur l'expérience et les connaissances du système.
- ✓ **La défuzzification**, qui transforme les valeurs floues résultantes en une commande précise pour ajuster le cycle de travail du convertisseur DC-DC afin de suivre le point de puissance maximale.

## 11.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons comparé les méthodes de connexion directe et indirecte des panneaux solaires à leurs charges. Nous avons vu que la connexion indirecte avec des convertisseurs DC-DC contrôlés par des algorithmes MPPT est plus efficace pour extraire le

maximum d'énergie des panneaux solaires, puis nous avons présenté les différents types des convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes photovoltaïques et leur principe de fonctionnement, enfin nous avons rappelé le principe de trois algorithmes MPPT tels que ; Perturber et Observer, MPPT à base de réseaux de neurones artificiels et MPPT à base de logique floue.

# **Chapitre III : Simulation Des Méthodes MPPT Pour Système Photovoltaïque**



### III.1 Introduction

Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes PV pour maximiser la puissance de sortie du générateur PV en suivant le MPP en continu qui dépend de la température et de l'éclairement du panneau. Les techniques de MPPT traditionnelles, telles que la méthode P&O, sont largement utilisées en raison de leur simplicité et de leur efficacité. Cependant, les avancées récentes dans les domaines de l'intelligence artificielle et des algorithmes adaptatifs ont ouvert la voie à des méthodes plus sophistiquées, comme la logique floue et les réseaux de neurones artificiels, qui promettent une amélioration significative des performances.

Ce chapitre propose une simulation détaillée de ces trois techniques de MPPT en utilisant Matlab/Simulink. Les performances de chaque méthode sont évaluées en termes de leur capacité à suivre le point de puissance maximale sous diverses conditions de rayonnement et de température.

### III.2 Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque

Dans cette section, nous allons réaliser une simulation d'une chaîne de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

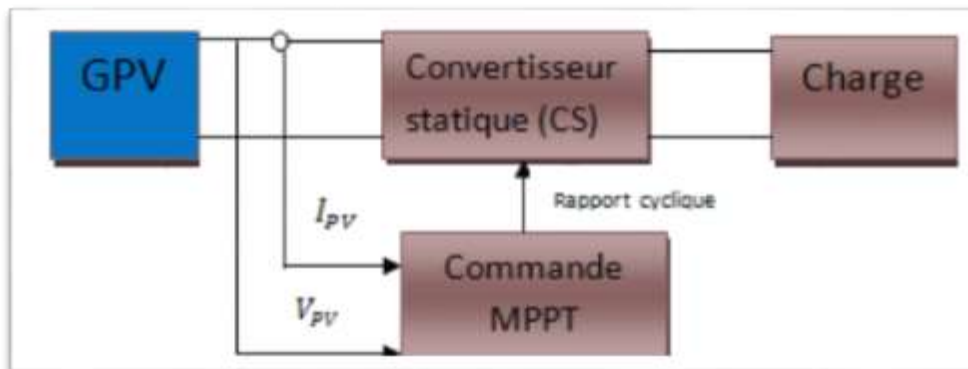


Figure 28: chaîne de conversion d'énergie solaire.

Le système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation inclut une source d'énergie (un panneau photovoltaïque), un convertisseur statique DC/DC, un contrôleur MPPT ainsi qu'une charge.

### III.2.1 Simulation d'un convertisseur DC-DC (BOOST)

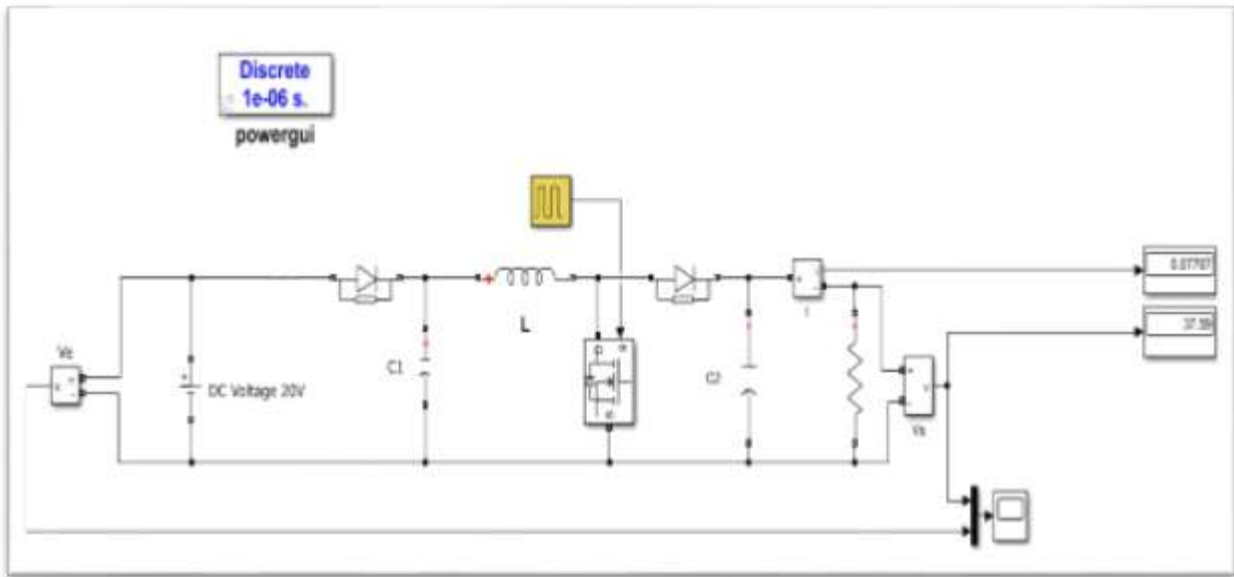


Figure 29: Schéma de simulation d'un convertisseur DC-DC (BOOST).

Le schéma bloc illustré dans la figure 31 présente un convertisseur DC-DC de type BOOST utilisé dans la chaîne de conversion photovoltaïque. Ce convertisseur est essentiel pour augmenter la tension de sortie du système photovoltaïque afin de la rendre compatible avec les exigences des charges ou des systèmes de stockage. Le schéma bloc inclut les principaux composants du convertisseur, tels que l'inductance, le commutateur (transistor), la diode, et le condensateur de sortie, montrant clairement le flux d'énergie à travers le système. Le fonctionnement du convertisseur BOOST est basé sur l'interruption du courant à travers une inductance pour créer une haute tension de sortie par rapport à la tension d'entrée.

La courbe de tension d'entrée et de sortie du convertisseur BOOST illustré dans la figure 32 ci-dessous :

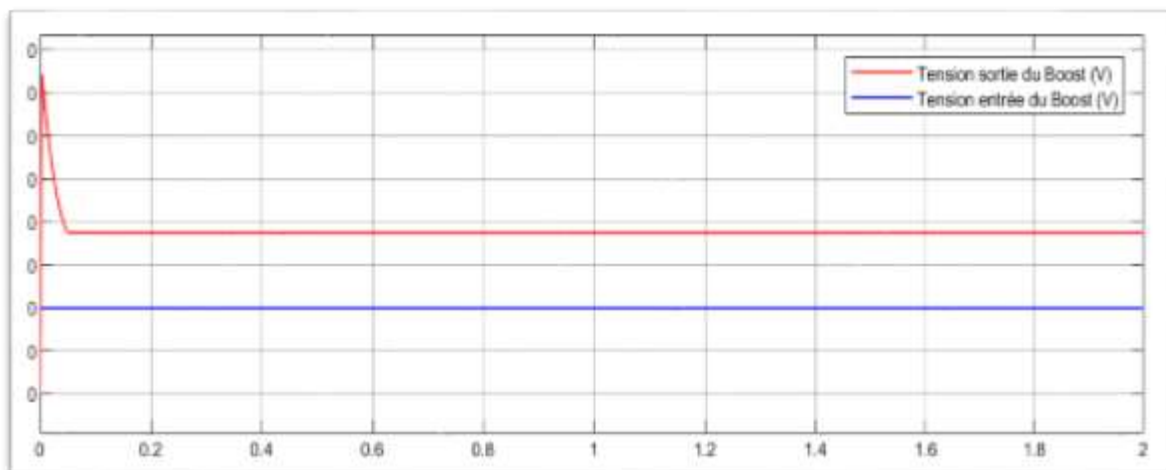


Figure 30: Tension d'Entrée et de Sortie du Convertisseur BOOST.

La figure 32 montre une augmentation de la tension à la sortie du convertisseur. La tension d'entrée, qui provient du système photovoltaïque est efficacement augmentée par le convertisseur pour atteindre une valeur plus élevée en sortie. Cette différence de tension illustre le rôle crucial du convertisseur BOOST dans l'adaptation des niveaux de tension aux exigences spécifiques des charges ou des systèmes de stockage d'énergie.

### III.2.2 Simulation du panneau Photovoltaïque

Les paramètres spécifiques du panneau photovoltaïque utilisé dans notre étude pour la simulation sont présentés dans le tableau 2 ci-dessous. Le modèle est défini par l'utilisateur avec des caractéristiques précises qui permettent une modélisation du système PV.

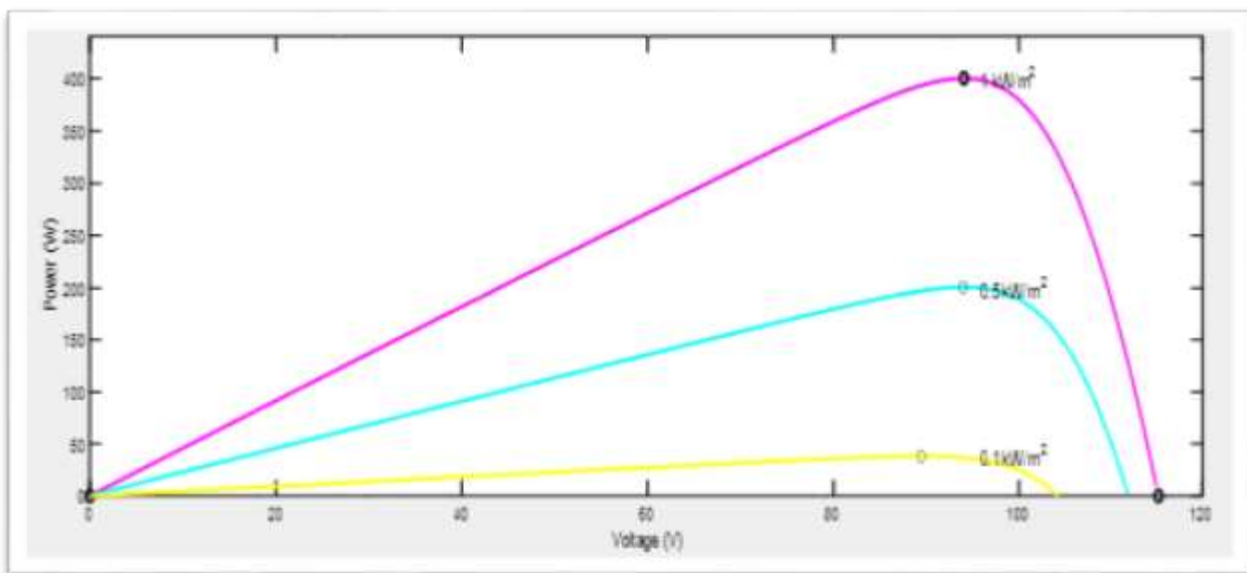
Tableau 2: Les paramètres du panneau photovoltaïque.

Section	Parameter	Value
Array data	Parallel strings	1
	Series-connected modules per string	2
Module data	Module	User-defined
	Maximum Power (W)	203.22
	Cells per module (Ncell)	60
	Open circuit voltage Voc (V)	57.6
	Short-circuit current Isc (A)	4.6
	Voltage at maximum power point Vmp (V)	47
	Current at maximum power point Imp (A)	4.26
	Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.35502
Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.06	
Model parameters	Light-generated current IL (A)	4.6092
	Diode saturation current I0 (A)	1.2872e-10
	Diode ideality factor	1.5395
	Shunt resistance Rsh (ohms)	412.7019
	Series resistance Rs (ohms)	0.02756

### III.2.2.1 Influence de la température et de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque

Nous examinons l'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques puissance-tension des panneaux photovoltaïques. En étudiant ces variations sous différentes conditions environnementales, nous pouvons mieux comprendre les facteurs qui influencent le rendement et l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

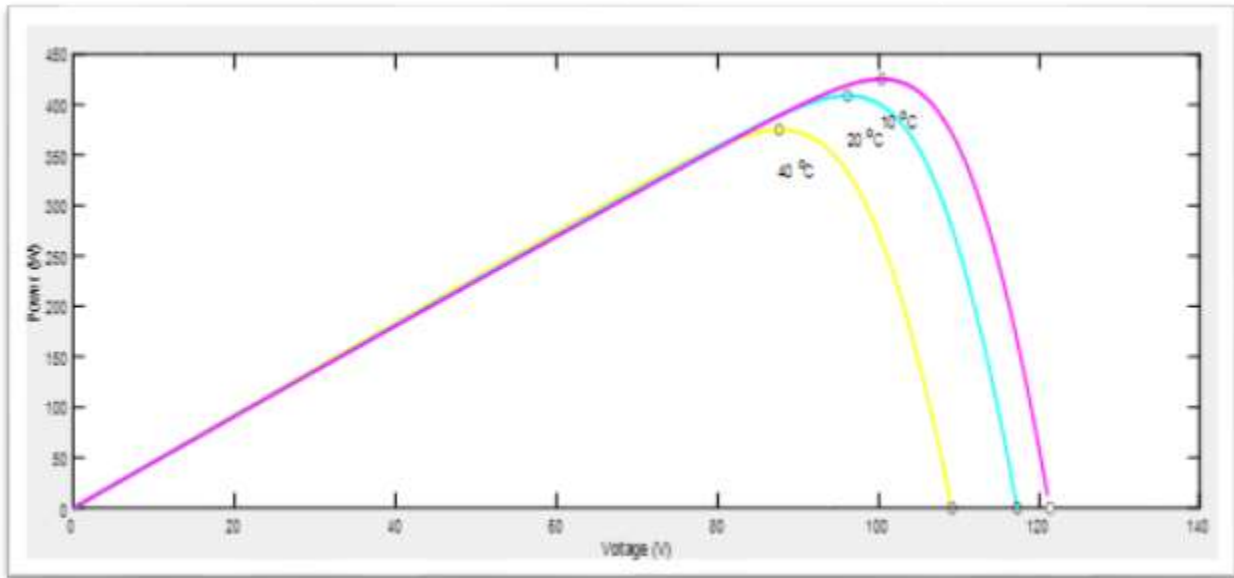
La variation de la caractéristique puissance-tension du panneau photovoltaïque à une température constante de 25°C pour différents niveaux d'éclairement (1 kW/m<sup>2</sup>, 0.5 kW/m<sup>2</sup>, 0.1 kW/m<sup>2</sup>) illustrée dans la figure 33. Cette analyse permet de comprendre l'impact de la lumière incidente sur la production de puissance.



**Figure 31: Variation de la caractéristique puissance-tension du panneau photovoltaïque à une température constante de 25°C pour différents niveaux d'éclairement.**

D'après la figure 33, nous constatons que l'augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation significative de la puissance de sortie. À un éclairement de 1 kW/m<sup>2</sup>, la puissance maximale est nettement supérieure à celle obtenue avec des éclairements de (0.5 kW/m<sup>2</sup> et 0.1 kW/m<sup>2</sup>). Cela souligne l'importance de maintenir un niveau d'éclairement optimal pour maximiser l'efficacité des panneaux photovoltaïques.

La figure 34 illustre la variation de la caractéristique puissance-tension du panneau photovoltaïque pour différentes températures (40°C, 20°C, 10°C) avec un éclairement constant de 1000 W/m<sup>2</sup>. Cette analyse permet de comprendre l'influence de la température sur les performances du panneau.



**Figure 32: Variation de la caractéristique puissance/tension du panneau photovoltaïque pour différentes températures avec un éclairement constant de 1000 W/m<sup>2</sup>.**

Nous observons que la puissance maximale diminue avec l'augmentation de la température. Par exemple, à 40°C, la puissance est inférieure à celle mesurée à 20°C et 10°C. Cette diminution est due à la réduction de la tension du circuit ouvert à des températures plus élevées, ce qui affecte négativement l'efficacité globale du panneau photovoltaïque.

Ces analyses soulignent l'importance de contrôler et d'optimiser les conditions environnementales, telles que la température et l'éclairement, pour maximiser la performance des systèmes photovoltaïques. Une compréhension approfondie de ces effets permet d'améliorer le design et l'installation des panneaux pour une production énergétique plus efficace.

### III.2.3 Simulation du système photovoltaïque avec des algorithmes de commande MPPT

Cette partie présente la simulation du système photovoltaïque utilisant différents algorithmes de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). Nous explorerons les performances de la méthode Perturb and Observe (P&O), des réseaux de neurones artificiels (ANN), et de la logique floue (Fuzzy Logic Control) sous diverses conditions environnementales.

### III.2.3.1 Simulation avec la Méthode Perturb and Observe (P&O)

Le schéma bloc de la méthode P&O sous MATLAB/Simulink présenté dans la figure 35. Le schéma montre l'implémentation de la méthode P&O dans un système photovoltaïque. Cette méthode permet de suivre le point de puissance maximale en perturbant et en observant les variations de la puissance.

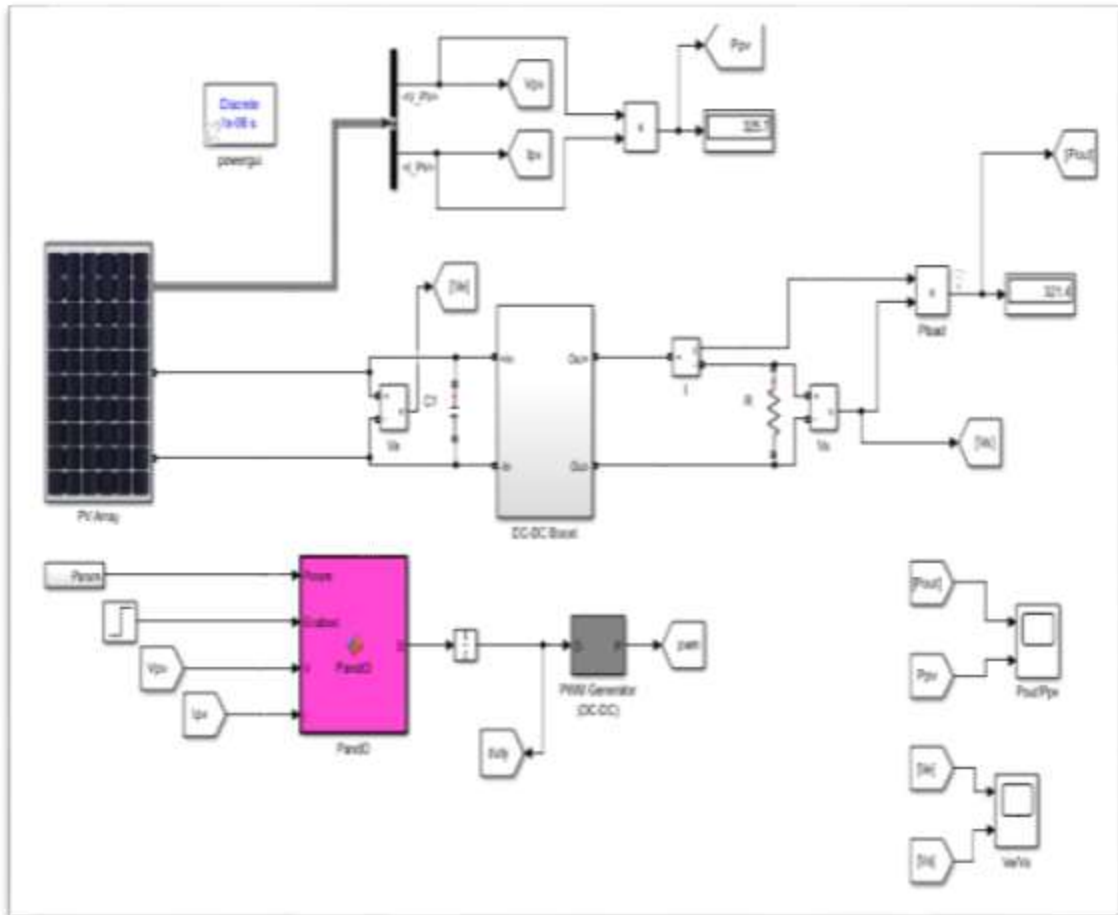
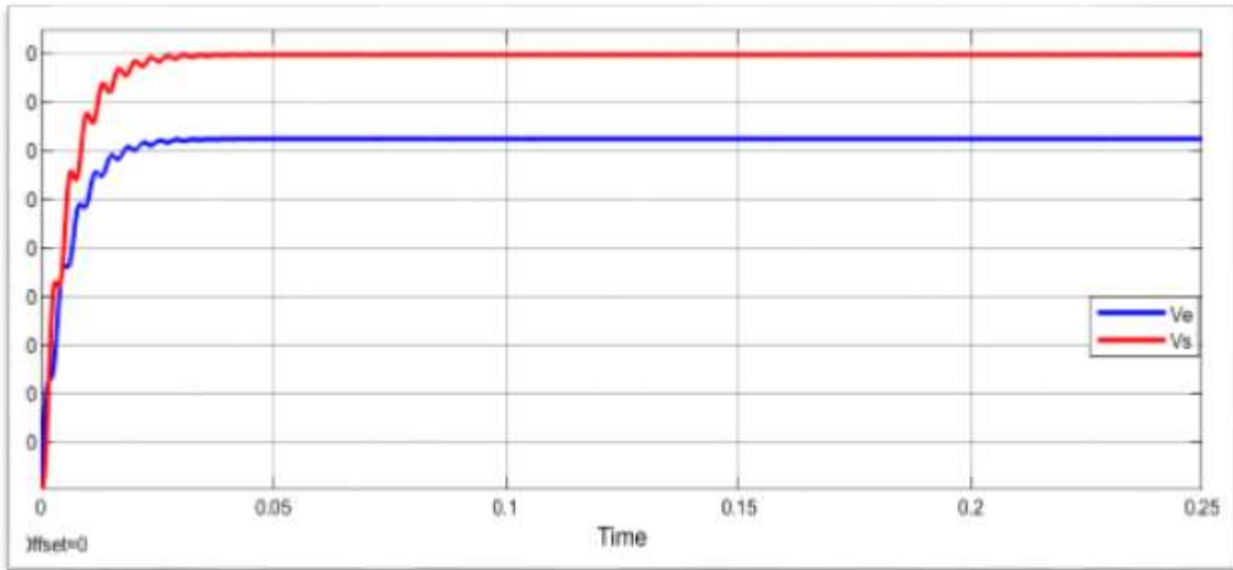


Figure 33: Schéma de simulation du système photovoltaïque adapté par la méthode (P&O) pour la commande MPPT.

#### III.2.3.1.1 Résultats de simulation sous les conditions environnementales constantes

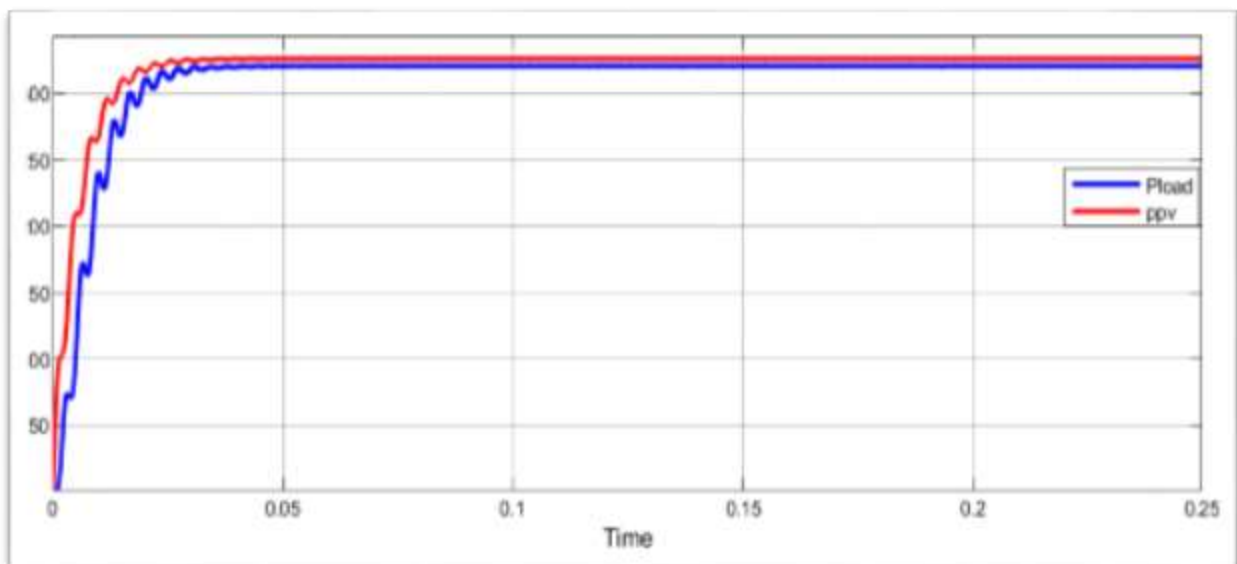
Les résultats de la simulation obtenus par la méthode P&O avec un pas 0.25, sous des conditions environnementales constantes (éclairage de 1000 W/m<sup>2</sup> et température de 25°C),

sont illustrés par les figures ci-dessous :



**Figure 36: La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps (Méthode P&O).**

Les courbes de tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque, illustrées dans la figure 36 montrent que le système régule efficacement la tension sous des conditions environnementales constantes, stabilisant rapidement après les perturbations initiales, démontrant ainsi l'efficacité de la méthode P&O pour maintenir une tension optimale.



**Figure 37: Puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du Temps (Méthode P&O).**

## Chapitre III : Simulations des méthodes MPPT pour système photovoltaïque

La courbe de puissance illustrée dans la figure 37, représente la variation de la puissance générée par le système photovoltaïque ( $P_{pv}$ ) et de la puissance demandée par la charge ( $P_{load}$ ) en fonction du temps.

Les courbes montrent une montée rapide de la puissance au début, qui se stabilise autour de 300 W après une période d'environ 0,05 secondes. La courbe rouge représente la puissance photovoltaïque ( $P_{pv}$ ), tandis que la courbe bleue représente la puissance de la charge ( $P_{load}$ ). On observe que les deux puissances atteignent une valeur quasi stable et identique, ce qui indique une bonne performance du P&O utilisé pour maximiser la puissance extraite du panneau photovoltaïque.

### III.2.3.1.2 Résultats de simulation sous des conditions environnementales variables

#### III.2.3.1.2.1 Variation de l'éclairement avec une Température Constante

Dans cette simulation, l'éclairement varie ( $850 \text{ W/m}^2$ ,  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $600 \text{ W/m}^2$ ) comme représenté dans la figure 38, tandis que la température reste constante à ( $25^\circ\text{C}$ ) pour évaluer la capacité d'adaptation de la méthode P&O. Les résultats dans les figures suivantes montrent comment le système réagit aux changements de l'éclairement en termes de tension, et puissance.

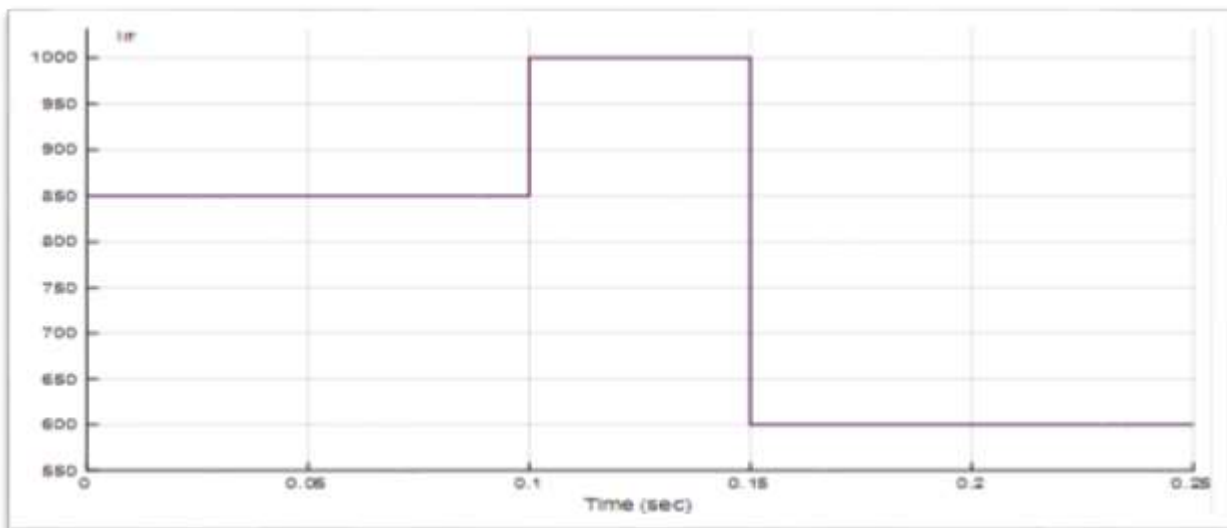
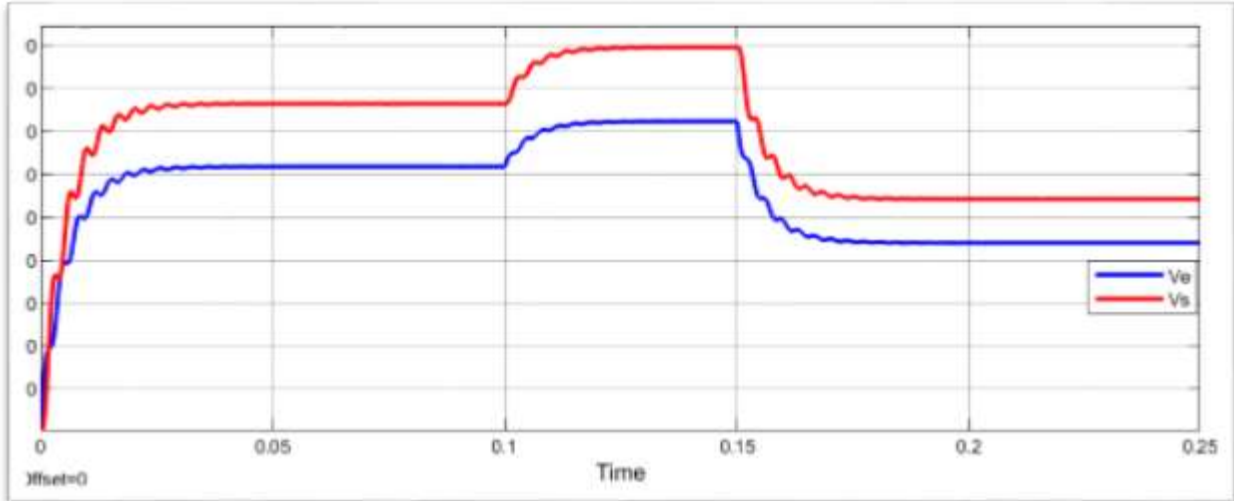


Figure 38 : La variation de l'éclairement en fonction du temps.

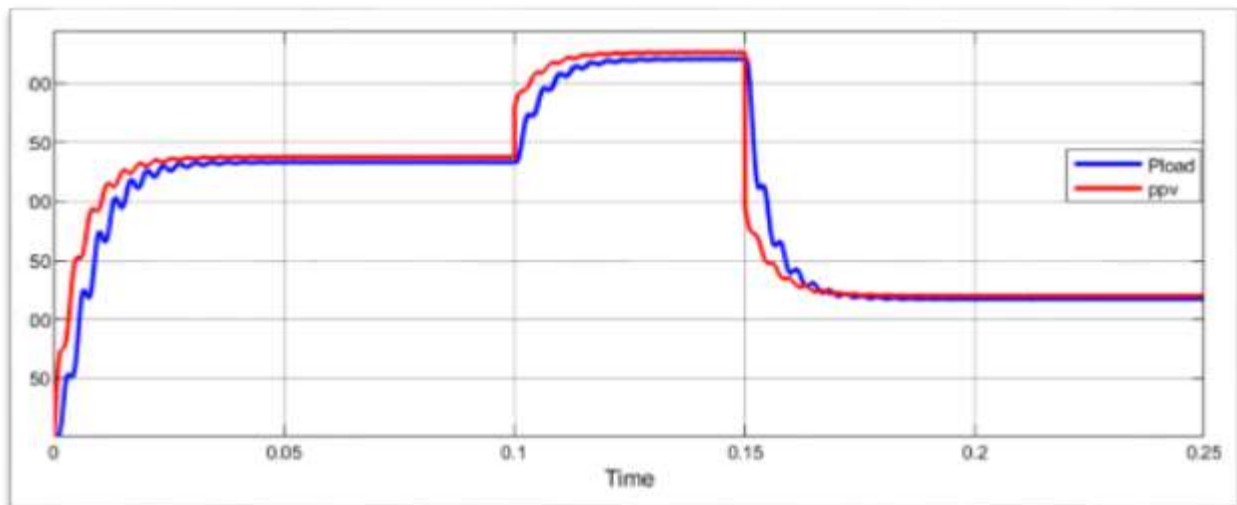


### Chapitre III : Simulations des méthodes MPPT pour système photovoltaïque

Les courbes illustrées dans la figure 39 montre la variation des tensions  $V_e$  (en rouge) et  $V_s$  (en bleu) en fonction du temps. On observe que les deux tensions augmentent rapidement et se stabilisent avant de subir une chute brusque vers 0,15 secondes. Ce comportement indique une transition ou une perturbation dans le système, suivie d'une nouvelle stabilisation.



**Figure 39: La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps (Méthode P&O).**



**Figure 40: Puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du Temps (Méthode P&O).**

Les courbes représentées dans la figure 40 montrent une montée rapide de la puissance au début, suivie d'une stabilisation, indiquant une bonne performance de la méthode P&O pour maximiser la puissance extraite du panneau photovoltaïque. Cette dynamique de réponse rapide est essentielle pour l'efficacité globale du système.

### III.2.3.1.2.2 Variation de la température avec un éclairement constant

Cette simulation examine les effets des variations de température (40°C, 5°C, 25°C) sur le système photovoltaïque, avec un éclairement constant de 1000 W/m<sup>2</sup> comme il est représenté dans la figure 41.

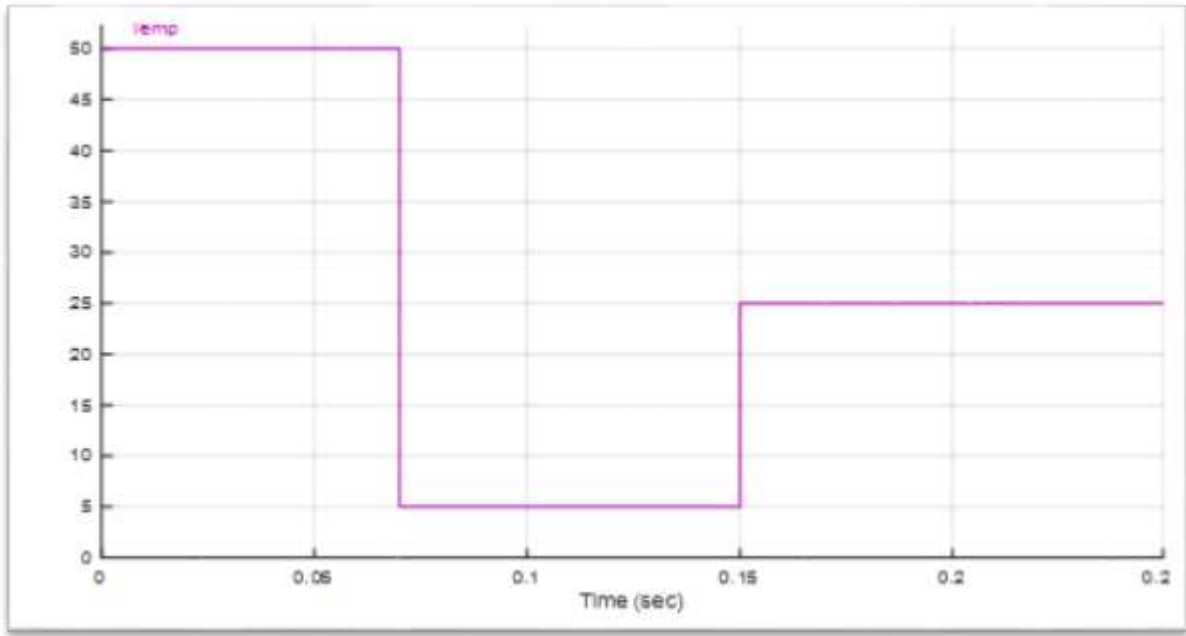


Figure 41: La variation de la température en fonction du temps.

Les figures ci-dessous montrent comment le système réagit aux changements de la température en termes de tension, courant et puissance.

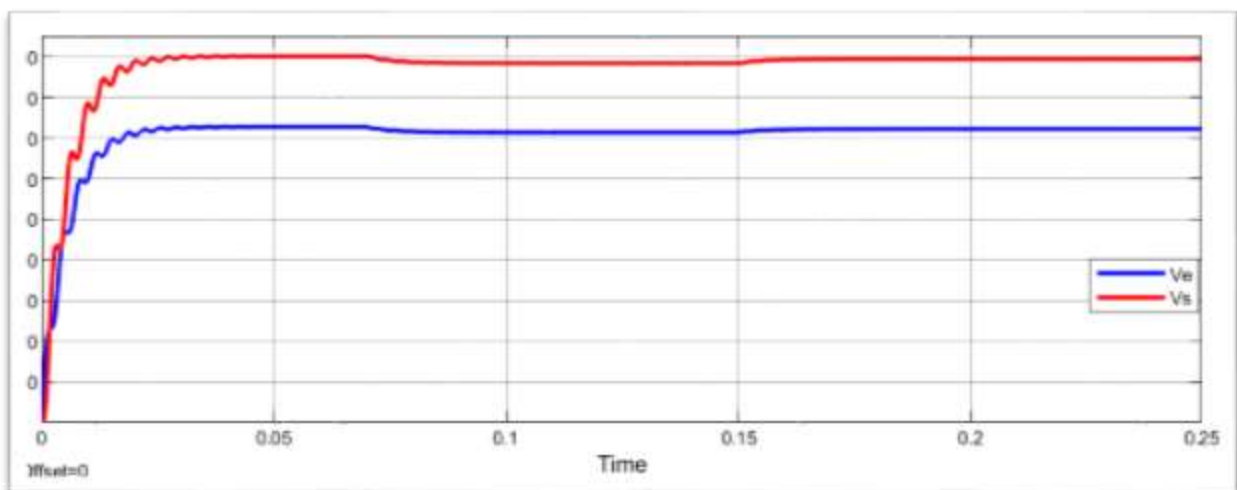
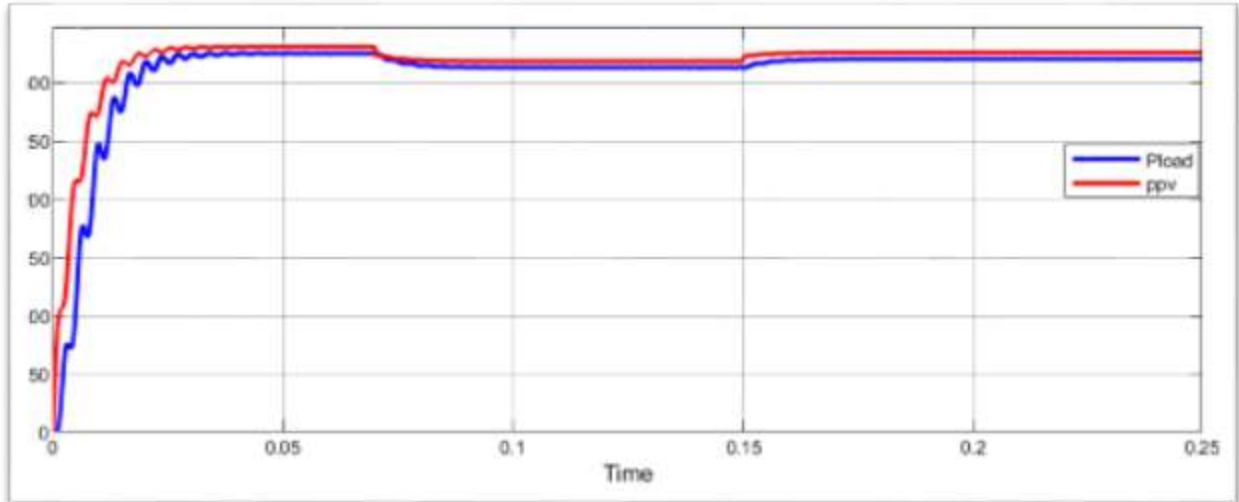


Figure 42: La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps.

### Chapitre III : Simulations des méthodes MPPT pour système photovoltaïque

Les courbes de tension d'entrée ( $V_e$ ) et de sortie ( $V_s$ ) représentées dans la figure 42 montrent que le système photovoltaïque, sous une température variable et un éclairement constant, atteint une stabilité rapide des tensions d'entrée et de sortie grâce à la méthode Perturb and Observe. La tension de sortie est maintenue à un niveau supérieur à la tension d'entrée, indiquant un fonctionnement efficace du système de régulation ou de conversion utilisé.



**Figure 43: Puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du Temps.**

La courbe de puissance représentée dans la figure 43 montre que le système photovoltaïque, sous une température variable et un éclairement constant, atteint une stabilité rapide des puissances d'entrée et de sortie grâce à la méthode Perturb and Observe. La puissance d'entrée et la puissance de sortie se stabilisent autour de la même valeur, indiquant un fonctionnement efficace du système de régulation ou de conversion utilisé.

#### III.2.3.1.3 Analyse et Synthèse des Résultats de la Méthode P&O

Les résultats des simulations avec la méthode P&O montrent une capacité notable d'adaptation du système photovoltaïque aux variations de l'éclairement et de la température.

Les données révèlent une relation proportionnelle entre l'éclairement et la production de puissance. Lorsque l'éclairement augmente, la puissance produite augmente proportionnellement, et lorsque l'éclairement diminue, elle diminue de manière

### **Chapitre III : Simulations des méthodes MPPT pour système photovoltaïque**

correspondante. Cette capacité d'ajustement permet au système de maximiser l'efficacité énergétique sous des conditions environnementales changeantes.

En ce qui concerne les variations de température, les résultats indiquent une tendance inverse entre la température et la production de puissance. Lorsque la température augmente, la puissance générée par le panneau photovoltaïque diminue, et vice versa, soulignant l'importance de la gestion thermique pour maintenir une performance optimale du système.

La régulation de la tension par la méthode P&O se montre efficace, permettant des ajustements rapides pour maintenir des niveaux de tension optimaux malgré les variations de l'éclairement et de la température. La méthode P&O démontre ainsi une robustesse et une fiabilité dans la maximisation de la production de puissance, même dans des environnements où les conditions climatiques sont instables. Ces observations confirment que la méthode P&O est une solution viable pour l'optimisation de la performance des systèmes photovoltaïques, offrant un bon équilibre entre simplicité de mise en œuvre et efficacité opérationnelle.

#### **III.2.3.2 Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT basée sur ANN (Artificial Neural Network)**

Le schéma de simulation du système photovoltaïque utilisant la méthode ANN (Artificial Neural Network) pour la commande MPPT et le sous-système ANN sont présentés respectivement dans les figures 44 et 45. Ces schémas illustrent l'architecture du système et les interactions entre les composants simulés, mettant en évidence l'utilisation de réseaux de neurones pour optimiser le suivi du point de puissance maximale.

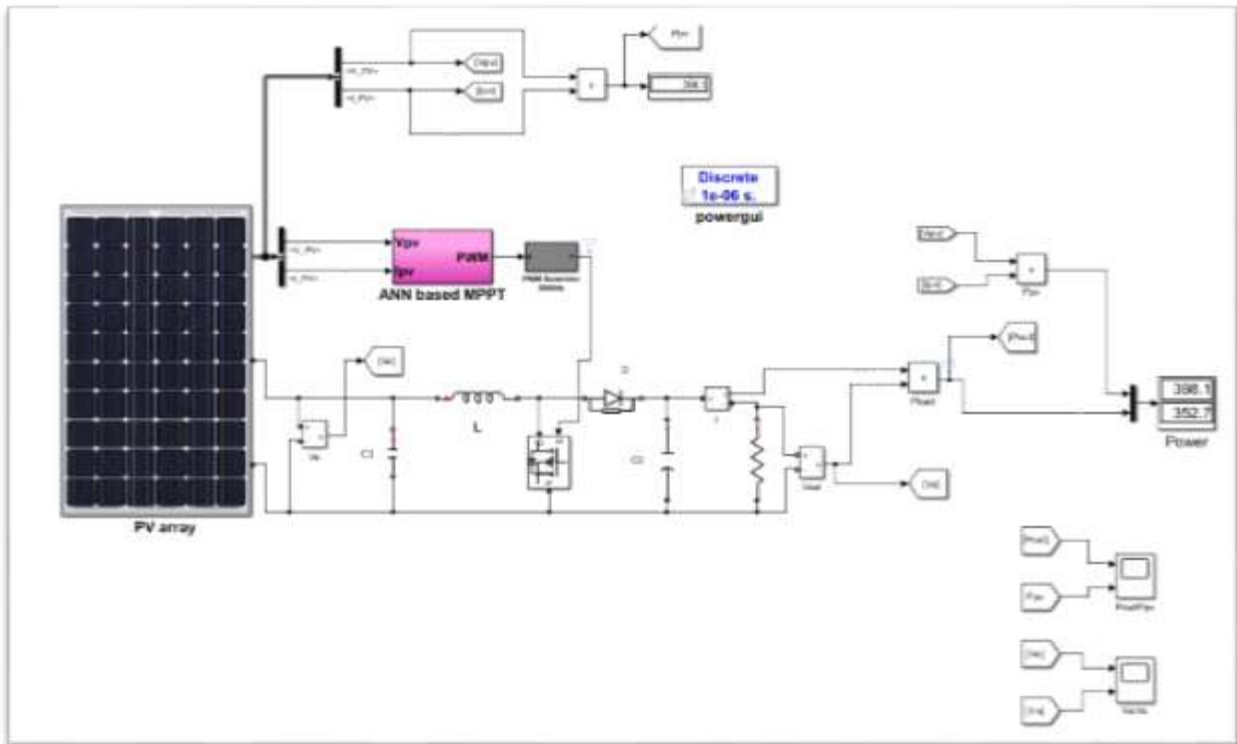


Figure 44: Schéma de simulation du système photovoltaïque adapté par la méthode ANN pour la commande MPPT.

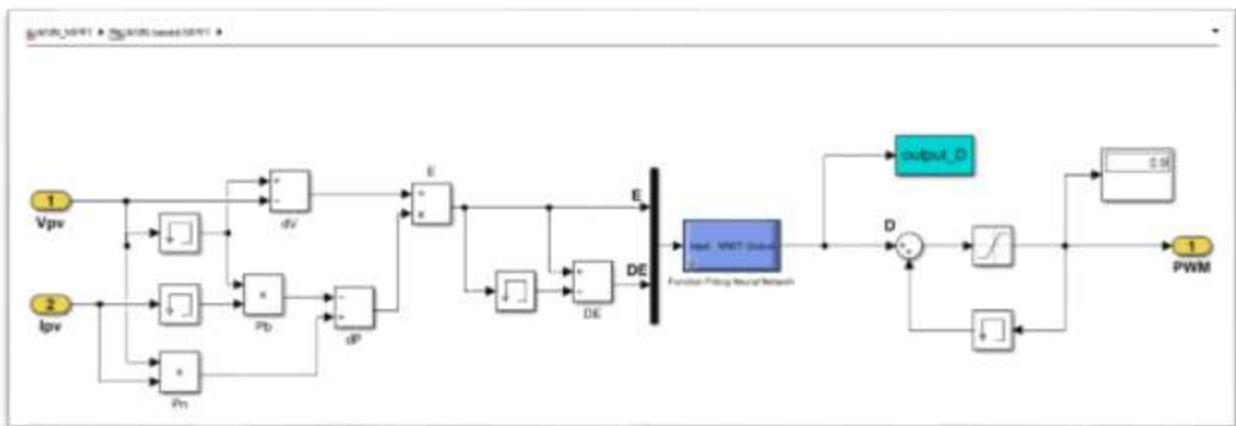


Figure 34: Schéma de simulation de sous-système ANN.

### III.2.3.2.1 Résultats de simulation sous les conditions environnementales constantes

Cette simulation teste le système photovoltaïque sous un éclairage constant de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ , pour évaluer la performance de la méthode ANN sous des conditions stables.

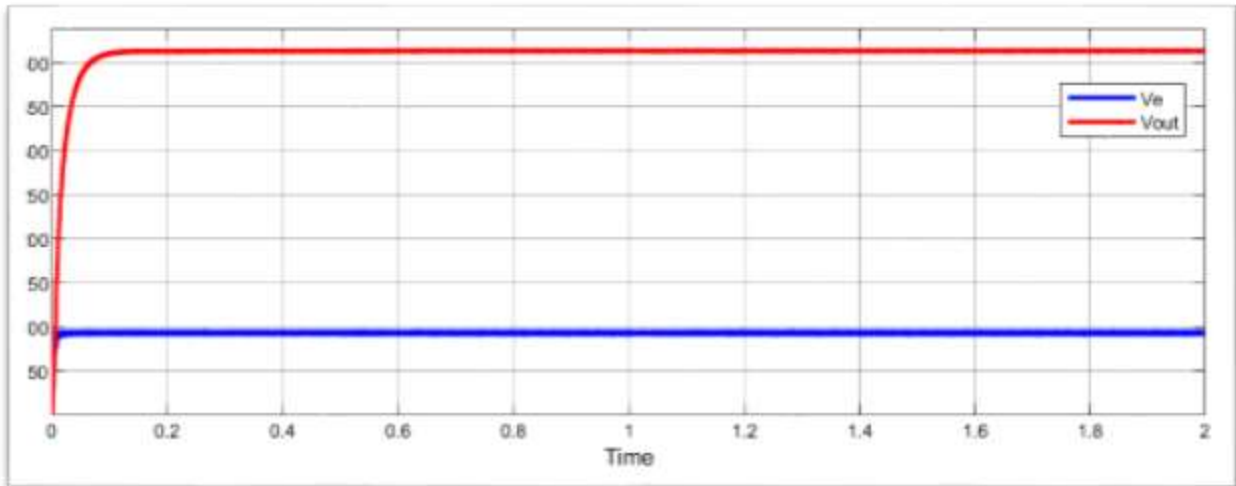


Figure 46 : La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps

La courbe de puissance illustrée dans la figure 47 illustre que la méthode de réseau de neurones assure une régulation efficace de la puissance, avec une montée rapide initiale suivie d'une stabilisation.

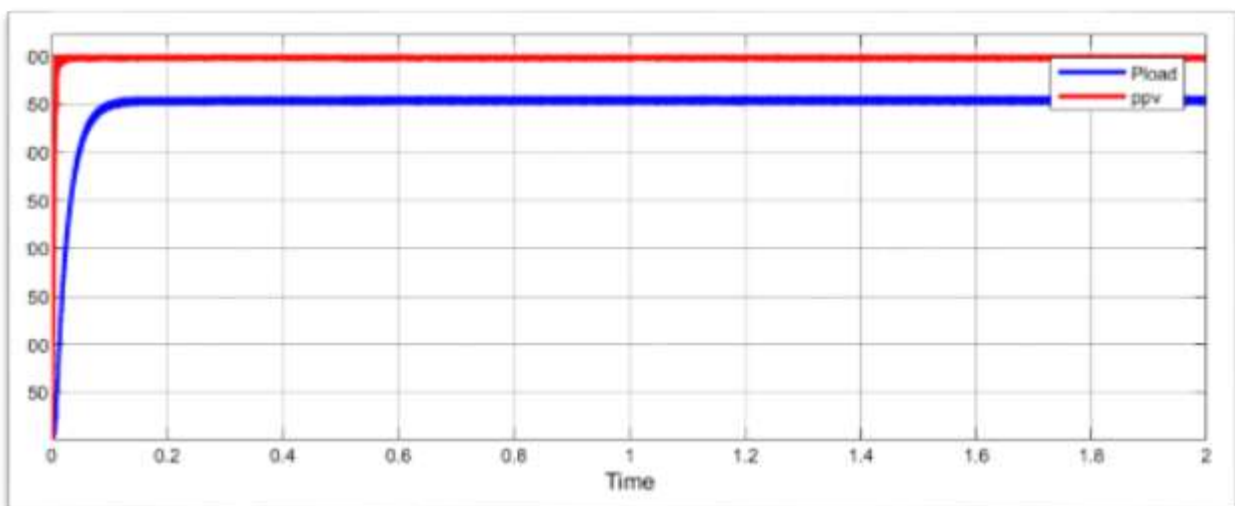


Figure 47 : Puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du Temps.

### Chapitre III : Simulations des méthodes MPPT pour système photovoltaïque

Les résultats de cette simulation montrent que la méthode ANN offre une performance exceptionnelle sous des conditions environnementales constantes. Les réseaux de neurones permettent une optimisation rapide et précise de la tension, du courant et de la puissance, surpassant les méthodes traditionnelles.

#### III.2.3.2.2 Résultats de simulation sous des conditions environnementales variables

##### III.2.3.2.2.1 Variation de l'éclairement avec une Température Constante

Dans cette simulation, l'éclairement varie ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $600 \text{ W/m}^2$ ,  $850 \text{ W/m}^2$ ) tandis que la température reste constante à  $25^\circ\text{C}$  comme il est illustré dans la figure 48, pour évaluer la capacité d'adaptation de la méthode ANN. Les résultats de la simulation obtenus avec un pas de 2s sont illustrés par les figures ci-dessous :

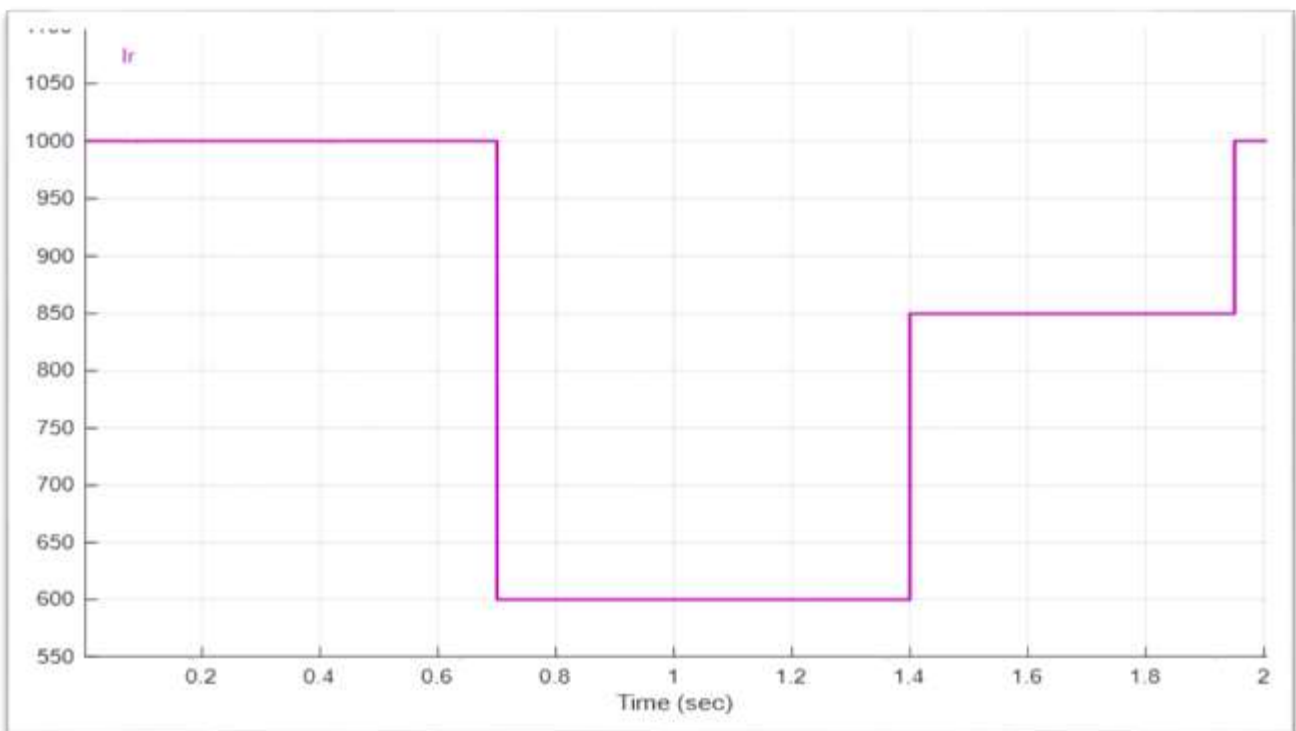


Figure 48: La variation de l'éclairement en fonction du temps.

Les courbes de tension présentée dans la figure 49 montrent que, sous des variations d'éclairement et des températures constantes, la méthode de réseau de neurones permet de gérer efficacement les fluctuations de la tension de sortie du panneau photovoltaïque. Après une réponse initiale rapide, le système stabilise la tension de sortie malgré les variations soudaines, tout en maintenant une tension d'entrée relativement stable.

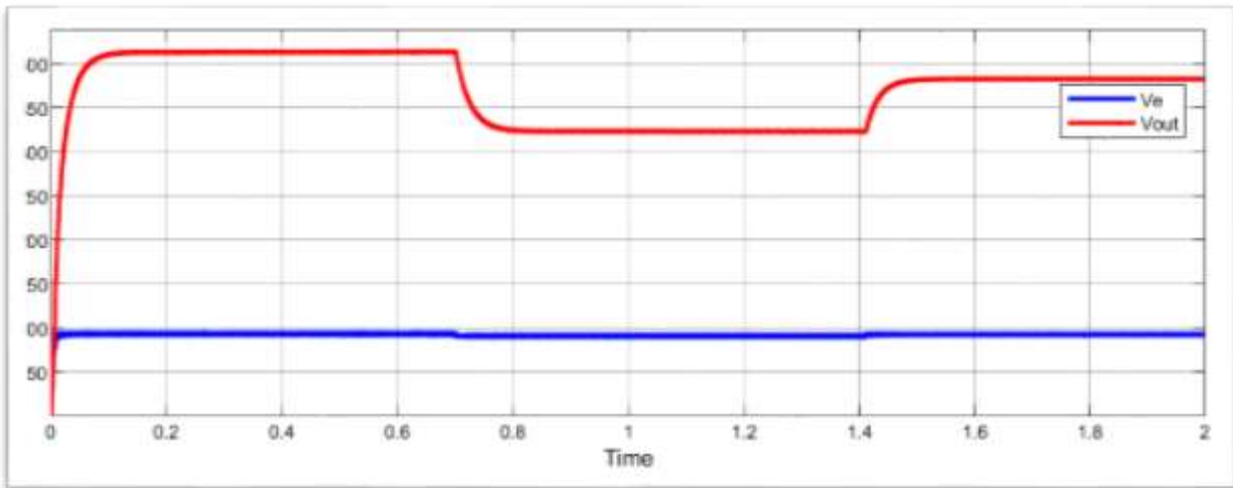


Figure 49: La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps.

Les courbes représentées dans la figure 50 illustrent la puissance générée par le panneau photovoltaïque et la puissance consommée par la charge en fonction du temps, sous des variations d'éclairement et des températures constantes.

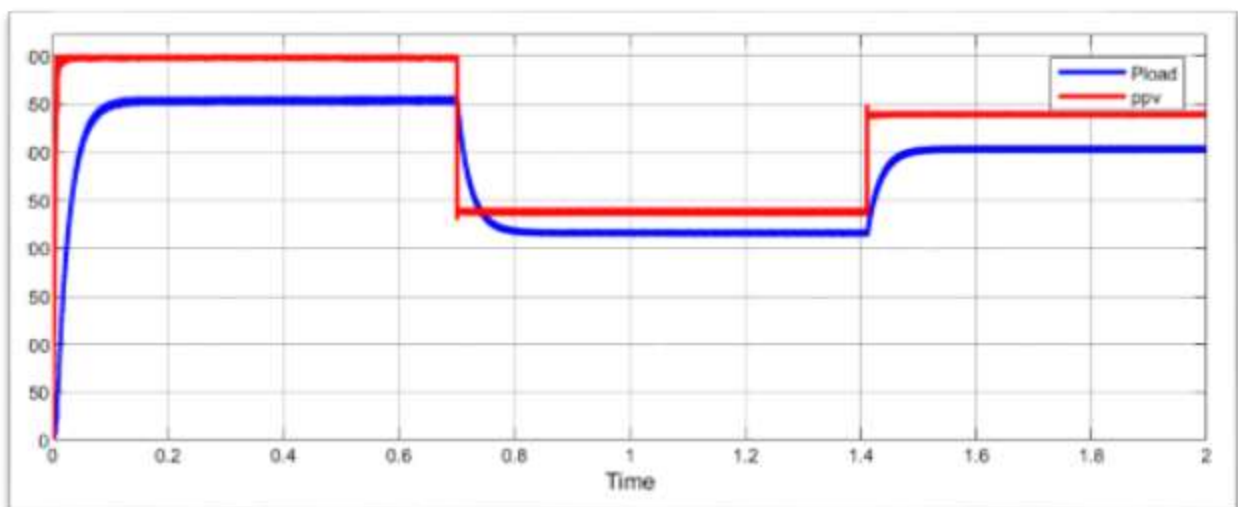


Figure 50: Puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du Temps.



### III.2.3.2.2 Variation de la Température avec un Éclairement Constant

Cette simulation examine les effets des variations de température (26°C, 10°C et 16°C) sur le système photovoltaïque, avec un éclairement constant de 1000 W/m<sup>2</sup> comme il est représenté dans la figure 51. Les résultats dans les figures suivantes montrent comment le système réagit aux changements de la température en termes de tension, courant et puissance.

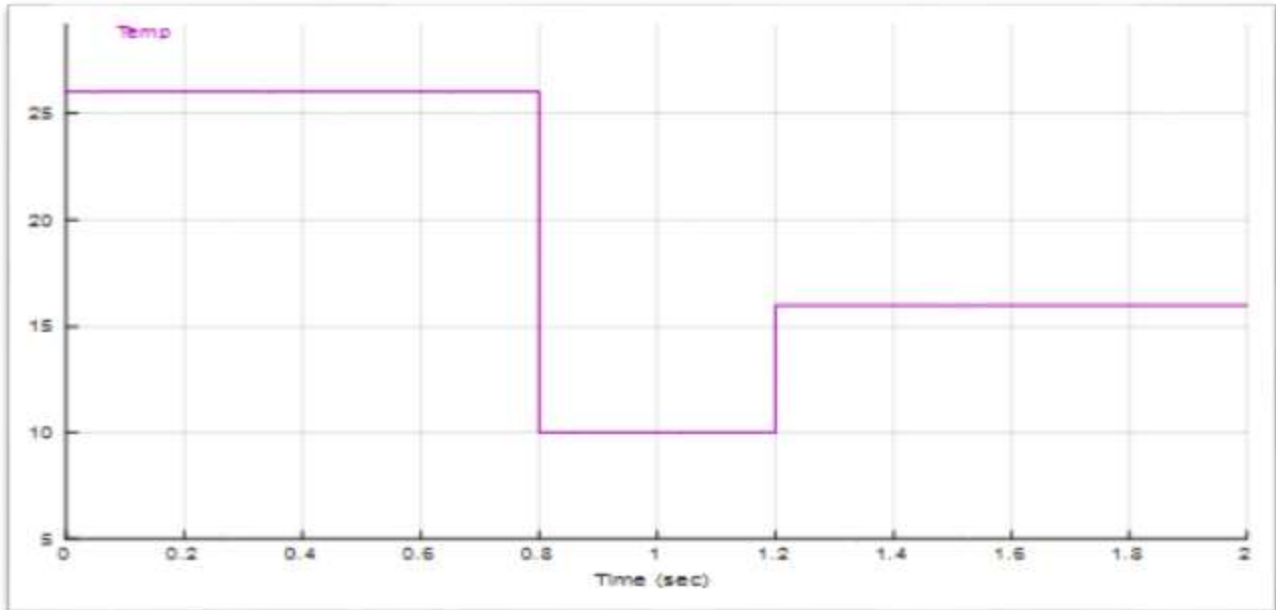
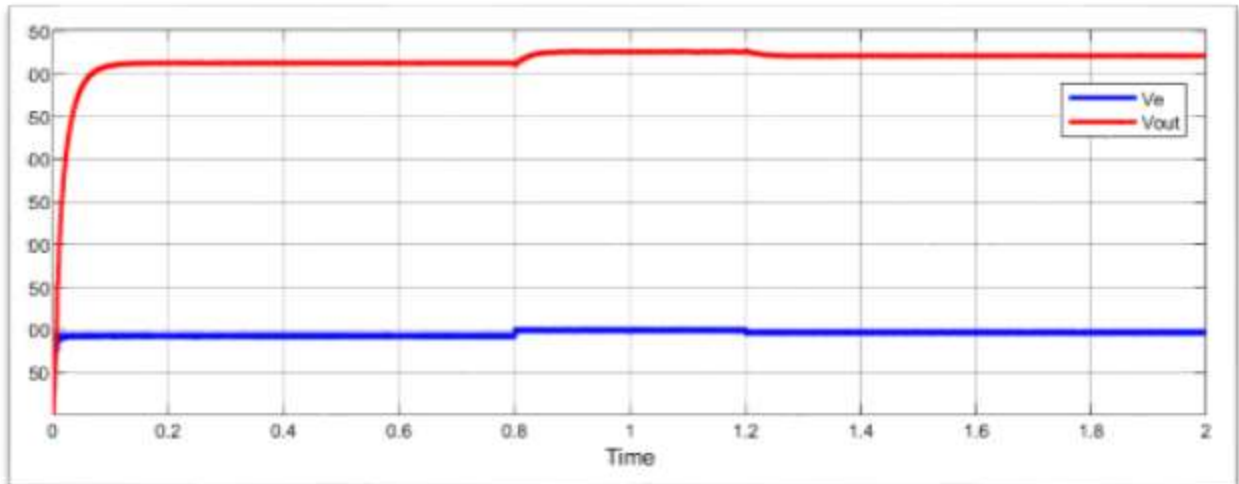


Figure 51: La variation de la température en fonction du temps.

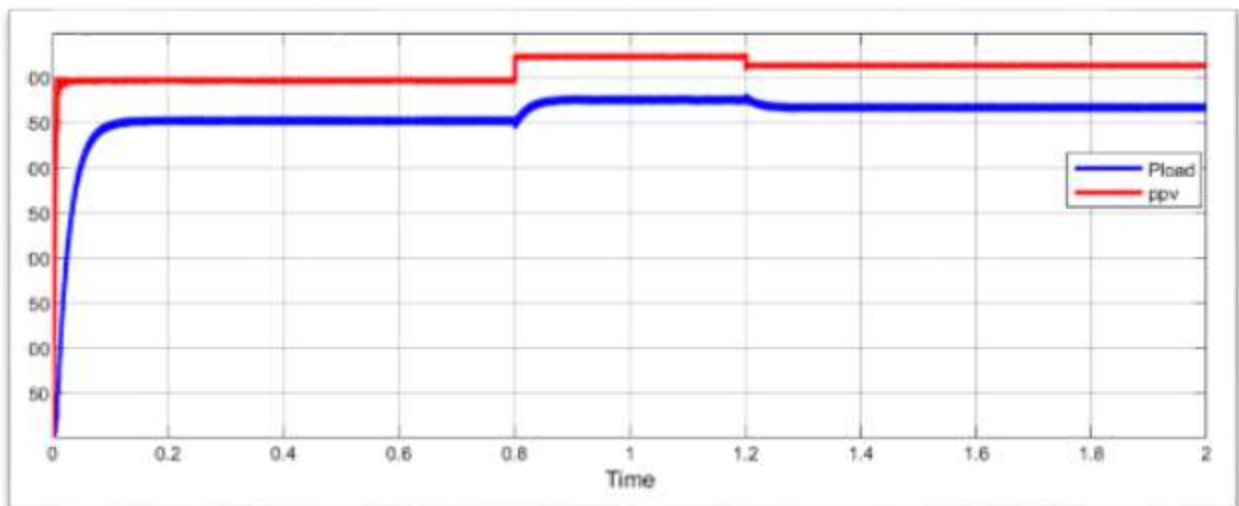
Les courbes illustrées dans la figure 52 montre l'évolution des tensions d'entrée ( $V_e$ ) et de sortie ( $V_{out}$ ) d'un panneau photovoltaïque en fonction du temps, sous une variation de température et un éclairage constant.

Sachant que la tension d'entrée reste stable Sous un éclairage constant tandis que la tension de sortie s'ajuste initialement puis se stabilise, avec une légère perturbation en cours de processus.



**Figure 52: La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps.**

La courbe de puissance illustré dans la figure 53 montre que sous un éclairage constant, la puissance de sortie du panneau photovoltaïque reste stable, tandis que la puissance d'entrée s'ajuste initialement puis se stabilise avec une légère perturbation en cours de processus. La méthode du réseau de neurones semble efficace pour maintenir la stabilité des puissances malgré les variations de température.



**Figure 53: La puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en fonction du temps.**

### III.2.3.2.3 Analyse et Synthèse des Résultats de la Méthode ANN

Les simulations montrent que la méthode de commande MPPT basée sur les réseaux de neurones artificiels (ANN) optimise efficacement la production d'énergie des systèmes photovoltaïques sous des conditions environnementales variées. Sous des conditions constantes d'un éclairage et une température, la puissance atteint rapidement son maximum et se maintient, démontrant l'efficacité de la méthode ANN pour maximiser la production d'énergie. En conditions environnementales variables, l'éclairage changeant à température constante montre une adaptation rapide et efficace du système, avec une augmentation de la puissance en fonction de l'éclairage, indiquant une relation proportionnelle claire. Lorsque la température varie avec un éclairage constant, la puissance diminue avec l'augmentation de la température et augmente lorsque la température baisse. La tension est régulée de manière efficace et précise par la méthode ANN, maintenant un niveau optimal malgré les variations de température.

### III.2.3.3 Simulation du Système Photovoltaïque avec la Commande MPPT Basée sur la Logique Floue

Le schéma de simulation illustré dans la figure 54 présenté ci-dessous est utilisé pour évaluer la méthode MPPT basée sur la logique floue. Ce schéma comprend le sous-système FLC (Fuzzy Logic Controller) présenté dans la figure 55 qui est intégré dans l'environnement Simulink pour simuler les performances du système photovoltaïque.

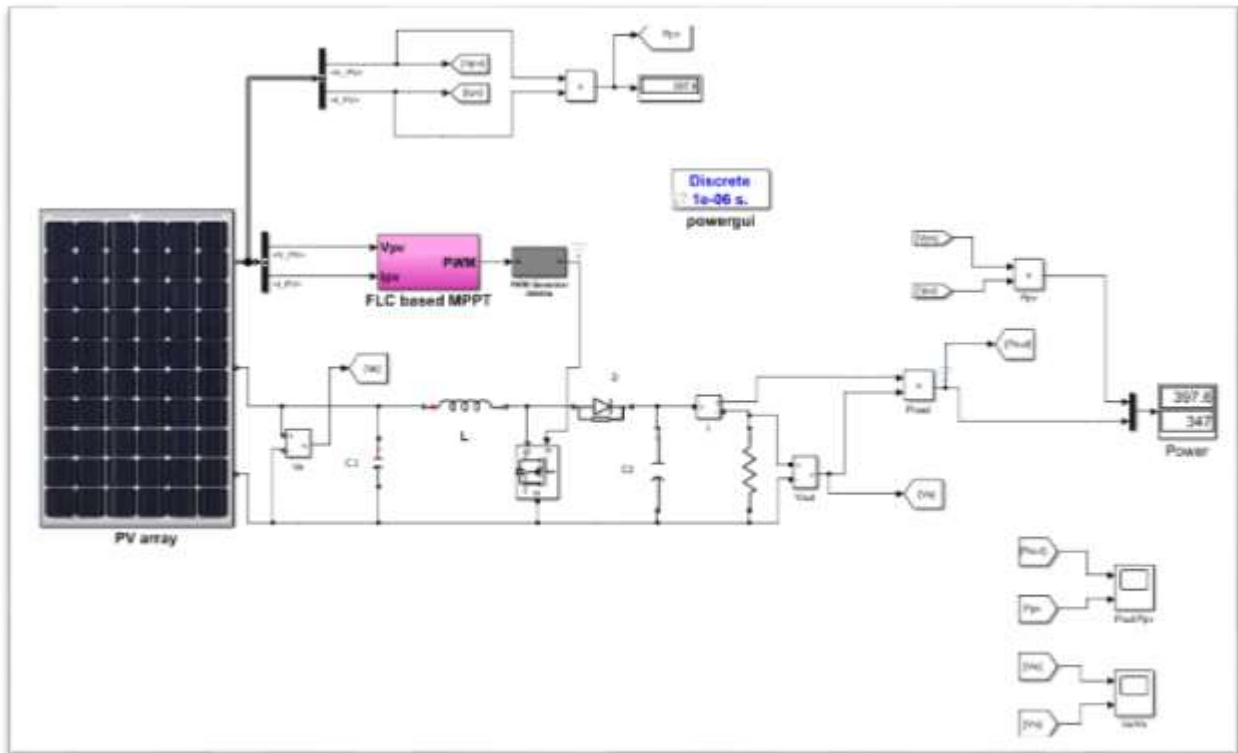


Figure 54: Schéma de simulation du système photovoltaïque adapté par la méthode la logique floue pour la commande MPPT

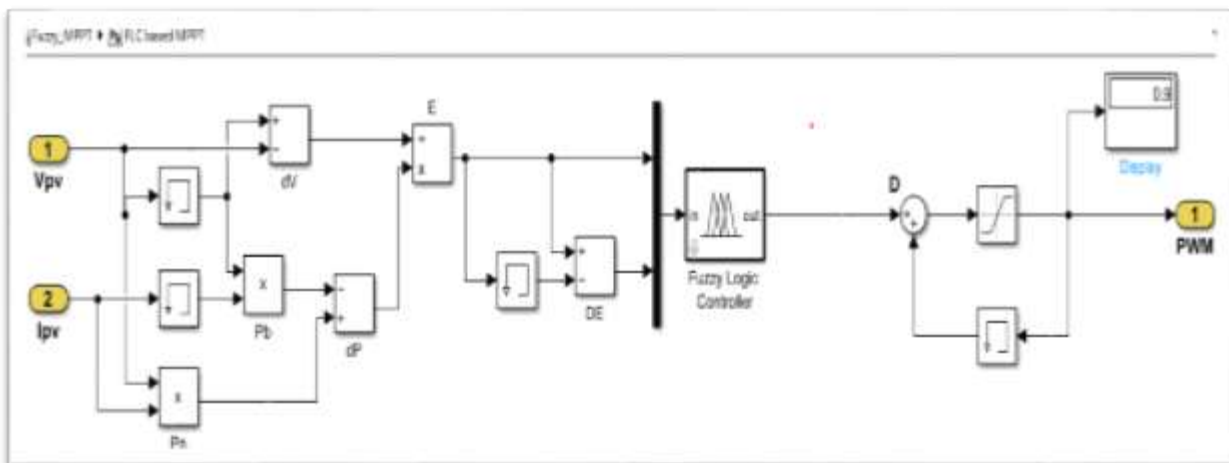
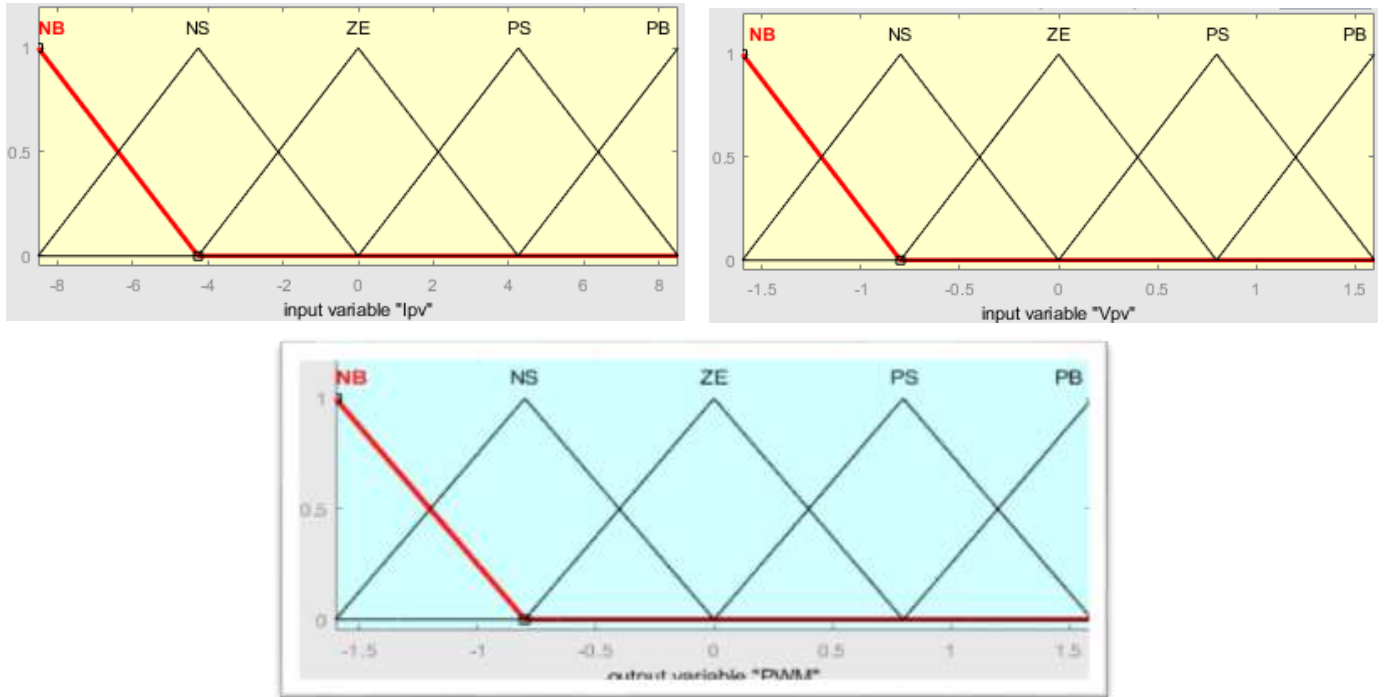


Figure 55: Le schéma Simulation de sous-système FLC.

### III.2.3.3.1 Fonctions d'Appartenance des Variables d'Entrée et de Sortie

La figure 56 suivante montre les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie utilisées dans le fichier FIS (Fuzzy Inference System) pour la commande MPPT basée sur la logique floue.



**Figure 56: Fonctions d'Appartenance des Variables d'Entrée et de Sortie pour la Méthode MPPT Basée sur la Logique Floue.**

#### III.2.3.3.2 Résultats de simulation sous les conditions environnementales constantes

Les simulations ont été effectuées sous des conditions environnementales constantes avec un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ . Cela permet d'évaluer la performance de la méthode MPPT basée sur la logique floue dans un environnement stable. Les résultats sont illustrés dans les figures suivantes.

La courbe de tension présentée dans la figure 57 reste stable et montre que la méthode de logique floue permet une régulation efficace de la puissance, avec une augmentation initiale rapide et une stabilisation subséquente. Les résultats démontrent l'efficacité de la méthode floue dans le suivi et la maximisation de la puissance sous des conditions thermiques fluctuantes.

La courbe de puissance présentée dans la figure 58 montre que la méthode de logique floue permet une régulation efficace de la puissance, avec une augmentation initiale rapide et une stabilisation subséquente. Les résultats démontrent l'efficacité de la méthode floue dans le suivi et la maximisation de la puissance sous des conditions thermiques fluctuantes.

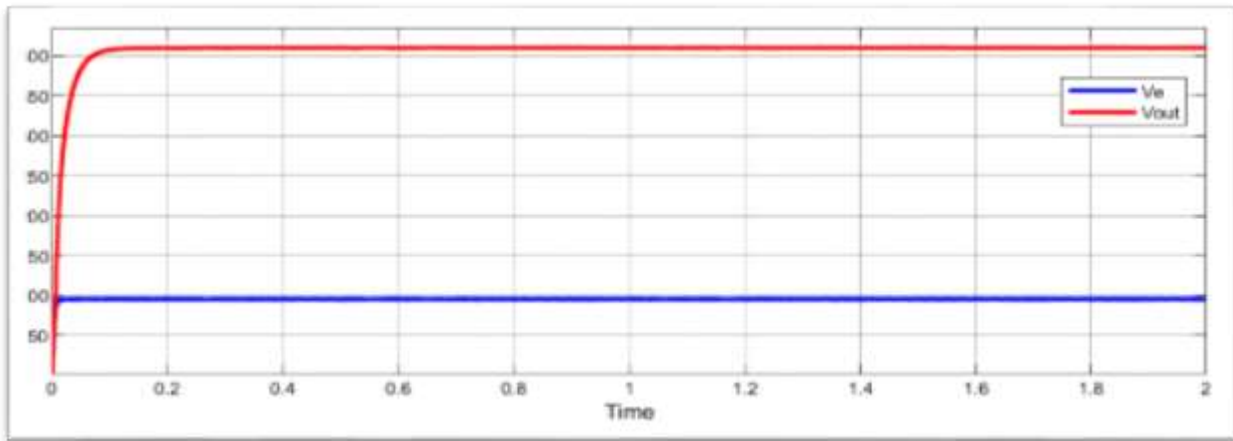


Figure 57: La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en Fonction du Temps.

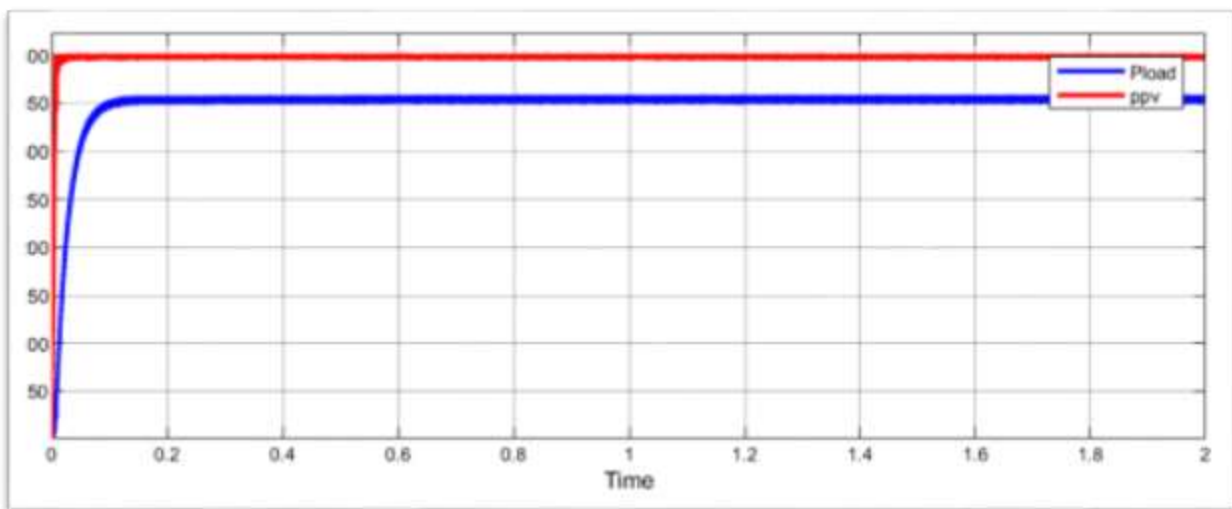
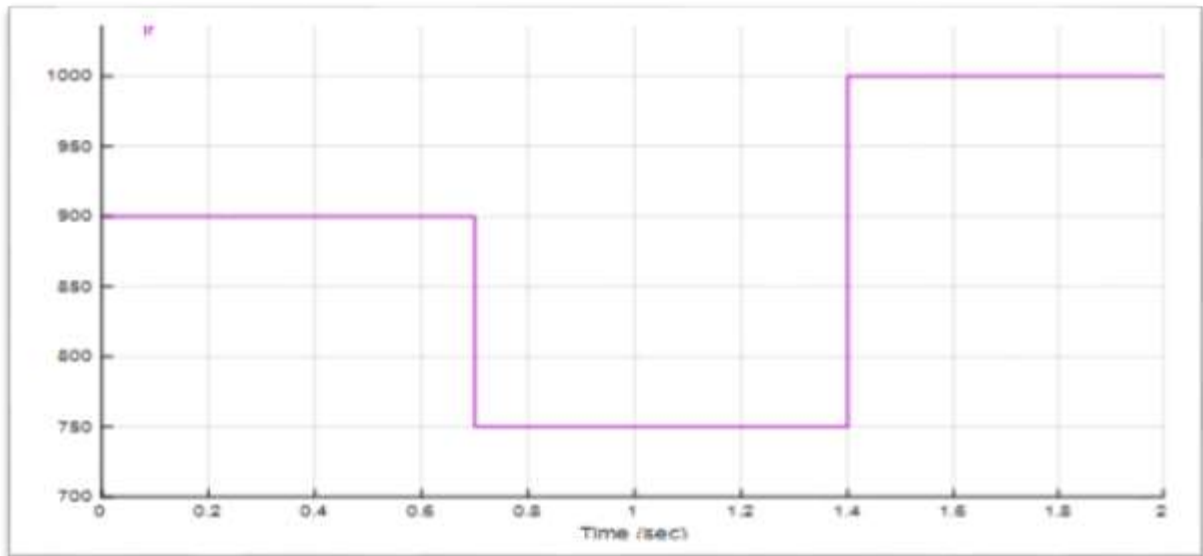


Figure 58: La puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en Fonction du Temps.

### III.2.3.3.3 Résultats de simulation sous des Conditions Environnementales Variables

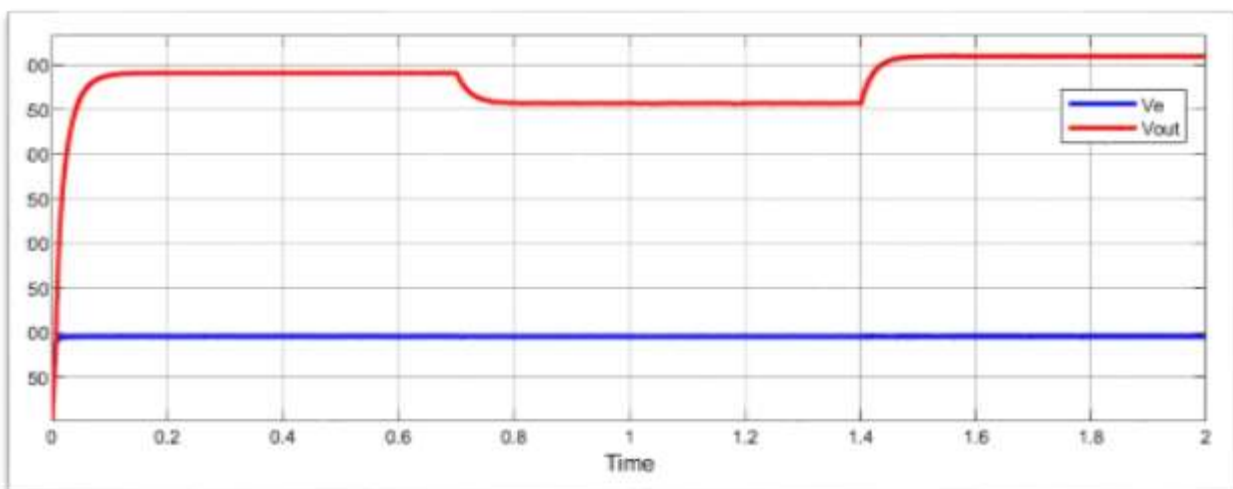
#### III.2.3.3.3.1 Variation de l'éclairement avec une Température Constante

Cette simulation évalue la performance du système sous différentes conditions d'éclairement ( $900 \text{ W/m}^2$ ,  $750 \text{ W/m}^2$ ,  $1000 \text{ W/m}^2$ ) avec une température constante de  $25^\circ\text{C}$ , comme il est présenté dans la figure 59. Cela permet d'analyser l'adaptabilité du système à des variations rapides de l'éclairement. Les résultats sont illustrés dans les figures suivantes.



**Figure 59: La variation de l'éclairement en fonction du temps.**

Les courbes illustrées dans la figure 60 illustrent les tensions d'entrée ( $V_e$ ) et de sortie ( $V_s$ ) d'un panneau photovoltaïque en fonction du temps, sous une variation de l'éclairement avec une température constante. Ces courbes montrent que le système photovoltaïque, sous une variation de l'éclairement avec une température constante, atteint rapidement une stabilité des tensions d'entrée et de sortie grâce à la commande logique floue. Les oscillations initiales indiquent des ajustements en réponse aux variations d'éclairement, mais le système parvient à stabiliser les tensions efficacement. La légère supériorité de la tension de sortie sur la tension d'entrée après stabilisation démontre l'efficacité de la régulation effectuée par le système.



**Figure 60 : La tension d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en Fonction du Temps.**

### Chapitre III : Simulations des méthodes MPPT pour système photovoltaïque

Les courbes illustrées dans la figure 61 montrent l'évolution de la puissance d'entrée (Pload) et de sortie (Ppv) d'un panneau photovoltaïque en fonction du temps sous variation d'éclairement avec une température constante, en utilisant la méthode de la logique floue.

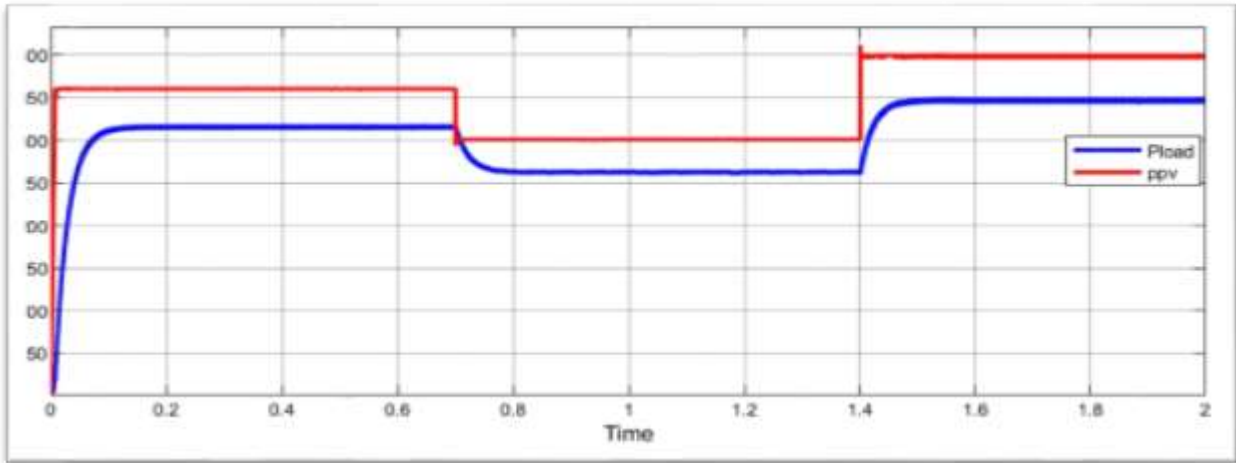


Figure 61: La puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en Fonction du Temps.

#### III.2.3.3.2 Variation de la Température avec un Éclairement Constant

Cette simulation examine l'effet des variations de température (26°C, 10°C, 16°C) sur le système photovoltaïque sous un éclairement constant de 1000 W/m<sup>2</sup>, comme il est illustré dans la figure 62. Les résultats sont représentés dans les figures suivantes.

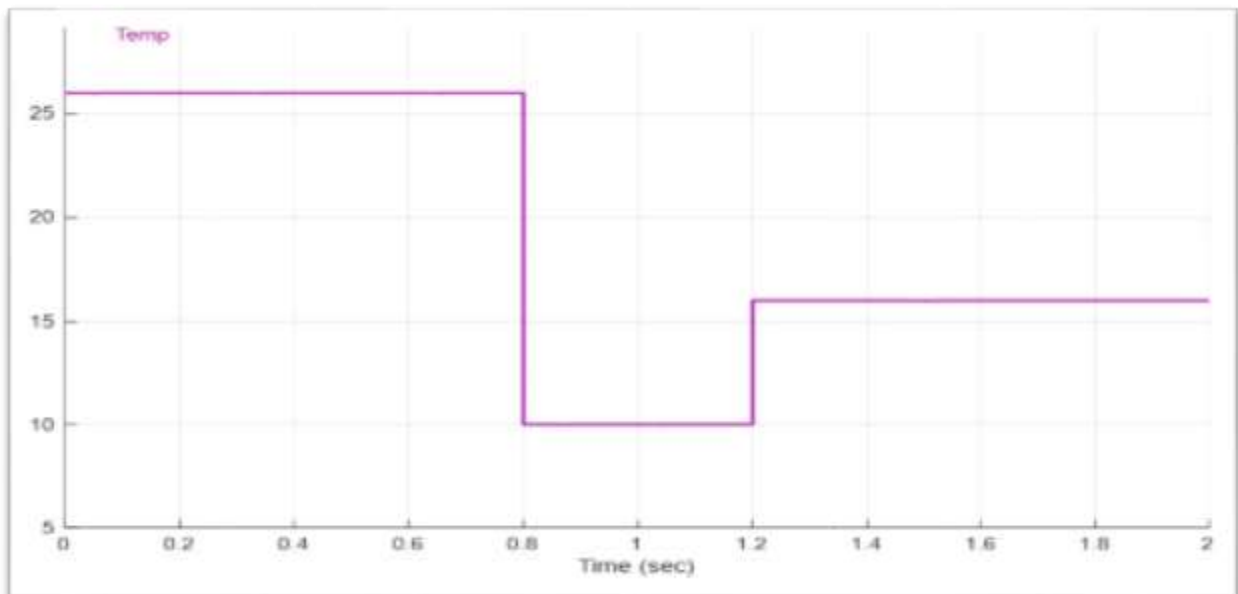
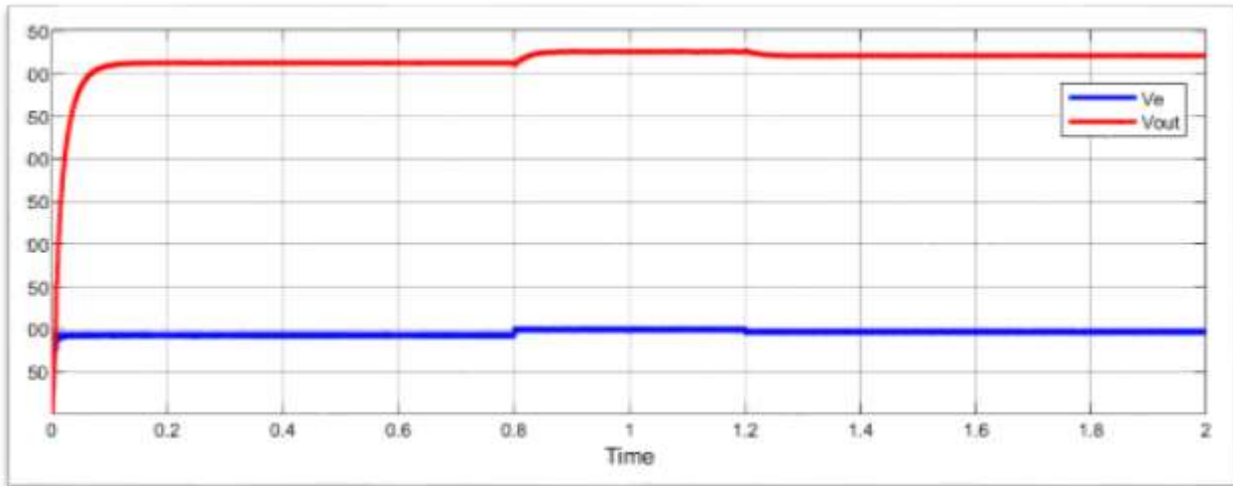


Figure 62: La variation de la température en fonction du temps.

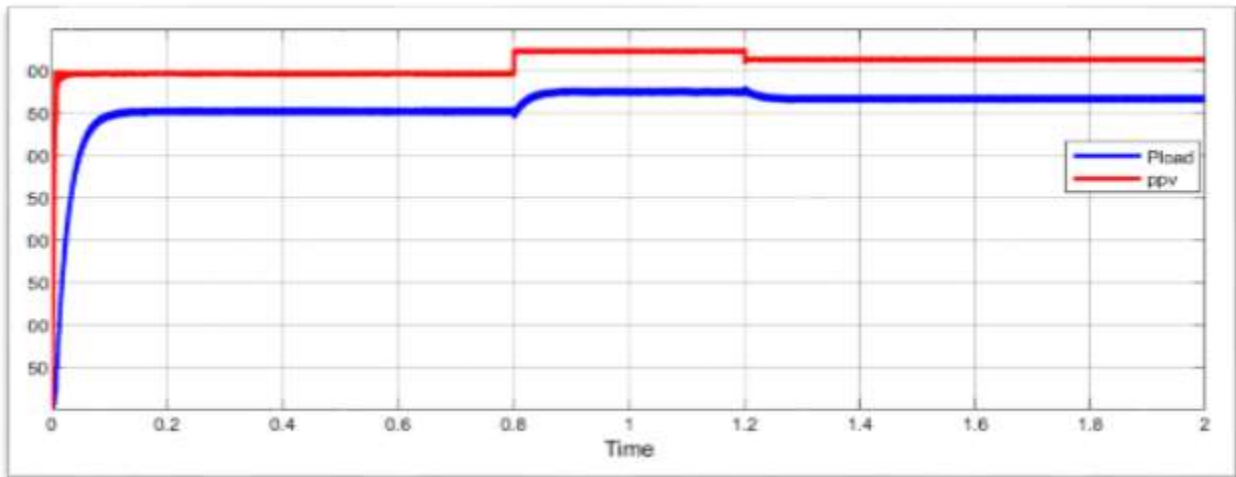


### Chapitre III : Simulations des méthodes MPPT pour système photovoltaïque

Les courbes illustrée dans la figure 63 illustre les tensions d'entrée ( $V_e$ ) et de sortie ( $V_s$ ) d'un panneau photovoltaïque en fonction du temps, sous une variation de température avec un éclairage constant, cette figure montre aussi une bonne performance du système photovoltaïque régulé par logique flou. Les tensions d'entrée et de sortie sont rapidement stabilisées et maintenues, même en présence de variations de température, ce qui démontre l'efficacité et la robustesse de la régulation par logique flou.



La Figure 64 montre comment la puissance de sortie d'un panneau photovoltaïque varie en fonction des changements de température. Elle met en évidence l'impact direct de ces fluctuations sur l'efficacité énergétique du panneau. En général, la puissance de sortie diminue à mesure que la température augmente, ce qui est cohérent avec la baisse de performance des cellules photovoltaïques à des températures élevées. Pour maximiser la production d'énergie, maintenir une température stable est crucial, et l'exploration de systèmes de refroidissement pourrait être nécessaire.



**Figure 64: La puissance d'entrée et de sortie du panneau photovoltaïque en Fonction du Temps.**

### III.2.3.3.3 Analyse et synthèse des résultats de la méthode basée sur la Logique Floue

Les simulations effectuées avec la méthode MPPT basée sur la logique floue démontrent une optimisation efficace de la production d'énergie des systèmes photovoltaïques sous des conditions environnementales variées. La relation proportionnelle entre l'éclairement et la production d'énergie est clairement observée, où la puissance et le courant augmentent avec l'éclairement et diminuent lorsque l'éclairement baisse. De plus, l'impact de la température sur la production d'énergie est notable, avec une diminution de la puissance du panneau photovoltaïque à mesure que la température augmente et une augmentation lorsque la température diminue. Les ajustements rapides du courant en réponse aux variations de température, bien que parfois accompagnés de fluctuations plus marquées, témoignent de la sensibilité du système. La méthode de logique floue maintient une bonne régulation de la tension, avec des ajustements rapides et précis en réponse aux variations de l'éclairement et de la température. En fin, la méthode de logique floue montre une capacité d'adaptation efficace aux variations d'éclairement et de température, maximisant ainsi la production d'énergie des systèmes photovoltaïques sous des conditions météorologiques changeantes.

### III.2.3.4 Comparaison des Méthodes MPPT

Dans cette partie, nous présentons une comparaison des résultats de simulation des trois méthodes de MPPT sous des conditions environnementales constantes (25°C et 1000 W/m<sup>2</sup>), utilisées dans l'optimisation intelligente d'un système photovoltaïque. Les trois méthodes

### Chapitre III : Simulations des méthodes MPPT pour système photovoltaïque

évaluées sont la méthode P&O (Perturb and Observe), la méthode ANN (Artificial Neural Network), et la méthode basée sur la logique floue.

Chaque méthode MPPT a été simulée sous MATLAB/Simulink. Les schémas de simulation ont été configurés pour enregistrer la puissance générée dans le Workspace MATLAB afin de permettre une analyse comparative. Les simulations ont été exécutées pour une durée de 2 secondes, et les résultats ont été tracés pour visualiser et comparer les performances des trois méthodes.

#### III.2.3.4.1 Résultats de Simulation et Analyse des Résultats

La figure 65 ci-dessous présente le graphique de comparaison des puissances générées par les trois méthodes MPPT :

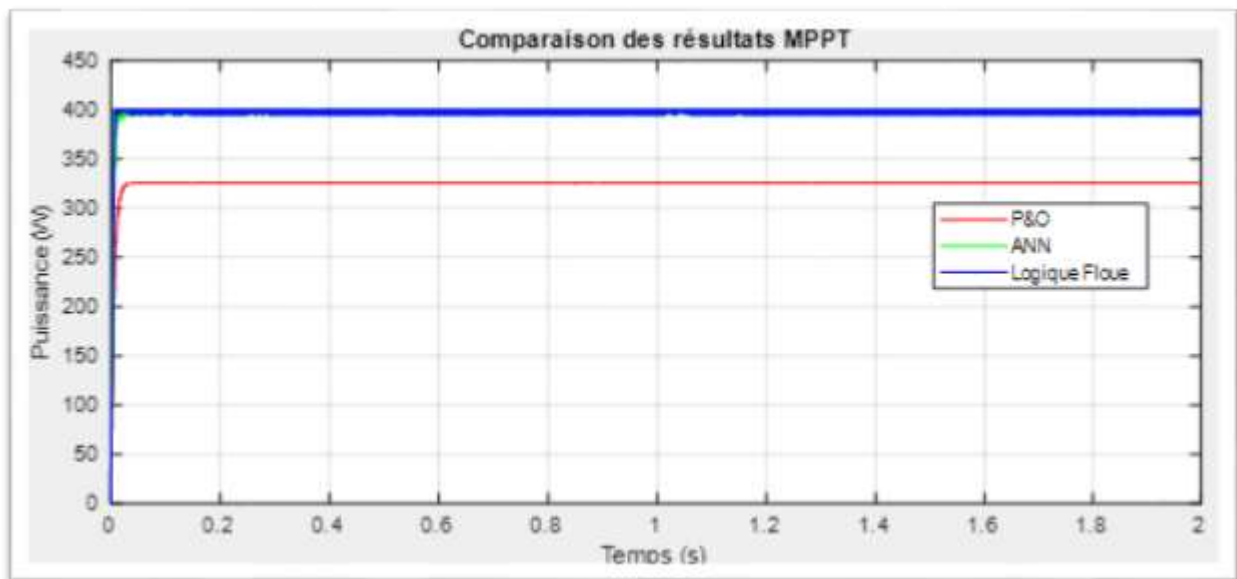


Figure 65 : La puissance de sortie des 3 méthodes MPPT en fonction du temps

D'après cette figure :

La méthode P&O montre une réponse initiale rapide mais atteint une puissance stable plus faible, avec un plateau à environ 325 W. Cette méthode est simple à implémenter mais peut souffrir d'oscillations autour du point de puissance maximale.

La méthode ANN atteint une puissance stable plus rapidement que la méthode P&O et présente moins d'oscillations, avec une puissance autour de 395 W. Elle offre une bonne capacité d'adaptation à des conditions variables mais nécessite une phase d'entraînement Q.

## Chapitre III : Simulations des méthodes MPPT pour système photovoltaïque

La méthode basée sur la logique floue surpasse les deux autres méthodes en termes de puissance générée, atteignant environ 400 W. Elle est capable de gérer les incertitudes et les non-linéarités du système photovoltaïque, offrant une solution robuste et performante, bien que la conception des règles floues puisse être complexe.

Cette comparaison met en évidence l'importance d'utiliser des techniques intelligentes pour le suivi du point de puissance maximale afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

### III.3 Conclusion

Ce chapitre a exploré l'optimisation intelligente des systèmes photovoltaïques en utilisant des méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) basées sur la logique floue et les réseaux de neurones artificiels (ANN). Les simulations effectuées sous différentes conditions météorologiques ont démontré l'efficacité de ces techniques pour maximiser la production d'énergie.

La méthode basée sur la logique floue a montré une bonne réactivité et une adaptation rapide aux variations d'éclairement et de température. Les courbes de courant et de puissance ont révélé une relation proportionnelle claire avec l'éclairement, tandis que les fluctuations de température ont impacté négativement la production d'énergie. Cependant, la méthode a su ajuster les conditions d'opération pour maintenir une performance optimale.

La méthode basée sur les réseaux de neurones artificiels a également prouvé son efficacité. Elle a montré une capacité remarquable à gérer les variations d'éclairement et de température, optimisant ainsi la production d'énergie. Les résultats obtenus ont mis en évidence une relation inverse entre la température et la puissance générée, similaire à celle observée avec la méthode de logique floue.

### *Conclusion générale*

L'optimisation intelligente des systèmes photovoltaïques représente un domaine de recherche crucial pour améliorer l'efficacité et la durabilité des sources d'énergie renouvelable. Les méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont au cœur de cette optimisation.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail avec pour objectif la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT, afin d'optimiser efficacement la production d'énergie des systèmes photovoltaïques.

Pour atteindre cet objectif, en premier lieu, nous avons abordé des recherches bibliographiques approfondies sur l'énergie solaire et le générateur photovoltaïque.

En second lieu, nous avons examiné en détail les diverses méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT), qu'elles soient classiques ou intelligentes, telles que décrites dans la littérature.

Par la suite, nous avons réalisé des simulations d'une chaîne de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT dans l'environnement Matlab/Simulink, sous différentes conditions météorologiques. Nous avons simulé plusieurs méthodes MPPT à savoir : La commande MPPT « perturbation et observation », la commande neuronale et la commande floue.

Les résultats de simulation montrent que la méthode basée sur la logique floue offre la meilleure performance en termes de puissance générée, suivie de près par la méthode ANN. La méthode P&O, bien que simple à implémenter, présente une performance inférieure comparée aux deux autres méthodes intelligentes. Par conséquent, pour une optimisation intelligente d'un système photovoltaïque, les méthodes ANN et basée sur la logique floue sont recommandées, avec une préférence pour la logique floue en raison de sa capacité à maximiser la puissance générée sous diverses conditions.

En conclusion, il est important de souligner que l'optimisation intelligente des systèmes photovoltaïques n'est pas seulement un enjeu technique, mais aussi une contribution essentielle à la transition énergétique globale, visant à réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et à promouvoir un avenir énergétique plus durable et résilient.

Notre étude ouvre des perspectives intéressantes pour de futures études suggère que des approches hybrides combinant plusieurs techniques pourraient offrir des solutions encore plus

## **Conclusion générale**

performantes, en tirant parti des robustesses de chaque méthode. De plus, l'intégration de nouvelles technologies et l'optimisation continue des algorithmes existants sont des pistes prometteuses pour améliorer davantage l'efficacité des systèmes PV.

## ***Bibliographie :***

- [1] H. Dries, L. Larbi, and Z. M'Hand Said, "Synthèse des méthodes de commande MPPT sous ombrage total et partiel."
- [2] S. Belaid, Cours Énergie Solaire Photovoltaïque, Université A. Mira de Bejaia, 2014/2015.
- [3] Types de cellules photovoltaïques, [Online]. Available : <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>. [Accessed: Oct. 2024].
- [4] H. Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, 5th ed., Paris: Dunod, 2001.
- [5] S. Berrah, Étude des propriétés structurales, électroniques et optiques des alliages quaternaires AlGaInN et InGaAsN, Ph.D. dissertation, Université de Sidi Bel Abbès, 2006.
- [6] M. Hadjab, A. Benzina, A. Djellid, and H. Abid, "L'intelligence artificielle pour la poursuite du point de puissance maximum d'un générateur photovoltaïque," presented at the Séminaire sur l'Énergie, Alger, Mar. 2012.
- [7] J. G. Simmons, Photovoltaic Solar Energy Conversion, 2015.
- [8] A. Labouret, P. Cumunel, J. P. Braun, and B. Faraggi, Cellules solaires: Les Bases De L'énergie Photovoltaïque, 5th ed., Paris: Editions Techniques et Scientifiques Françaises, 2010.
- [9] T. Djiako, J. Royer, E. Schiller, and S. B. Sada, Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens.
- [10] A. Labouret and M. Viloz, Énergie solaire photovoltaïque, 3rd ed., Paris: Dunod, 2006.
- [11] A. Ricaud, Photopiles solaires, 1st ed., Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
- [12] A. Lazizi, Modélisation, contrôle et gestion énergétique d'une installation de pompage solaire, Ph.D. dissertation, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2019.
- [13] S. Riffat and X. Yang Advanced renewable energy systems, John Wiley & Sons.
- [14] A. Luque and S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering, John Wiley & Sons.
- [15] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 51)," Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 30, no. 1, pp. 3-35, Jan. 2022.
- [16] B. Parida, S. Iniyar, and R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.

- [17] A. C. Pastor, Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques, Ph.D. dissertation, INSA de Toulouse, 2006.
- [18] H. Valderrama-Blavi, C. Alonso, L. Martinez-Salamero, S. Singer, B. Estibals, and J. Maixe, "AC-LFR concept applied to modular photovoltaic power conversion chains," IEE Proceedings - Electric Power Applications, Nov. 2002.
- [19] A. Cid-Pastor, C. Alonso, J. F. Cugat-Curto, B. Estibals, and L. Martínez-Salamero, "Design of feedback laws for dc-to-ac conversion in photovoltaic systems," presented at the 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'04), Kawasaki, Japan, Mar. 2004.
- [20] A. Belkaid, Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome, Ph.D. dissertation, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie, 2015.
- [21] A. Rufer, "Cours d'électronique de puissance: Conversion DC/DC," École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [22] Y. Bhaskar, S. S. Gupta, and P. S. R. Lakshmi, "Analysis and Design of CUK Converter using PI Controller for PV Application," School of Electrical and Electronics, VIT, Chennai.
- [23] Étude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'un système électrique, Collection Canada, 2011.
- [24] D. G and S. N. Singh, "Renewable and Sustainable Energy Reviews," vol. 76, pp. 1230-1247, 2017.
- [25] S. Chakraborty, M. G. Simões, and W. E. Kramer, Eds., Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems: A Sourcebook of Topologies, Control and Integration, Springer, 2013.
- [26] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Analysis and simulation of the P&O MPPT algorithm using a linearized PV array model," University of Campinas (UNICAMP), Brazil, 2009.
- [27] Y. Sedrati and H. Nouar, Implémentation de l'algorithme P&O pour un système photovoltaïque, Master's thesis, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2016.
- [28] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Analysis and simulation of the P&O MPPT algorithm using a linearized PV array model," presented at the Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2009.



- [29] Y. C. Kuo, T. J. Liang, and J. F. Chen, "Novel maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 3, pp. 594-601, Jun. 2001.
- [30] M. Boudjema and N. Belhaouas, *Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de neurones et implémentation sur FPGA et DSP*, Engineering thesis, Département d'Électronique, Université de Boumerdes, 2007.
- [31] G. Balasubramanian and S. Singaravelu, "Fuzzy logic controller for the maximum power point tracking in photovoltaic system," *International Journal of Computer Applications*, vol. 41, no. 12, pp. 1-5, Mar. 2012.
- [32] M. Azzouzi, "Comparaison between MPPT P&O and MPPT Fuzzy Controls in Optimizing the Photovoltaic Generator," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 3, no. 12, 2012.

## **Résumé:**

Ce mémoire examine l'optimisation des systèmes photovoltaïques à l'aide de techniques intelligentes de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Nous avons comparé trois méthodes MPPT : la méthode Perturb and Observe (P&O), les réseaux de neurones artificiels (ANN) et la logique floue. Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink révèlent que la méthode fondée sur la logique floue est la plus performante, suivie de près par la méthode ANN. Bien que la méthode P&O soit simple à mettre en œuvre, elle s'avère moins efficace en termes de puissance générée. En conclusion, l'optimisation intelligente, en particulier par le biais de la logique floue, améliore significativement l'efficacité des systèmes photovoltaïques, contribuant ainsi à un avenir énergétique plus durable.

**Mots clés:** Systèmes photovoltaïques, Optimisation intelligente, Réseaux de neurones artificiels (ANN), Logique floue, Méthode Perturb and Observe, Efficacité énergétique, MATLAB/Simulink.

## **ABSTRACT:**

This thesis explores the optimization of photovoltaic systems using intelligent techniques for maximum power point tracking (MPPT). We compare three MPPT methods: Perturb and Observe (P&O), artificial neural networks (ANN), and fuzzy logic. Simulations conducted in MATLAB/Simulink demonstrate that the fuzzy logic-based method is the most efficient, followed closely by the ANN method. While the P&O method is simple to implement, it is less effective in terms of power generation. In conclusion, intelligent optimization, particularly through fuzzy logic, significantly enhances the efficiency of photovoltaic systems, contributing to a more sustainable energy future.

**Keywords:** Photovoltaic systems, intelligent optimization, Artificial neural networks (ANN), Fuzzy logic, Perturb and Observe method, Energy efficiency, MATLAB/Simulink.

## **ملخص:**

يستعرض هذا البحث تحسين الأنظمة الكهروضوئية باستخدام تقنيات ذكية لتتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT)، قمنا بمقارنة ثلاث طرق لتتبع نقطة القدرة القصوى: طريقة الاضطراب والمراقبة (P&O)، الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، والمنطق الضبابي. أظهرت المحاكاة التي أجريت باستخدام MATLAB/Simulink أن الطريقة المعتمدة على المنطق الضبابي هي الأكثر كفاءة، تليها عن قرب طريقة الشبكات العصبية الاصطناعية. بينما تعد طريقة الاضطراب والمراقبة (P&O) بسيطة من حيث التنفيذ، إلا أنها أقل فعالية من حيث القدرة المنتجة. في الختام، يُحسن التحسين الذكي، وخاصة باستخدام المنطق الضبابي، بشكل كبير كفاءة الأنظمة الكهروضوئية، مما يساهم في مستقبل طاقة أكثر استدامة.

**الكلمات المفتاحية:** الأنظمة الكهروضوئية، التحسين الذكي، الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، المنطق الضبابي، طريقة الاضطراب والمراقبة، كفاءة الطاقة، MATLAB/Simulink.