RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـعــليـم العـالي والبحث العــلــمـي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Par : - MECHAKOU Amine

- MAAZA Imane

Sujet

Conception et Simulation via le Logiciel MATLAB/Simulink d'une Technique MPPT Avancée Destinée à la Gestion d'un système Solaire

Soutenu publiquement, le 01/07/2025, devant le jury composé de :

Mr. KHENFER Riad	Pr	Univ-BBA	Président
Mr. TALHAOUI Hicham	Pr	Univ-BBA	Examinateur
Mr. AISSA Oualid	MCA	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Nous remercions ALLAH, le tout-puissant, de nous avoir accordé la santé et la volonté nécessaire pour entreprendre et mener à bien ce travail.

Avant tout, ce mémoire n'aurait pu voir le jour, ni atteindre cette richesse de contenu, sans l'aide précieuse et l'encadrement du Dr. Aissa Oualid, que nous remercions profondément pour la qualité exceptionnelle de son accompagnement, sa patience, sa rigueur, ainsi que pour sa disponibilité constante tout au long de la préparation de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury,

Pr. Khenfer Riad et Pr. Talhaoui Hicham, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'évaluer et de l'enrichir par leurs remarques pertinentes et constructives.

Nos remerciements vont enfin à l'ensemble de nos professeurs, pour leur générosité, leur engagement et la grande patience dont ils ont fait preuve tout au long de notre formation.

Maaza Imane et Mechakou Amine

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

À mes supports dans ma vie, qui m'ont appris, m'ont supporté, m'ont dirigé, m'ont donné le courage et la force pour continuer vers la gloire, mon chère Papa et ma chère Maman.

À mes sœurs, Kenza et Hanene, véritables sources de bonheur,

et à mon frère Zinedine, pour son soutien précieux et constant.

Merci de m'avoir comblée de tendresse, d'amour et d'espoir.

À mon encadreur Dr. Aissa Oualid, exemple de compétence et de recherche scientifique.

À toute ma famille : mes chers oncles et tantes, mes cousins et mes adorables cousines Rahma, Nassima et Khadidja.

À mes chères copines et collègues pour leur accompagnement et tout l'amour qu'elles m'ont si généreusement offert.

À mes ami(e)s pour leur soutien, leurs encouragements et leurs gentillesses.

Maaza. Imane

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

À mes parents : ma mère, source de tendresse, mon père, symbole de courage et de volonté.

À mon encadreur Dr. AISSA Oualid, exemple de compétence et de recherche scientifique.

À toute la famille Mechakou.

À mes chers et adorables frères et mes chères sœurs.

À mes oncles, mes tantes, mes cousins et mes cousines.

À tous ceux que j'aime, et à tous ceux qui m'aiment.

Mechakou. Amine

Liste des figures

Chapitre 01 : Généralités sur les systèmes solaires

Figure 1.1 Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque. 3
Figure 1.2 Energie hydraulique. 4
Figure 1.3 Énergie biomasse. 5
Figure 1.4 Énergie géothermique. 5
Figure1.5 Énergie éolienne. 6
Figure 1.6 Énergie solaire. 6
Figure 1.7 Énergie marine. 7
Figure 1.8 Evolution de la production énergétique (2000-2023). 7
Figure 1.9 Évolution de la part du solaire (2000-2023). 8
Figure 1.10 Fonctionnement des cellules photovoltaïques. 9
Figure 1.11 Photos de cellules monocristallines et multicristallines. 10
Figure 1.12 Couches minces. 11
Figure 1.13 Association des cellules en série. 12
Figure 1.14 Association des cellules en parallèle. 12
Figure 1.15 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque. 13
Figure 1.16 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque. 16
Figure 1.17 Structure d'un système PV autonome. 16
Figure 1.18 Structure d'un système PV raccordé au réseau. 17
Figure 1.19 Exemple de la structure d'un système PV hybride. 17

Chapitre 02 : Description et modélisation du système photovoltaïque autonome utilisant des techniques MPPTs de types P&O et neuronal

Figure 2.1 Couplage direct GPV-charge. 21
Figure 2.2 Système PV autonome alimentant des charges DC et AC. 22
Figure 2.3 Système PV autonome alimentant des charges DC et AC (étage 1 est DC/DC). 22
Figure 2.4 Circuit idéal de convertisseur dévolteur. 23
Figure 2.5 Convertisseur Buck-Boost. 23
Figure 2.6 Convertisseur survolteur (Boost) (structure globale (a)). 24
Figure 2.7 Structure avec interrupteur fermé (b) et structure avec interrupteur ouvert (c). 24
Figure 2.8 Principe de la conversion d'énergie par MPPT. 25
Figure 2.9 Principe de la commande MPPT. 26
Figure 2.10 Recherche du PPM par la méthode (P&O). 27
Figure 2.11 Organigramme de l'algorithme P&O. 27
Figure 2.12 Représentation schématique d'un neurone biologique. 28
Figure 2.13 Représentation schématique d'un neurone artificiel. 29
Figure 2.14 Réseau non bouclé. 29
Figure 2.15 Réseau bouclé. 30
Figure 2.16 Modèle de réseaux de neurones MLP pour identification de MPPT. 31

Figure 2.17 Structure adoptée pour la stratégie MPPT neuronale développée. 33
Figure 2.18 Interface d'apprentissage de la stratégie MPPT neuronale. 34
Figure 2.19 Performances de validation de la stratégie MPPT neuronale. 34
Figure 2.20 Allures de régressions de la stratégie MPPT neuronale. 35

Chapitre 03 : Présentations et discussions des résultats de simulations

Figure 3.1 Effet de l'éclairement solaire sur la caractéristique P-V. 38
Figure 3.2 Effet de l'éclairement solaire sur la caractéristique I-V. 38
Figure 3.3 Effet de la température sur la caractéristique P-V. 39
Figure 3.4 Effet de la température sur la caractéristique I-V. 39
Figure 3.5 Schéma de simulation du système solaire étudié avec deux techniques de commandes $MPPT_s$: P&O et Neuronale. 40
Figure 3.6 Résultats de simulation de la technique MPPT de type P&O pour un profil d'irradiation variable : (a) puissance du panneau PV, (b) puissance de sortie et (c) tension (V_{PV}) et courant (I_{PV}) photovoltaïques. 41
Figure 3.7 Résultats de simulation de la technique MPPT de type P&O pour des températures variables : (a) puissance du panneau PV, (b) puissance de sortie, (c) rapport cyclique et (d) tension (V_{PV}) et courant (I_{PV}) photovoltaïques. 43
Figure 3.8 Résultats de simulation de la technique MPPT de type neuronal pour un profil d'irradiation variable : (a) puissance du panneau PV, (b) puissance de sortie et (d) tension (V_{PV}) et courant (I_{PV}) photovoltaïques. 44
Figure 3.9 Résultats de simulation de la technique MPPT de type neuronal pour des températures variables : (a) puissance du panneau PV, (b) puissance de sortie, (c) rapport cyclique et (d) tension (V_{PV}) et courant (I_{PV}) photovoltaïques. 46
Figure 3.10 Évaluation de l'efficacité des techniques MPPT P&O et neuronale sous un profil d'irradiation variable : (a) puissances PV et (b) puissances de sorties. 47
Figure 3.11 Évaluation de l'efficacité des techniques MPPT P&O et neuronale sous une température variable : (a) puissances PV et (b) puissances de sorties. 48

Liste des Tableaux

Chapitre 03 : Présentations et discussions des résultats simulations

Tableau 3.1 Caractéristiques du module PV appliqué [22]. 37

Liste des symboles

A	Facteur d'idéalité de la jonction
B	Seuil d'activation
C_1	Condensateur d'entrée
C_2	Condensateur de sortie
E_{go}	Energie de gap du semi-conducteur
G	Irradiation (W/m^2)
I_0	Courant de saturation
I_{cc}	Courant de court-circuit du panneau à 25 °C et 1000 W/m^2
I_{cell}	Courant délivré par la photopile
I_d	Courant de la diode (A)
i_L	Courant d'inductance
I_p	Courant shunt
I_{ph}	Photo courant
I_{pv}	Courant photovoltaïque
K	Constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J / K)
K_i	Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau
L	Inductance
N	Constante d'idéalité de la jonction
n_p	Nombre de cellule en parallèle
n_s	Nombre de cellule en série
P_m	Puissance maximale
P_{out}	Puissance de sortie
P_{out-N}	Puissance de sortie neuronale
P_{pv-N}	Puissance photovoltaïque neuronale
Q	Charge d'électrons (1.6×10^{-19} C)
R_s	Resistance série (Ω)
R_{sh}	Resistance shunt (Ω)
S	Somme pondérée des entrées
T	Température ambiante
T_n	Température nominale
T_{ref}	Température de référence de la cellule, en Kelvin
V_0	Tension du condensateur
V_{oc}	Tension de circuit ouvert du module
V_{pv}	Tension photovoltaïque
w_i	Poids de chaque connexion
x_i	Entrées du neurone

Liste des abréviations

DC/AC	Courant continu/Courant alternatif
DC/DC	Courant continu/Courant continu
F.é.m.	Force électromotrice
GPV	Générateur photovoltaïque
I_{mpp}	Courant au point de puissance maximale
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Perturbe et Observe
PMC	Perceptron Multicouche
PPM	Point de puissance maximale
PV	Photovoltaïque
RNA	Réseau de neurones artificiels
Sia	Silicium amorphe
STC	Standard Test Condition
V_{mpp}	Tension au point de puissance maximale

ملخص:

يعرض هذا البحث دراسة متعمقة لنظام الطاقة الشمسية المستقل، الذي يدرس تقنيتين لتتبع نقطة القدرة القصوى(MPPT) ، وهما: الطريقة التقليدية المعروفة باسم الاضطراب والمراقبة (P&O) والنهج الذكي القائم على الشبكات العصبية الاصطناعية. الهدف المنشود هو استخراج الطاقة القصوى من النظام الشمسي بشكل فعال، مع الأخذ في الاعتبار التغيرات المناخية، ولا سيما الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة. أخيرًا، أظهرت المحاكاة التي أجريت باستخدام برنامج MATLAB/Simulink فعالية الطريقتين المدروستين، مما أبرز التفوق الواضح لاستراتيجية MPPT العصبية المطورة من حيث سرعة التقارب، الاستقرار، والقدرة على التكيف مع التغيرات المناخية .

الكلمات المفتاحية: النظام الشمسي، MPPT، P&O، الشبكات العصبية الاصطناعية،MATLAB/Simulink

Résumé :

Ce mémoire présente une étude approfondie d'un système photovoltaïque autonome. Deux techniques de suivi du point de puissance maximale (PPM), qui sont : la méthode traditionnelle Perturbe et Observe (P&O) et l'approche intelligente basée sur les réseaux de neurones artificiels ont été utilisées. L'objectif recherché est d'extraire efficacement la puissance maximale du système solaire, en tenant compte des variations climatiques, notamment l'irradiation solaire et la température. Enfin, les simulations effectuées sous le logiciel MATLAB/Simulink ont démontré l'efficacité des deux méthodes étudiées, mettant en évidence une nette supériorité de la stratégie MPPT neuronale développée en termes de rapidité de convergence, de stabilité et de capacité d'adaptation aux changements climatiques.

Mots clés : Système solaire, PPM, P&O, Réseaux de neurones artificiels, MATLAB/Simulink.

Abstract :

This study presents an extensive analysis of an autonomous photovoltaic system. Two maximum power point tracking (MPPT) techniques: the traditional Perturb and Observe (P&O) method, and an intelligent approach based on artificial neural networks have been utilized. The objective sought is to efficiently extract the maximum power from the solar system, taking into account climatic variations, particularly solar irradiation and temperature. Simulations conducted using MATLAB/Simulink software demonstrated the effectiveness of the two studied methods, highlighting the superiority of the developed neural MPPT strategy in terms of convergence speed, stability, and adaptability to climatic changes.

Keywords : Solar system, MPPT, P&O, Artificial neural networks, MATLAB/Simulink.

Sommaire

Remerciements
Dédicaces
Liste des figures
Liste des Tableaux
Liste des symboles
Liste des abréviations
Résumés
Introduction générale 1

Chapitre 01 : Généralités sur les systèmes solaires

1.1 Introduction 3
1.2 Présentation des énergies renouvelables 4
1.3 Utilisation de l'énergie solaire à l'échelle mondiale 7
1.3.1 Évolution de la production énergétique (2000-2023) 7
1.3.2 Évolution de la part du solaire (2000-2023) 8
1.4 Conversion de l'énergie solaire 9
1.4.1 Description et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque 9
1.4.2 Différentes technologies de cellules photovoltaïques 10
1.4.3 Modes de connexion des cellules photovoltaïques 11
1.5 Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque 12
1.6 Générateur photovoltaïque 15
1.7 Différents types de systèmes photovoltaïques 15
1.7.1 Système PV autonome 16
1.7.2 Système PV raccordé au réseau 17
1.7.3 Système hybride 17
1.8 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïque 18
1.8.1 Avantages des systèmes photovoltaïques 18
1.8.2 Inconvénients des systèmes photovoltaïques 18
1.9 Conclusion 18

Chapitre 02 : Description et modélisation du système photovoltaïque autonome utilisant des techniques MPPTs de types P&O et neuronal

2.1 Introduction 21
2.2 Système photovoltaïque autonome 21
2.3 Différentes structures du convertisseur DC/DC 23
2.3.1 Convertisseur dévolteur (Buck) 23
2.3.2 Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) 23

2.3.3 Convertisseur survolteur (Boost) 24
2.4 Utilité et principe de la commande MPPT 25
2.4.1 Stratégie MPPT de type P&O 26
2.4.2 Stratégie MPPT de type neuronal 28
2.4.2.1 Neurone artificiel 28
2.4.2.2 Architecture des réseaux de neurones 29
2.4.2.3 Perceptrons multicouches 30
2.4.2.4 Apprentissage dans les réseaux de neurones 31
2.4.2.5 Avantages et inconvénients de réseaux de neurones artificiels 32
2.4.2.6 Présentation et description de la stratégie MPPT de type neuronal appliquée 32
2.5 Conclusion 35

Chapitre 03 : Présentations et discussions des résultats de simulations

3.1 Introduction 37
3.2 Résultats de simulation du panneau solaire 37
3.2.1 Caractéristiques du module PV 37
3.2.2 Simulation du panneau PV 38
3.3 Commandes $MPPT_s$ traitées sous MATLAB/Simulink 39
3.3.1 Résultats de simulation de la stratégie MPPT de type P&O 40
3.3.2 Résultats de simulation de la stratégie MPPT de type neuronal 43
3.4 Etude comparative 46
3.5 Conclusion 48
Conclusion générale 50
Références bibliographiques 51

Introduction générale

Introduction générale

L'humanité fait face à un défi énergétique sans précédent, marqué par l'épuisement accéléré des ressources fossiles et l'urgence climatique. Dans ce contexte, les énergies renouvelables s'imposent comme une solution incontournable, avec l'énergie solaire photovoltaïque en tête de proue [1]. Cette technologie, qui convertit directement le rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, présente des avantages majeurs : source inépuisable, absence d'émissions polluantes lors de son fonctionnement et modularité permettant des installations adaptées à diverses échelles [2]. Cependant, le rendement des systèmes photovoltaïques reste tributaire de facteurs environnementaux fluctuants, notamment l'irradiation solaire et la température ambiante. Ces variations entraînent des changements significatifs dans les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) des panneaux, rendant cruciale l'optimisation du point de fonctionnement [3]. C'est ici qu'interviennent les techniques de suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)), dont l'efficacité conditionne directement la performance globale du système solaire.

Parmi les méthodes $MPPT_s$ existantes dans la littérature, l'algorithme Perturbe et Observe (P&O) s'est imposé comme une référence grâce à sa simplicité de mise en œuvre. Toutefois, ses limitations ont motivé le développement d'approches plus sophistiquées. Les réseaux de neurones artificiels, avec leur capacité d'apprentissage et d'adaptation, émergent comme une solution prometteuse pour surmonter ces contraintes.

Ce mémoire s'articule autour de trois principaux chapitres, à savoir :

Le premier chapitre présente un état de l'art complet sur l'énergie solaire photovoltaïque, en abordant notamment les différentes technologies de cellules PV, leurs principes de fonctionnement fondamentaux, ainsi que la modélisation mathématique des panneaux solaires. En outre, les différents types de systèmes photovoltaïques existants, ainsi que leurs avantages et inconvénients, sont abordés en fin de ce premier chapitre.

Le deuxième chapitre se concentre sur la présentation des différents types et structures de convertisseurs DC/DC, avec la modélisation du convertisseur DC/DC élévateur. En outre, ce même chapitre discute les techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), avec une analyse approfondie de l'algorithme classique Perturbe and Observe (P&O) et une présentation détaillée de notre approche MPPT neuronale développée, incluant l'architecture du réseau utilisé et son processus d'apprentissage.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation et à l'analyse comparative des performances des deux méthodes $MPPT_s$ dans différentes conditions de fonctionnement, avec une évaluation

quantitative de leur rapidité de convergence, précision et robustesse face aux variations climatiques, notamment l'irradiation solaire et la température. Cette démarche méthodologique nous permet de valider scientifiquement les avantages de l'approche neuronale proposée.

Enfin, ce mémoire de fin d'études se clôturera par une conclusion générale, accompagnée de quelques perspectives.

Chapitre 01 :

Généralités sur les systèmes solaires

1.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée [1]

Figure 1.1 Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque [1].

Face à l'épuisement des ressources fossiles et à la nécessité d'un développement énergétique durable, les énergies renouvelables s'affirment comme une solution stratégique et incontournable. Ce chapitre débute par une présentation des principales sources renouvelables hydraulique, géothermique, biomasse, marine, éolienne et solaire. Avant de se concentrer sur l'énergie solaire, dont l'exploitation connaît une croissance mondiale remarquable. L'étude se poursuivra par l'analyse du processus de conversion de cette énergie en électricité à l'aide des cellules photovoltaïques, en abordant leur fonctionnement, les technologies existantes, leurs connexions, ainsi que la modélisation mathématique qui permet de prédire leur comportement. Le générateur photovoltaïque sera ensuite présenté dans son ensemble, suivi des différents types de systèmes (autonomes, connectés au réseau ou hybrides), avec une évaluation de leurs avantages et de leurs limites.

Dans ce contexte, une question se pose : quels sont les principes, technologies et configurations qui permettent de maximiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques tout en tenant compte de leurs contraintes techniques et environnementales ?

1.2 Présentation des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées [1].

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes comme :

- Énergie hydraulique ;
- Énergie biomasse ;
- Énergie géothermique ;
- Énergie solaire ;
- Énergie éolienne ;
- Énergie marine.

a) Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est une source d'énergie renouvelable qui exploite la force de l'eau pour produire de l'électricité. Elle est l'une des plus anciennes et des plus répandues dans le monde, contribuant de manière significative à la production d'énergie décarbonée [2].

Figure 1.2 Energie hydraulique [1].

b) Énergie biomasse

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. Elle est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant [2].

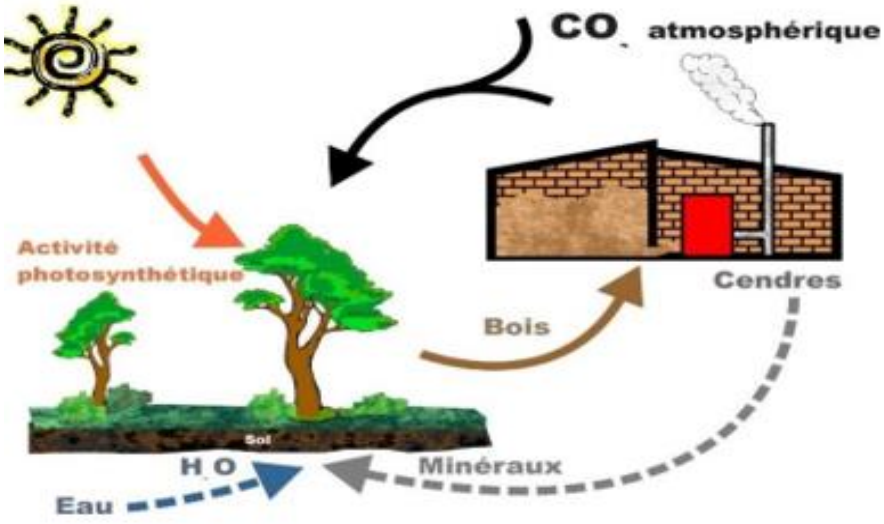


Figure 1.3 Énergie biomasse [1].

c) Énergie géothermique

L'énergie géothermique est l'énergie thermique stockée sous la surface de la terre. Elle peut être extraite comme source de chaleur. L'énergie est extraite en forant des puits et en faisant circuler un fluide ou une saumure à travers un réservoir souterrain, puis en l'utilisant à la surface comme chaleur directe ou en l'utilisant pour produire de l'électricité [3].

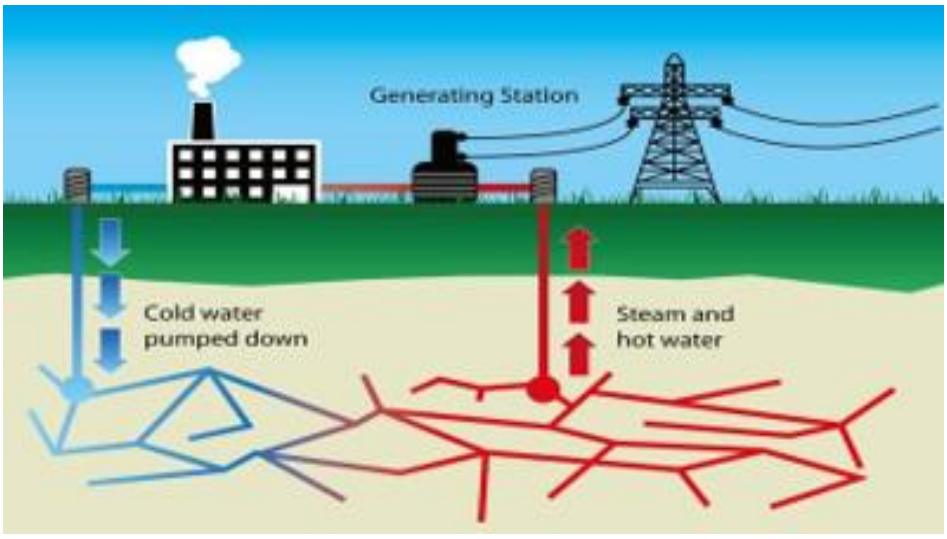


Figure 1.4 Énergie géothermique [3].

d) Énergie éolienne

L'énergie éolienne désigne l'énergie cinétique du vent et son exploitation par l'Homme. C'est une source d'énergie renouvelable, inépuisable mais intermittente. La production associée varie ainsi au cours du temps, elle n'émet pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation [3].

Figure 1.5 Énergie éolienne [3].

e) Énergie solaire

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable qui convertit la lumière du soleil en électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques. Elle est de plus en plus utilisée pour sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et sa disponibilité quasi illimitée [3].

Figure 1.6 Énergie solaire [2].

f) Energie marine

L'énergie en provenance des mers et des océans est une source d'énergie renouvelable issue des diverses manifestations naturelles. Elle comprend différentes sources telles que l'énergie causée par les vagues (houlomotrice), les marées (marémotrice), les courants marins, les variations de température entre les eaux de surface et profondes (énergie thermique des mers), ainsi que la variation de salinité entre l'eau douce et l'eau salée (énergie osmotique). Utilisée grâce à des technologies particulières, cette énergie permet de générer de l'électricité de façon durable et respectueuse de l'environnement [3].

Figure 1.7 Énergie marine [2].

1.3 Utilisation de l'énergie solaire à l'échelle mondiale

Le photovoltaïque est la filière productrice d'électricité qui connait la plus forte croissance depuis 19 années consécutives. En valeur absolue, c'est également la filière dont la production a le plus augmenté en 2022 et 2023, devant toutes les autres sources d'énergie.

La part du solaire dans le mix électrique mondial a également suivi cette tendance, progressant de 0 % en 2000 à 5,5 % en 2023, marquant une reconnaissance accrue de cette source d'énergie renouvelable comme nouveau pilier de la production énergétique [1], [2].

Les Figures 1.8 et 1.9 illustrent les histogrammes générés à partir des données collectées durant la période 2000-2023, ces histogrammes montrent l'évolution de la production énergétique et de la part du solaire entre 2000 et 2023.

1.3.1 Évolution de la production énergétique (2000-2023)

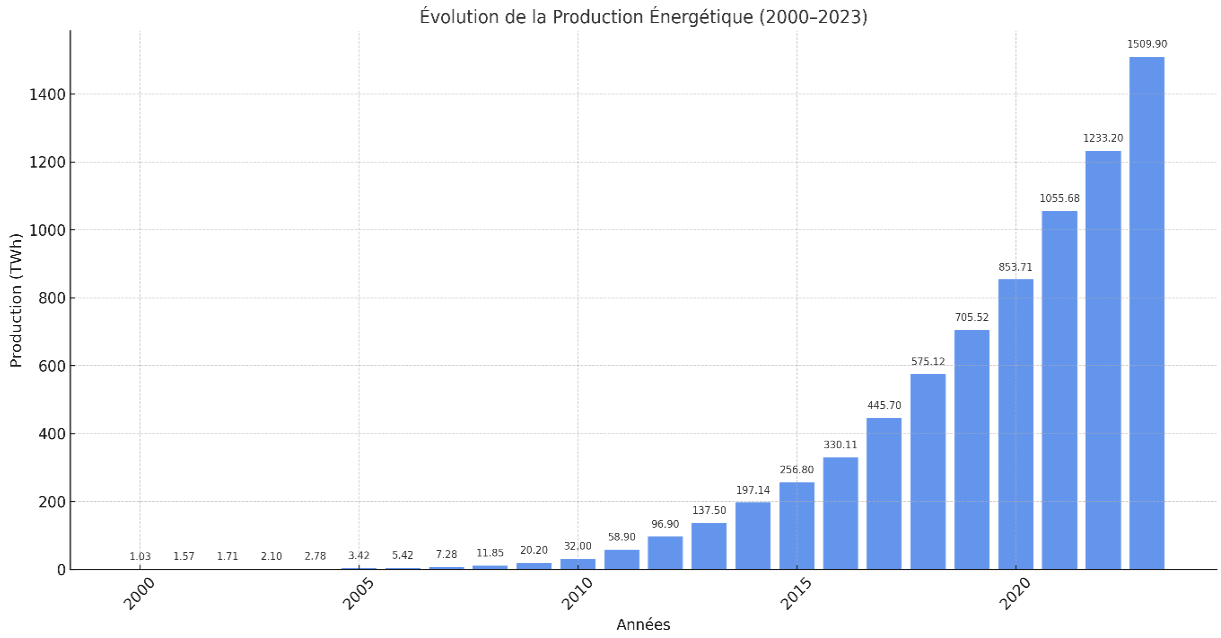


Figure 1.8 Evolution de la production énergétique (2000-2023).

Ce graphique montre une progression spectaculaire de la production énergétique sur la période de 23 ans. On observe :

- Une croissance relativement modérée entre 2000 et 2009 ;
- Une accélération marquée à partir de 2010 ;
- Une augmentation particulièrement forte entre 2019 et 2023.

La production a augmenté de manière exponentielle, passant de seulement 1,03 TWh en 2000 à 1629,90 TWh en 2023, soit une multiplication par plus de 1580 en 23 ans.

1.3.2 Évolution de la part du solaire (2000-2023)

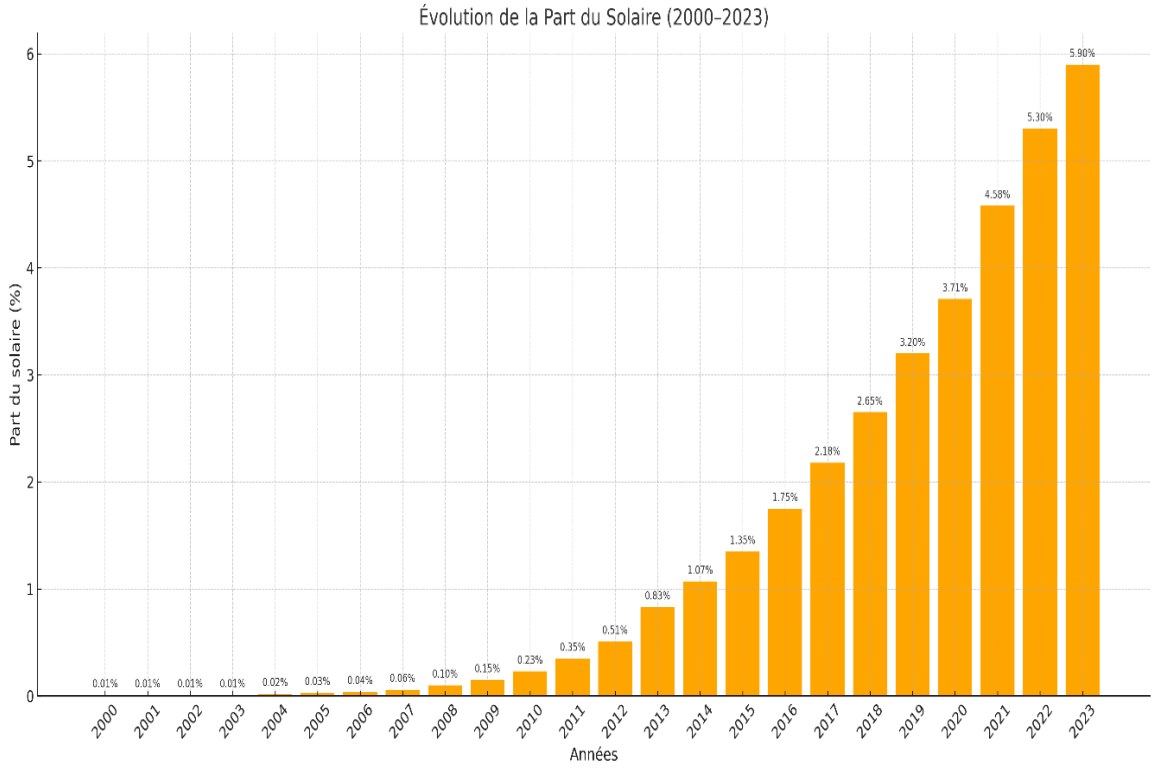


Figure 1.9 Évolution de la part du solaire (2000-2023).

Ce second graphique illustre l'évolution de la contribution de l'énergie solaire au mix énergétique global :

- En 2000, l'énergie solaire ne représentait que 0,001% de la production ;
- Une progression constante est observée tout au long de la période ;
- En 2023, la part du solaire atteint 5,53%.

Cette évolution montre clairement l'importance croissante de l'énergie solaire dans le mix énergétique, avec une multiplication par plus de 920 de sa part relative en 23 ans.

Les deux graphiques révèlent une corrélation entre l'augmentation globale de la production énergétique et la croissance de la part du solaire. Cela suggère que l'énergie solaire a joué un rôle significatif dans l'expansion de la production énergétique totale sur cette période, reflétant

probablement des investissements croissants dans les technologies d'énergie renouvelable et une transition progressive vers des sources d'énergie plus durables.

1.4 Conversion de l'énergie solaire

L'effet photovoltaïque constitue le fondement de la conversion solaire. Lorsque des photons, ces particules élémentaires de lumière, frappent une cellule photovoltaïque, ils transfèrent leur énergie aux électrons présents dans le matériau semi-conducteur, typiquement du silicium [4].

1.4.1 Description et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Cette conversion repose sur 3 fondamentaux qui sont les suivants [3]:

- Absorption de l'énergie solaire (photons) par le matériau à partir duquel le dispositif est formé.
- Convertir l'énergie photonique en énergie électrique, en créant des paires d'électrons dans un matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Par conséquent, le matériau qui compose la cellule photovoltaïque doit avoir deux niveaux d'énergie et doit être suffisamment conducteur pour permettre le passage du courant. Pour collecter les particules générées, un champ électrique permettant la dissociation de paires électron/trou est généré. Le plus souvent connu, d'autres structures, telles que des contacts hétérogènes et Schottky peuvent également être utilisées [4].

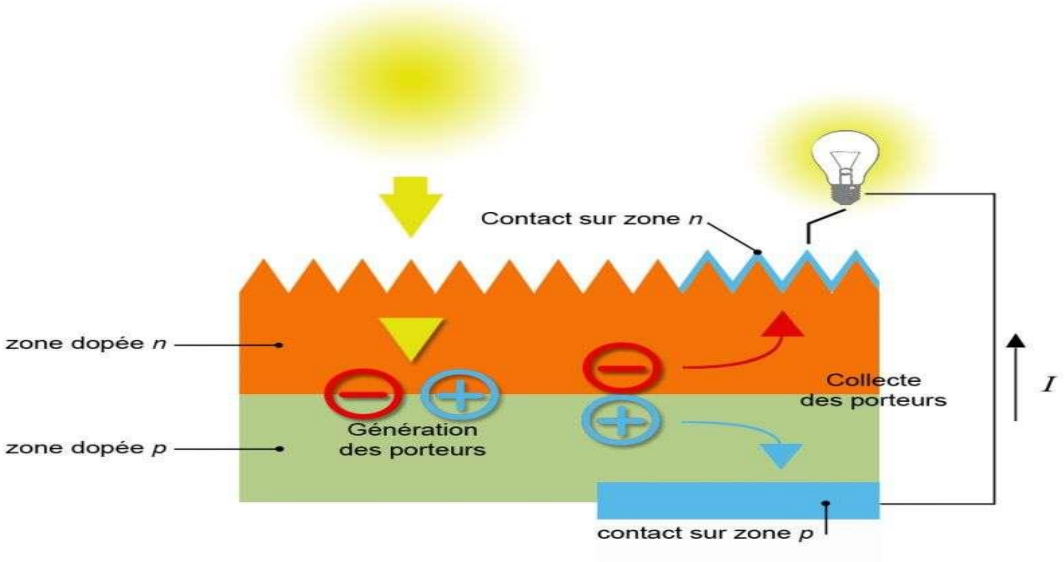


Figure 1.10 Fonctionnement des cellules photovoltaïques [4].

1.4.2 Différentes technologies de cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques peuvent être fabriquées avec de nombreux semi-conducteurs, et en fait il existe aujourd'hui trois grands secteurs technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces secteurs participent au marché de manière inégale, et nous allons maintenant discuter de la définition de ces secteurs et des différences entre eux [5].

a) Silicium

Le silicium est un élément chimique, de symbole Si et de numéro atomique 14. C'est l'élément le plus abondant sur la Terre après l'oxygène (27,6%). Il n'existe pas à l'état libre mais sous forme de composés : sous forme de dioxyde silice (dans le sable, le quartz, la cristobalite, etc.) ou de silicates (dans les feldspaths, la kaolinite, etc.). C'est un faible conducteur d'électricité. Il est quasiment insoluble dans l'eau. Il est attaqué par l'acide fluorhydrique (HF) ou un mélange acide fluorhydrique/acide nitrique (HNO3) en fonction de la phase [5].

Il existe deux types de technologies : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin :

a.1) Silicium monocristallin

Lorsque le silicone dissous est refroidi, un cristal se forme. Le cristal est coupé en fines tranches représentant les cellules. Ces cellules sont généralement uniformes, intenses et lumineuses. Elles sont utilisées, mais pas dans la plupart des marchés parce qu'elles sont coûteuses. C'est un obstacle unique parce que l'efficacité du monocristallin est la plus élevée entre 12 et 20% [5].

a.2) Silicium multicristallin (Polycristallin)

Le silicone multicristallin est le plus répandu parce qu'il représente 50% des utilisations du marché, et est produit par moulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa composition hétérogène et son efficacité varie de 10 à 14% selon le fabricant. En termes de production et de coût, il est le plus bas pour cette raison, il est largement disponible sur le marché [5].

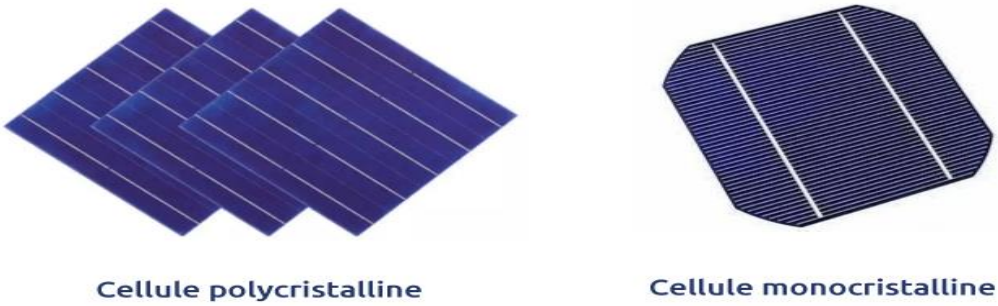


Figure 1.11 Photos de cellules monocristallines et multicristallines [5].

a.3) Couches minces

Quel que soit le développement des cellules photovoltaïques, il reste un frein majeur malgré leur large disponibilité, mais le prix du kilowattheure (KWc) est très élevé. (KWc) est l'unit de la puissance d'un générateur PV aux Conditions de Test Standard (STC) (1000Wm2 et 25°C). De nombreux types de cellules photovoltaïques visent à réduire la quantité de matériaux utilisés pour les produire, les développer et commencer à industrialiser. Ces techniques, appelées dépôt de ruban en couche mince, visent à réduire l'épaisseur des cellules. La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia), Représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est L'utilisation de substrats à bas coût [5], [4].

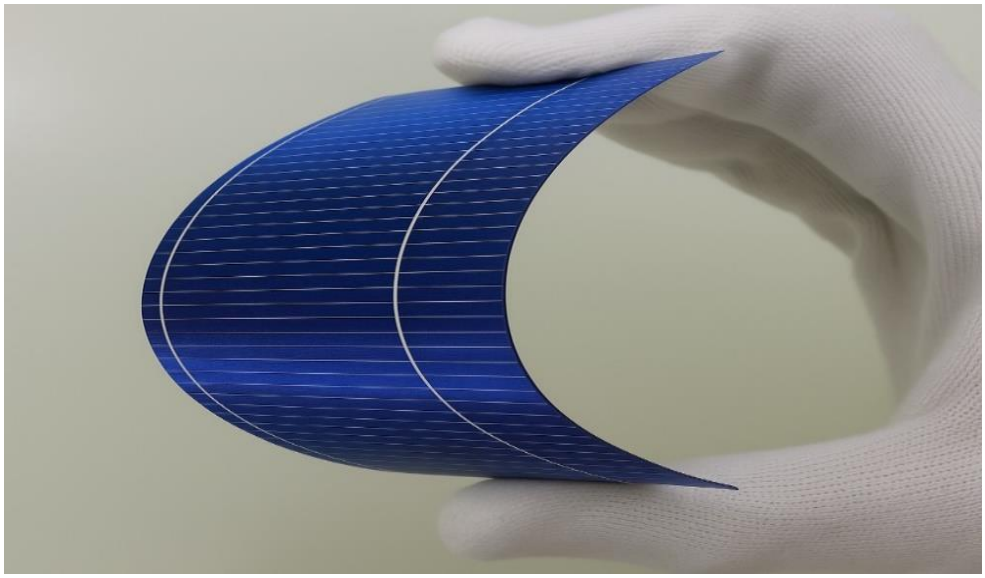


Figure 1.12 Couches minces [4].

1.4.3 Modes de connexion des cellules photovoltaïques

Il est possible de relier des modules en série ou en parallèle pour accroître la tension et l'intensité du courant utilisé. Toutefois, il est essentiel de prendre des mesures de précaution car des cellules moins performantes ou obstruées (à cause d'un ombrage, de la saleté, etc.) peuvent causer des dommages permanents aux cellules [2].

a) Association des cellules en série

Dans un groupement en série, les cellules produisent le même courant dans toute la branche. On prendra soin de ne pas connecter en série que des cellules de caractéristiques identiques. La tension du panneau sera l'addition de toutes les tensions des cellules qui le composent. La caractéristique courant tension d'un groupement série sera homothétique de la courbe I (V) d'une cellule de base [1], [2].

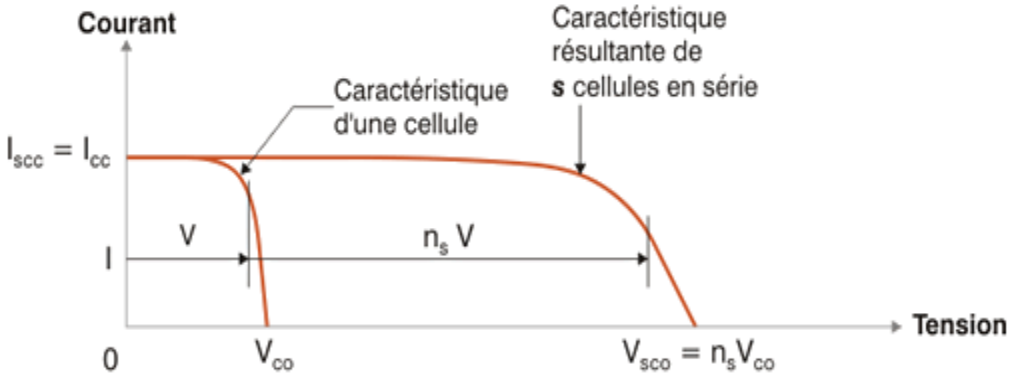


Figure 1.13 Association des cellules en série [2].

b) Association des cellules en parallèle

Pour un groupement en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension. Les courants dans ce cas s'ajoutent. La caractéristique du module de la Figure 1.14 est obtenue en multipliant point par point pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule élémentaire par n_p. Pour les résistances on additionne les inverses des résistances série et parallèle [1]. Où : n_p représente le nombre de cellules en parallèle.

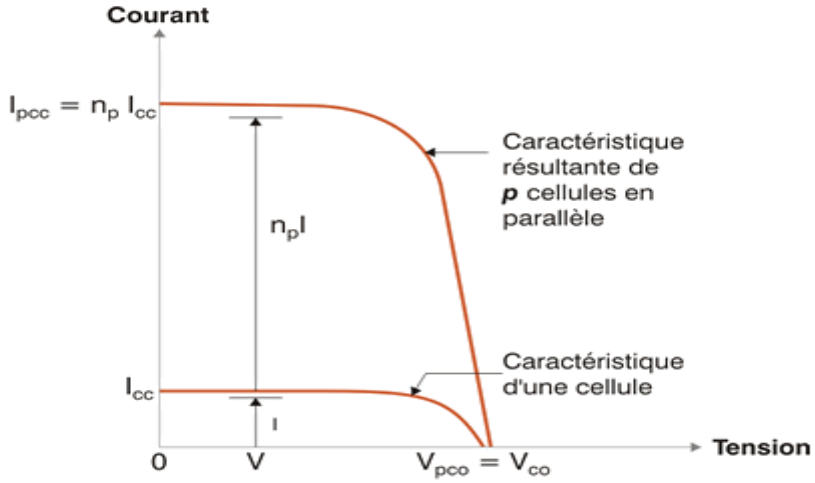


Figure 1.14 Association des cellules en parallèle [2].

1.5 Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I=f(V) :

- La résistance série : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [1], [2].
- La résistance shunt : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle

dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [1], [2].

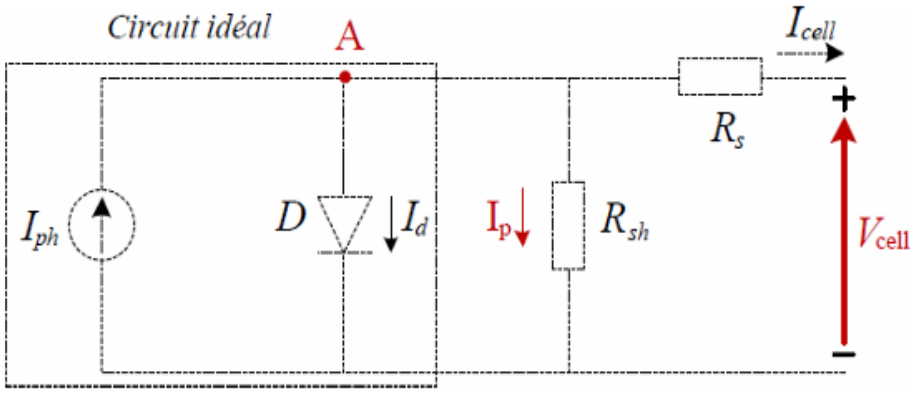


Figure 1.15 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [2].

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes.

Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont : Le photo-courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_o), le facteur d'idéalité de la jonction (A), la résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}). Si on néglige l'effet de R_{sh}, en le considérant infini, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé. Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres. Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude. Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision. Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants [6].

L'étude physique d'une photopile nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge [7], [8] :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1.1)$$

Avec :

- I_{cell} : Courant délivré par la photopile ;
- I_{ph}: Photo courant ;
- I_d : Courant de la diode ;
- I_p: Courant shunt.

On a la résistance (R_{sh}) plus élevée donc on peut négliger le courant (I_p) donc l'équation s'écrit [7] :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d \quad (1.2)$$

a) Le photo-courant I_{ph}

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante [7] :

Avec :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - 298)]\frac{G}{1000} \quad (1.3)$$

- I_{sc} [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur) ;
- K_i [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau ;
- T[K] : Température ambiante ;
- G [W/m²] : Irradiation sur la surface de la cellule ;
- T_{ref} [K] : Température de référence (298 K).

b) Le courant de saturation I_0

Ce courant varie avec la température. Il est donné par la relation suivante [7]:

$$I_0 = I_{rs}\left(\frac{T^3}{T_n}\right).\exp[\frac{q.E_{go}.\left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)}{n.K}] \quad (1.4)$$

Avec :

E_{go} [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

c) Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite I_{rs})

Son expression est donnée par l'équation [8]:

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

Où :

- V_{oc} [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur) ;
- q [°C] : Charge de l'électron (1.602×10^{-19}) ;
- n_s : Nombre de cellules connectées en série ;

- n : Constante d'idéalité de la jonction (1<n<2) ;
- K : Constante de Boltzmann (1.38× 10^{-23} J/K).

d) Le courant de résistance shunt I_p

$$I_p = \frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \tag{1.6}$$

e) Le courant du panneau

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module [7], [8]:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0[\exp(\frac{q(V + I + R_s)}{n \times K \times n_s \times T}) - 1] - I_p \tag{1.7}$$

1.6 Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque produit de l'électricité à partir des rayons du soleil. Son fonctionnement est simple : le panneau photovoltaïque est formé de nombreuses cellules photovoltaïques qui créent du courant continu. Ensuite, à l'aide d'un onduleur, le courant est transformé en courant alternatif. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [6].

1.7 Différents types de systèmes photovoltaïques

Un système (photovoltaïque) PV est un ensemble d'éléments (constituants) de production d'électricité, en utilisant une source solaire. Ces constituants sont essentiellement le champ PV, le conditionnement de puissance, le système de stockage (dans un certain cas). Le conditionnement de puissance peut comprendre : un régulateur seul, un régulateur avec un convertisseur (DC /DC ou/et DC/ AC) ou un convertisseur seul. Un exemple d'un système plus détaillé est montré sur la Figure 1.17 [5], [6].

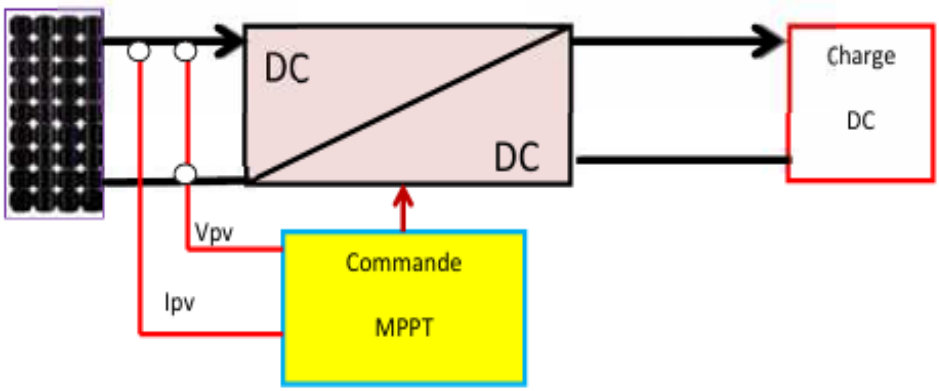


Figure 1.16 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque [6].

On distingue trois types de systèmes PV_s :

- Système PV autonome ;
- Système PV raccordé au réseau ;
- Système hybride.

1.7.1 Système PV autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure 1.17 qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de La production. Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement [9].

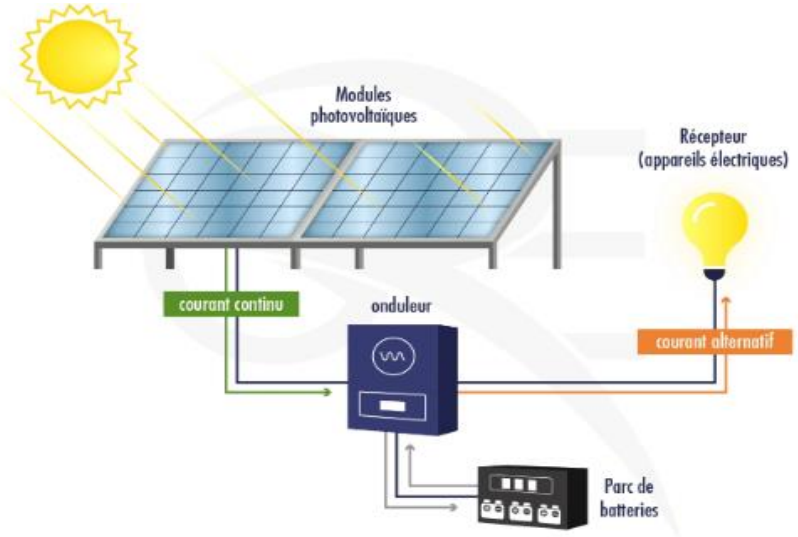


Figure 1.17 Structure d'un système PV autonome [9].

1.7.2 Système PV raccordé au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings. Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs [9].

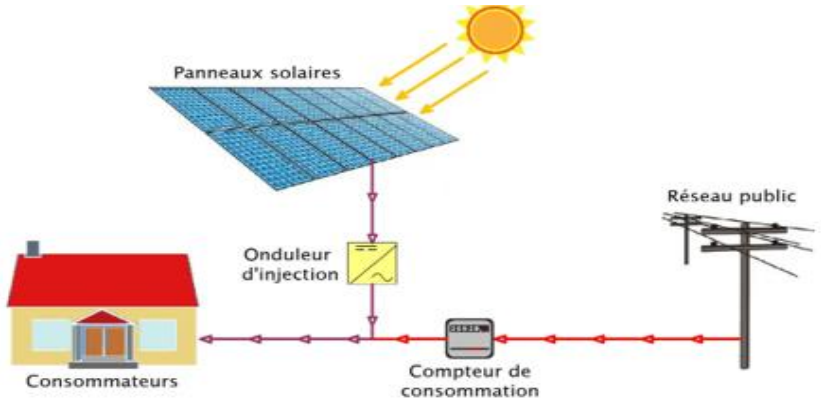


Figure 1.18 Structure d'un système PV raccordé au réseau [9].

1.7.3 Système hybride

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [9].

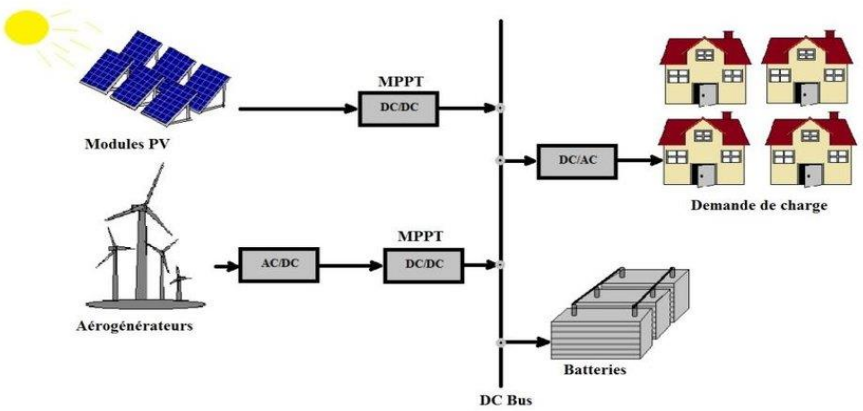


Figure 1.19 Exemple de la structure d'un système PV hybride [9].

1.8 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïque

1.8.1 Avantages des systèmes photovoltaïques

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages [3], [9] :

- D'abord, une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles) qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

1.8.2 Inconvénients des systèmes photovoltaïques

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients [3], [9]:

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes formes d'énergies renouvelables existantes, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation de l'énergie solaire à l'échelle mondiale. Nous avons ensuite décrit le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que les modes de connexion possibles, en abordant les principales technologies associées. La

modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque a également été discutée, accompagnée d'une présentation des différents types de systèmes photovoltaïques. Enfin, les avantages et les inconvénients de ces systèmes ont été exposés. Dans le prochain chapitre, nous traiterons la description et la modélisation du système photovoltaïque autonome utilisant des techniques MPPTs de types P&O et neuronal.

Chapitre 02 :

Description et modélisation du système photovoltaïque autonome utilisant des techniques MPPTs de types P&O et neuronal

2.1 Introduction

Face à la croissance de la demande énergétique et à la nécessité de réduire l'empreinte carbone, les systèmes photovoltaïques (PV) autonomes s'imposent comme une solution durable et efficace pour la production d'énergie électrique. Ces systèmes sont particulièrement adaptés aux sites isolés ou aux applications mobiles où l'accès au réseau électrique est limité voire inexistant.

Pour optimiser le rendement énergétique, il est nécessaire d'intégrer un convertisseur de puissance (DC-DC) contrôlé par un algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). Ce dernier permet d'adapter dynamiquement la charge afin que le générateur photovoltaïque fonctionne toujours à son point de puissance optimale. Parmi les techniques les plus utilisées, on retrouve l'algorithme Perturbe et Observe (P&O), connu pour sa simplicité, et l'approche intelligente basée sur les réseaux de neurones artificiels, qui offre des performances plus robustes dans des conditions complexes [10].

Ce chapitre présente d'abord la structure de base du système photovoltaïque autonome, puis décrit les principes et modélise les techniques de $MPPT_s$ de types P&O et neuronal utilisées pour maximiser la puissance extraite du générateur solaire à travers un convertisseur DC/DC élévateur.

2.2 Système photovoltaïque autonome

Dans le cas d'installations autonomes, les systèmes PV fonctionnent indépendamment des réseaux électriques. L'énergie produite par les panneaux solaires PV est utilisée immédiatement (pompage d'eau, ventilation, …etc.) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 V alternatif via un onduleur. La configuration la plus simple des systèmes autonomes est le couplage direct où le générateur photovoltaïque (GPV) est directement connecté à la charge continue comme le montre la Figure 2.1. Dans cette connexion, la charge ne peut être opérationnelle que pendant les périodes d'ensoleillement suffisant. Ce qui est faisable pour des applications qui n'ont pas besoin de fonctionner la nuit ou dans l'obscurité comme le pompage de l'eau [11].

Figure 2.1 Couplage direct GPV-charge [11].

Pour les applications nécessitant une alimentation électrique continue, y compris durant la nuit ou en l'absence de lumière solaire, l'intégration d'un système de stockage d'énergie est indispensable. L'énergie produite par les modules photovoltaïques est alors stockée dans des batteries, appelées accumulateurs, afin d'être utilisée ultérieurement, notamment lorsque l'ensoleillement est insuffisant ou inexistant [11].

Cependant, dans un système solaire autonome, la batterie constitue souvent l'élément le plus fragile et le moins durable. Pour prolonger sa durée de vie, il est essentiel d'éviter à la fois la surcharge (qui survient lorsque la tension dépasse un seuil critique) et la décharge profonde (qui correspond à une perte excessive de capacité, généralement au-delà de 60 %). Ces protections sont assurées par un contrôleur de charge, également appelé régulateur charge-décharge.

Ce dispositif électronique intelligent joue un rôle central dans la gestion énergétique du système. Lorsque la production d'énergie dépasse la consommation, l'excédent est stocké dans les batteries, jusqu'à atteindre leur niveau de charge maximal. À l'inverse, lorsque la production est insuffisante, les batteries compensent le déficit en fournissant l'énergie requise, jusqu'à atteindre leur limite de décharge autorisée [11].

Deux architectures plus courantes des systèmes PV autonomes avec stockage d'énergie alimentant à la fois des charges DC et AC sont illustrées dans les Figures 2.2 et 2.3. La seule différence entre les deux réside dans le fait que la sortie du GPV est connectée à un convertisseur DC/AC pour la première, et à un convertisseur DC/DC pour la seconde.

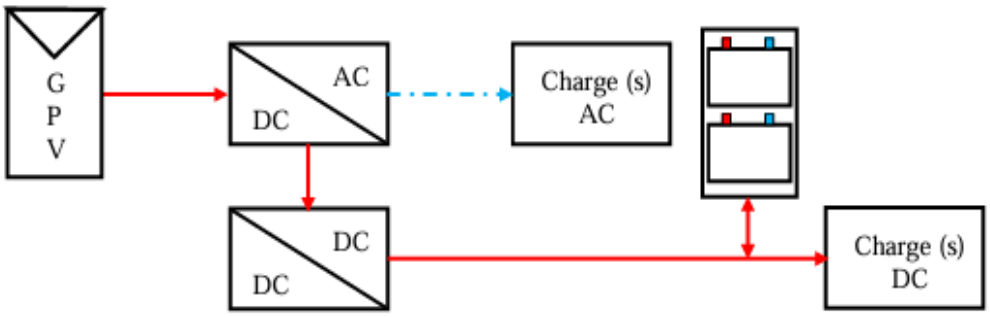


Figure 2.2 Système PV autonome alimentant des charges DC et AC [11].

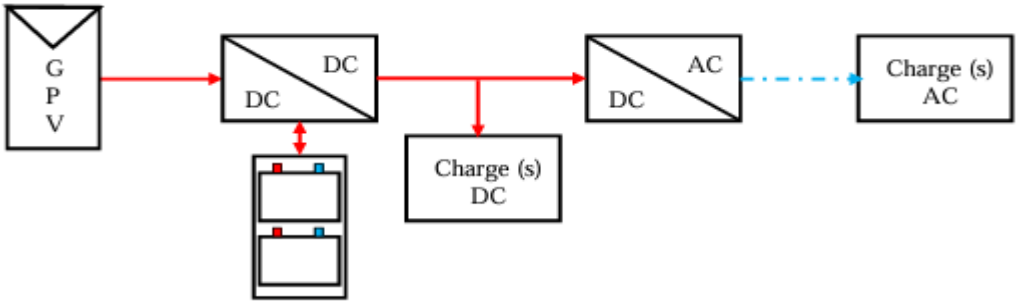


Figure 2.3 Système PV autonome alimentant des charges DC et AC (étage 1 est DC/DC) [11].

2.3 Différentes structures du convertisseur DC/DC

Dans les systèmes photovoltaïques, il est essentiel d'utiliser des convertisseurs DC/DC pour ajuster la tension entre la source d'énergie (panneau solaire ou batterie) et la charge. Selon la variation de tension désirée, on identifie principalement trois sortes de structures : le convertisseur abaisseur (Buck), l'élévateur (boost) et l'abaisseur-élévateur (Buck-boost) [9].

2.3.1 Convertisseur dévolteur (Buck)

Le convertisseur dévolteur est un convertisseur statique continu-continu, son rôle principal est de convertir sa tension d'entrée en tension de sortie inférieure. Le convertisseur dévolteur est constitué de condensateurs, d'une inductance, d'une diode et d'un commutateur.

Habituellement, le commutateur est un transistor MOSFET ou IGBT, qui sont des dispositifs semi-conducteurs fonctionnant en mode (ON-OFF) [9].

La Figure 2.4 représente le circuit idéal du hacheur série (convertisseur dévolteur) :

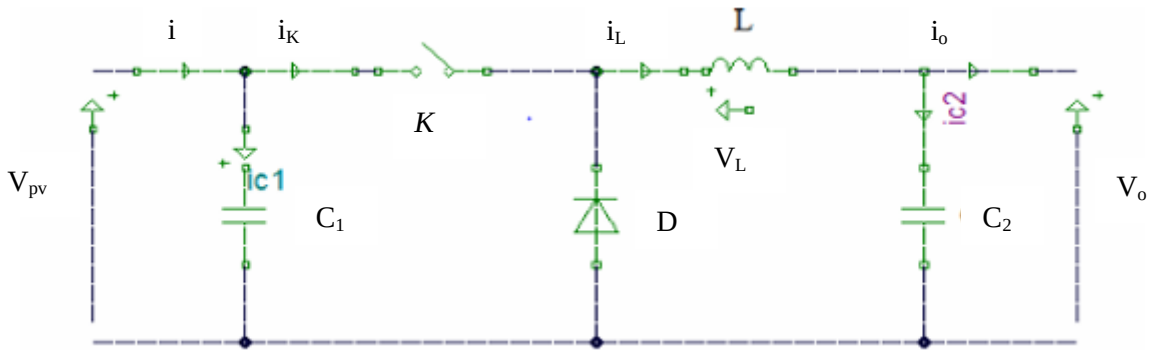


Figure 2.4 Circuit idéal de convertisseur dévolteur [9].

2.3.2 Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

Le convertisseur Buck-Boost est un convertisseur DC-DC qui combine les fonctions des convertisseurs Buck et Boost. Ce type de convertisseur permet à la tension de sortie d'être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée [9].

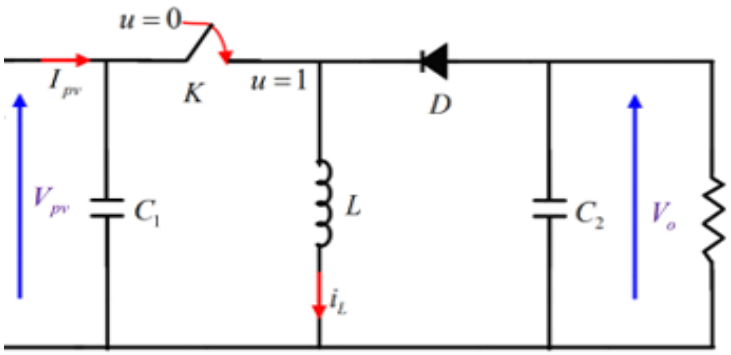


Figure 2.5 Convertisseur Buck-Boost [9].

2.3.3 Convertisseur survolteur (Boost)

Le convertisseur Boost, ou convertisseur élévateur, est un type de convertisseur DC-DC utilisé pour convertir une tension continue en une autre tension continue d'une valeur supérieure. Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la sortie, le cycle de fonctionnement de période d'hachage (T) comporte deux états [14]. Selon les Figures 2.7.a et 2.7.b :

- L'état d'accumulation de l'énergie : lorsque l'interrupteur est fermé (état passant), cela entraine l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique, la diode est alors est bloquée la charge est alors déconnectée de l'alimentation, cette phase dure de (0) à (DT).
- Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa F.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur), le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie, accumulée dans l'inductance vers la capacité, cette phase dure de (DT) à (T) [11], [12].

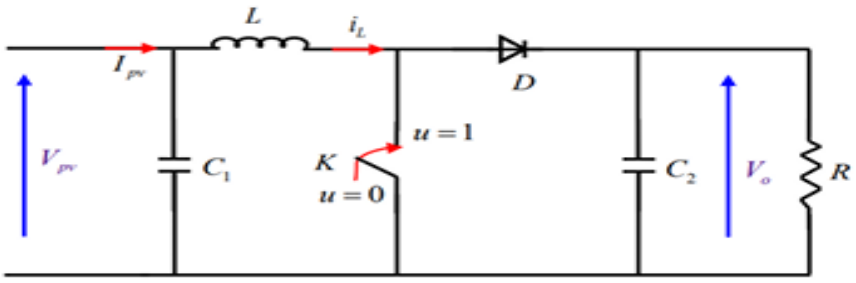


Figure 2.6 Convertisseur survolteur (Boost) (structure globale (a)) [14].

Avec :

- L : inductance ;
- C_1 : condensateur d'entrée ;
- C_2 : condensateur de sortie.

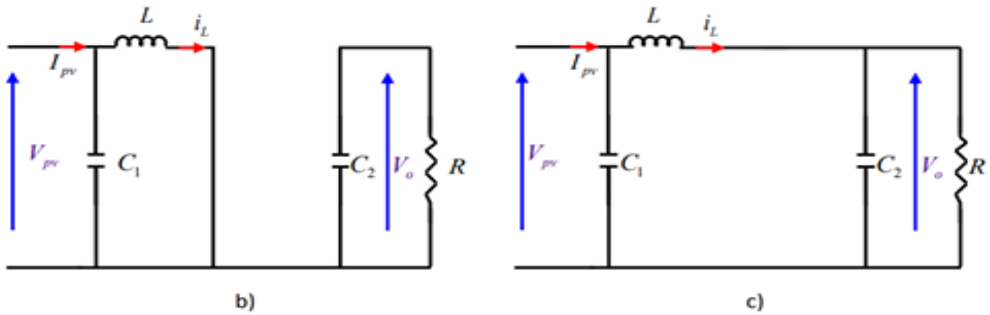


Figure 2.7 Structure avec interrupteur fermé (b) et structure avec interrupteur ouvert (c) [14].

Dans le cas où K est fermé ($0<t<\alpha Td$), le circuit du convertisseur devient celui de la Figure

2.7.a et les équations qui régissent son fonctionnement sont :

$$\begin{cases} \dfrac{di_L}{dt} = \dfrac{V_{pv}}{L} \\ \dfrac{dV_0}{dt} = -\dfrac{V_0}{RC_2} \end{cases} \quad (2.1)$$

Dans le cas où K est ouvert ($\alpha Td<t<Td$) le circuit du convertisseur devient celui de la Figure 2.7.b et les équations qui régissent son fonctionnement sont :

$$\begin{cases} \dfrac{di_L}{dt} = \dfrac{V_{pv}}{L} - \dfrac{V_0}{L} \\ \dfrac{dV_0}{dt} = -\dfrac{V_0}{RC_2} + \dfrac{i_L}{C_2} \end{cases} \quad (2.2)$$

En combinant (2.1) et (2.2), les équations dynamiques de ce convertisseur peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} \dfrac{di_L}{dt} = \dfrac{V_{pv} - V_0}{L} + \dfrac{V_0}{L}.u \\ \dfrac{dV_0}{dt} = -\dfrac{V_0}{RC_2} + \dfrac{i_L}{C_2} - \dfrac{i_L}{C_2}.u \end{cases} \quad (2.3)$$

Où :

- V_0 et i_L sont respectivement la tension du condensateur de sortie et le courant d'inductance ;
- V_{pv} : Tension du panneau photovoltaïque ;
- u : Paramètre de la position du commutateur.

2.4 Utilité et principe de la commande MPPT

Un MPPT, ou suivi du point de puissance maximale, est une méthode qui permet, comme son appellation l'indique, de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. On associe généralement les systèmes MPPT$_s$avec les générateurs solaires [12].

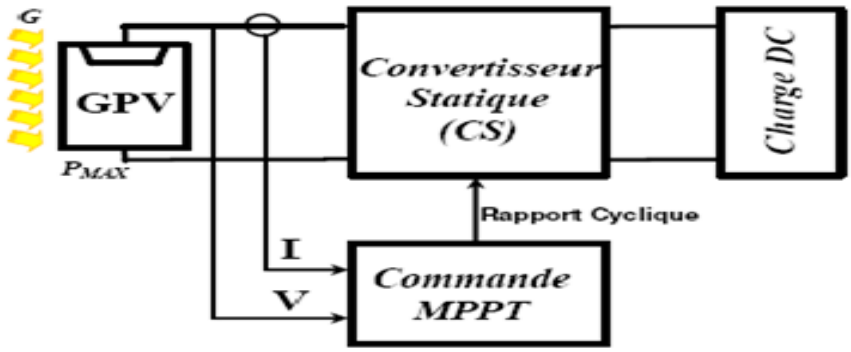


Figure 2.8 Principe de la conversion d'énergie par MPPT [12].

Une commande MPPT, liée à une phase d'adaptation intermédiaire, permet d'exploiter un générateur photovoltaïque de manière à obtenir constamment sa puissance maximale. Par conséquent, peu importe les conditions climatiques (températures et irradiations). La gestion du convertisseur permet au système d'atteindre le point de fonctionnement maximal (Vmpp, Impp), en fonction de l'éclairement [11], [12].

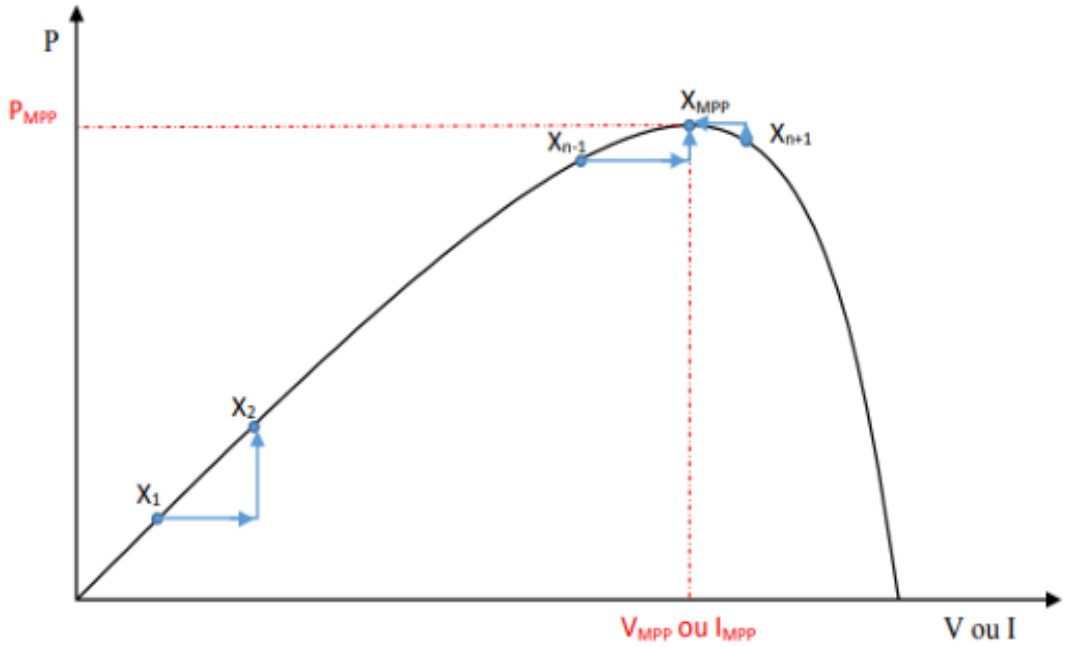


Figure 2.9 Principe de la commande MPPT [12].

2.4.1 Stratégie MPPT de type P&O

Le principe de la commande MPPT de type P&O consiste à perturber la tension Vpv d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance Ppv qui en résulte ainsi, comme l'illustre-la Figure 2.10. On peut en déduire que si une incrémentation positive de la tension Vpv engendre un accroissement de la puissance Ppv, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique Ppv=f(Vpv), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [10], [13].

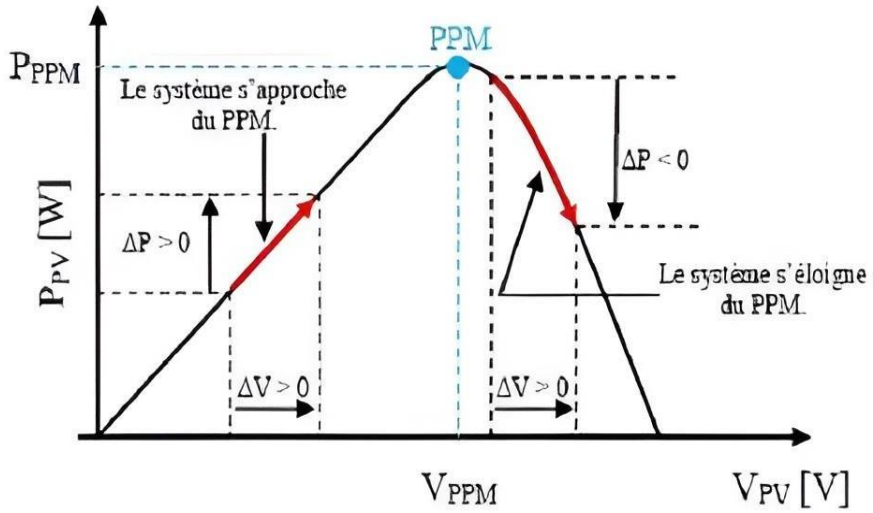


Figure 2.10 Recherche du PPM par la méthode (P&O) [13].

Pour résumer, si la puissance Ppv augmente suite à une perturbation de tension, la direction de cette perturbation est conservée. Dans le cas inverse, elle est inversée afin de revenir vers le nouveau PPM. La Figure 2.11 illustre l'algorithme traditionnel lié à un contrôle MPPT de type (P&O), où la progression de la puissance est examinée après chaque variation de tension [14].

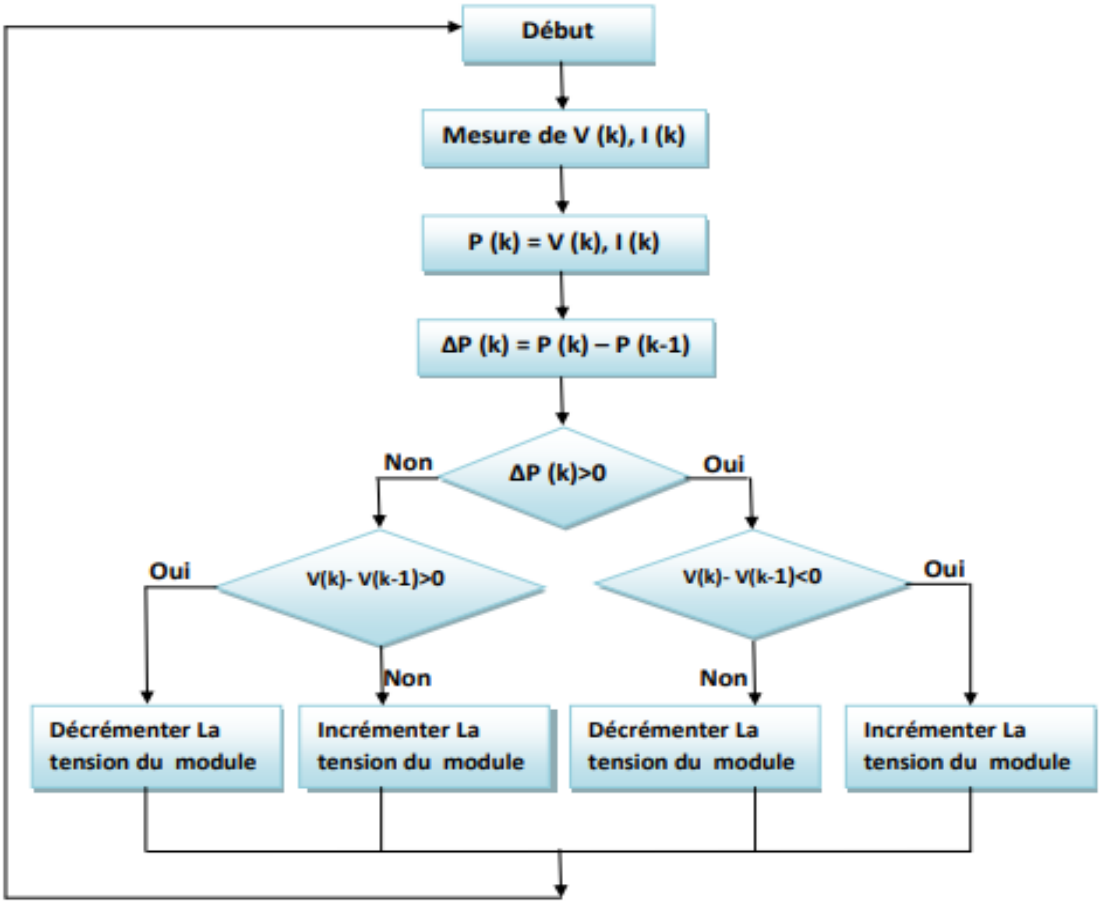


Figure 2.11 Organigramme de l'algorithme P&O [13].

2.4.2 Stratégie MPPT de type neuronal

Les réseaux de neurones, qui sont des structures cellulaires artificielles, offre une perspective innovante pour traiter les enjeux de perception, de mémoire, d'apprentissage et de raisonnement. Ils se révèlent également être des options très prometteuses pour surmonter certaines des contraintes des ordinateurs traditionnels. Grâce à leurs capacités de traiter l'information en parallèle et à leurs mécanismes inspirés des neurones, ils déduisent des caractéristiques émergentes qui permettent de résoudre des problèmes dits complexes [15].

Le système nerveux est composé de plusieurs neurones interconnectés ; bien qu'il existe une grande diversité de neurones, ils fonctionnent tous sur le même schéma. Ils se décomposent en trois régions principales [15] :

- Le corps cellulaire ;
- Les dendrites ;
- L'axone.

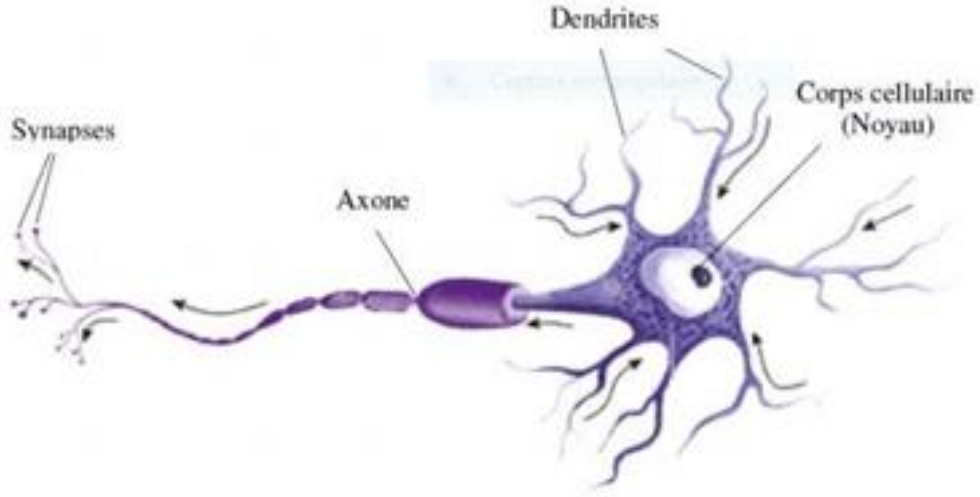


Figure 2.12 Représentation schématique d'un neurone biologique [15].

2.4.2.1 Neurone artificiel

Le neurone artificiel est une représentation mathématique qui reproduit le fonctionnement du neurone biologique, notamment en ce qui concerne l'agrégation des signaux entrants. Il comprend des entrées qui peuvent être les sorties d'autres neurones ou les signaux provenant de l'environnement extérieur. La sortie est déterminée en effectuant la somme pondérée des entrées, chaque entrée étant associée à un poids de connexion spécifique, suivie d'une transformation non linéaire appelée fonction d'activation comme l'indique l'équation suivante [15], [16] :

$$S = \sum_{i=1}^{n} W_i . X_i + b \qquad (2.4)$$

Où :

- (x_1, x_2 , …, x_m) : sont les entrées du neurone (signaux qui lui parviennent) ;
- (w_1, w_2 , …, w_n) : sont les poids associés à chaque connexion ;
- b : le seuil d'activation ;
- S : la somme pondérée des entrées (potentiel d'activation).

Enfin, la représentation schématique du neurone artificiel est donnée par la Figure 2.13.

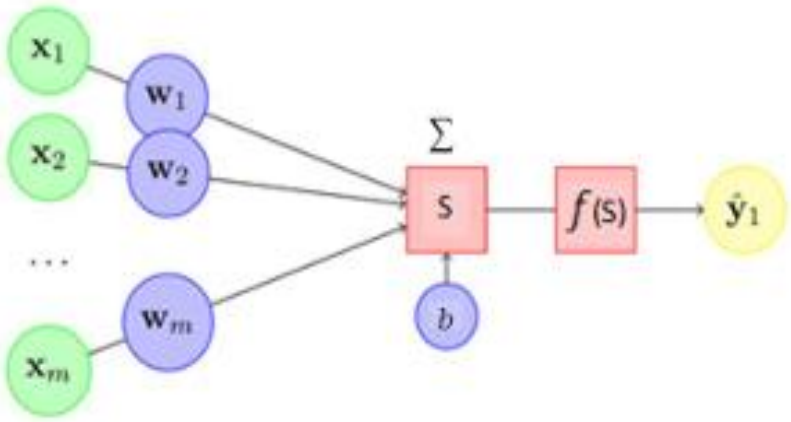


Figure 2.13 Représentation schématique d'un neurone artificiel [16].

2.4.2.2 Architecture des réseaux de neurones

a) Réseaux non bouclés

Ces réseaux de neurones se distinguent par une propagation en un sens sans rétroaction, aussi connue sous le nom de (Feed-Forward). La sortie est calculée directement à partir de l'entrée, sans tenir compte des sorties antérieures du réseau. Lorsque certains neurones ne sont pas directement connectés aux sorties du réseau, on les désigne parfois comme des neurones cachés [17].

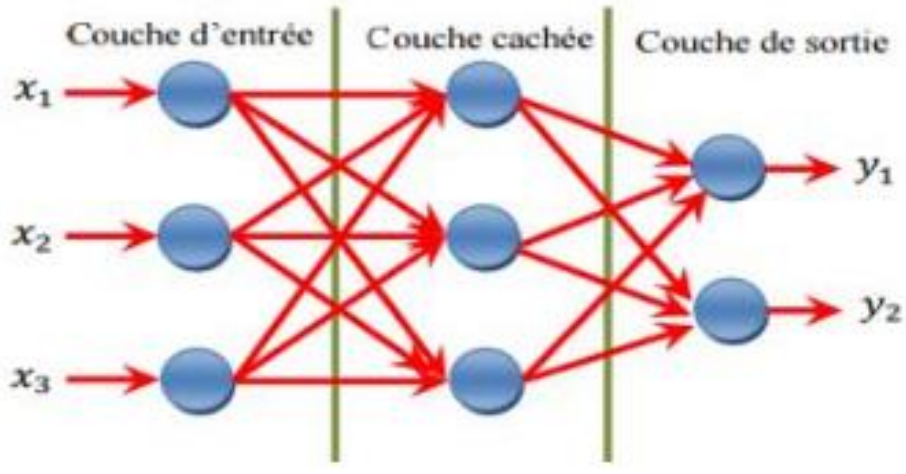


Figure 2.14 Réseau non bouclé [17].

b) Réseaux bouclés

Un réseau bouclé est un type de réseau informatique dans lequel les données sont transmises en boucle à travers plusieurs nœuds. Dans un réseau bouclé, chaque nœud reçoit les données, les traite et les transmet à un autre nœud, qui les traite à son tour avant de les renvoyer au nœud d'origine. Ce processus se répète jusqu'à ce que les données atteignent leur destination finale ou jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt spécifique soit rencontrée [15].

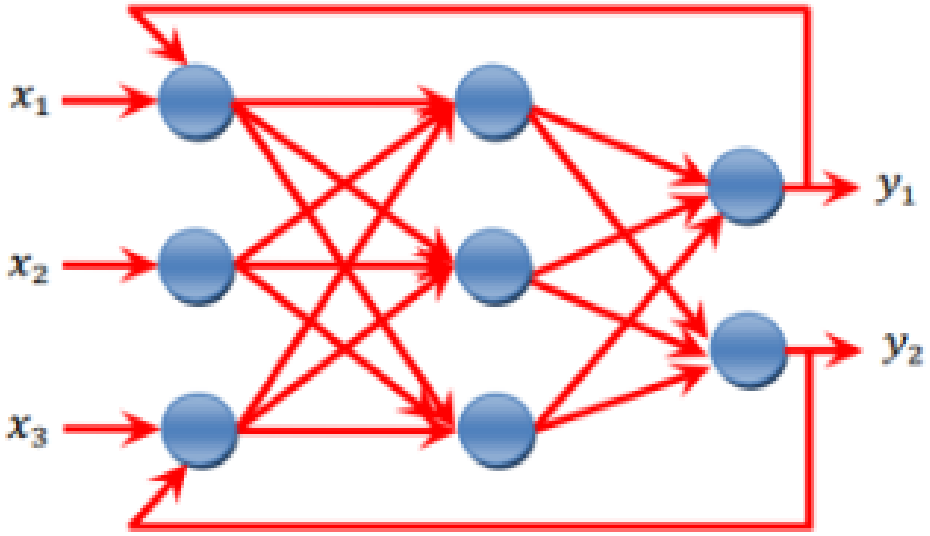


Figure 2.15 Réseau bouclé [17].

2.4.2.3 Perceptrons multicouches

Le perceptron multicouche est un réseau de neurones organisé en couches successives : on utilise le plus souvent des réseaux particuliers organisés en couches. L'influx d'information va toujours des couches d'entrées aux couches de sorties. Ces réseaux peuvent être appris par descente de gradient. Ils sont adaptés aux données de tailles fixes, comme des images. Ils portent le nom de perceptron multicouche (PMC), Feed-Forward ou Multi Layer Perceptron (MLP) en anglais [12], [15].

Ce réseau présente les caractéristiques suivantes :

- Il comporte une seule couche de sortie ;
- Il peut comporter d'une à plusieurs couches cachées ;
- Chaque neurone est uniquement relié à tous les neurones de la couche suivante ;
- La fonction d'activation doit être de préférence strictement croissante et bornée.

Lorsque le vecteur de caractéristiques d'un objet est présenté à l'entrée du réseau, il est communiqué à tous les neurones de la première couche (couche d'entrée). Les sorties des neurones

de cette couche sont alors communiquées aux neurones de la couche suivante (couches cachées), et ainsi de suite. La dernière couche du réseau est appelée couche de sortie. Les autres étant désignées sous le terme de couches cachées car les valeurs de sortie de leurs neurones ne sont pas accessibles de l'extérieur. Pour apprendre le perceptron multicouche on utilise un algorithme d'apprentissage supervisé de type rétropropagation du gradient ; on présente au réseau des entrées et on lui demande de modifier sa pondération de telle sorte que l'on retrouve la sortie correspondante [15], [18].

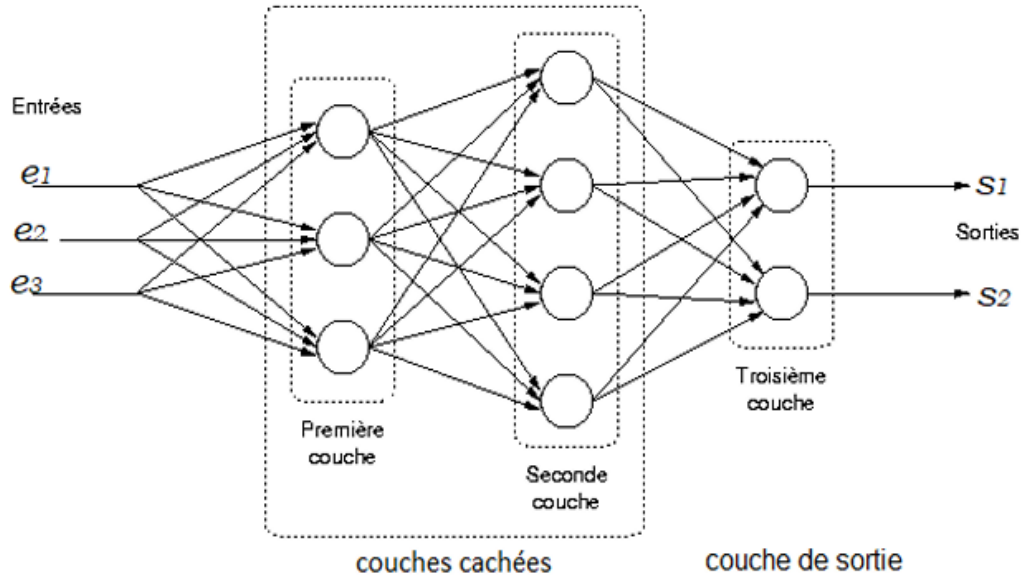


Figure 2.16 Modèle de réseaux de neurones MLP pour identification de MPPT [18].

2.4.2.4 Apprentissage dans les réseaux de neurones

L'apprentissage dans le contexte des réseaux de neurones est le processus de modification des poids de connexions (y compris les biais) ou plus rarement du nombre de couches et de neurones, afin d'adapter le traitement effectué par le réseau à une tache particulière [16].

On distingue trois familles d'apprentissage :

a) Apprentissage supervisé

Dans ce cas, un superviseur (ou expert humain) fournit une valeur ou un vecteur de sortie (appelé cible ou sortie désirée), que le réseau de neurones doit associer à un vecteur d'entrée. L'apprentissage consiste dans ce cas à ajuster les paramètres du réseau afin de minimiser l'erreur entre la sortie désirée et la sortie réelle du réseau [16].

b) Apprentissage semi-supervisé ou apprentissage par renforcement

Ce mode d'apprentissage, suppose qu'un comportement de référence n'est pas possible, mais en revanche, il est possible d'obtenir des indications qualitatives (vrai, faux, ...) sur les performances du réseau [19].

c) Apprentissage non supervisé

Dans cet apprentissage, les données ne contiennent pas d'informations sur la sortie désirée. Il n'y a pas de superviseur. La tâche du réseau consiste, par exemple dans ce cas, à créer des regroupements de données selon des propriétés communes (classification) [16].

2.4.2.5 Avantages et inconvénients de réseaux de neurones artificiels

Les avantages et les inconvénients sont les suivants [11], [16], [20] :

2.4.2.5.1 Avantages

- Une tolérance aux incertitudes très élevées.
- Un choix de réseaux, types, architecture et fonctions d'activations diverses.
- Les réseaux de neurones peuvent apprendre et généraliser à partir des simples données d'entrée et de sortie.
- Les réseaux de neurones sont en effet des approximations universelles.
- Les réseaux de neurones sont également capables d'analyser des relations spatiales et topologiques.

2.4.2.5.2 Inconvénients

- La nature non linéaire des RNAs peut piéger l'utilisateur dans un minimum local.
- Malgré une solide base théorique, le choix du réseau incombe souvent à l'utilisateur car il n'existe pas de guide prouvé pour toute utilisation.
- Un réseau de neurones est une « boîte noire » qui n'explique pas ses décisions.
- Le temps d'apprentissage peut être long.

2.4.2.6 Présentation et description de la stratégie MPPT de type neuronal appliquée

La stratégie MPPT de type neuronal se base sur l'emploi des réseaux de neurones artificiels pour maximiser l'extraction de la puissance la plus élevée du système photovoltaïque. Cette technique judicieuse offre la possibilité de prévoir, en se basant sur des variables d'entrée comme l'irradiation solaire et la température ambiante.

Dans le cadre de notre travail, nous avons développé deux réseaux de neurones artificiels afin d'analyser l'effet des paramètres climatiques notamment l'irradiation solaire et la température ambiante sur les performances du système photovoltaïque étudié. Le premier réseau neuronal est conçu pour fonctionner dans le cas où l'irradiation varie alors que la température reste constante, tandis lorsque le second réseau et destiné à fonctionner lorsque l'irradiation est constante et la température varie. Ces deux réseaux neuronaux partagent les mêmes données de structures et paramètres d'apprentissages. Le réseau de neurones artificiels développé pour chaque cas est de type perceptron multicouches, entrainé par l'algorithme de retro-propagation.

Ce choix méthodologique a pour but de distinguer l'impact de chaque variable séparément, et ainsi d'améliorer la précision de la modélisation neuronale. Comme le montre la Figure 2.17, le réseau neuronal conçu est composé d'une couche d'entrée contenant deux neurones correspondant aux variables Ipv et Vpv, d'une couche cachée constituée de 10 neurones, ainsi que d'une couche de sortie comprenant un seul neurone chargé de prédire le rapport cyclique. Ce dernier participe à la détermination de l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur de puissance du hacheur Boost dans le système solaire étudié. D'autre part, la couche cachée utilise une fonction d'activation de type ‘‘Tarsing’’.

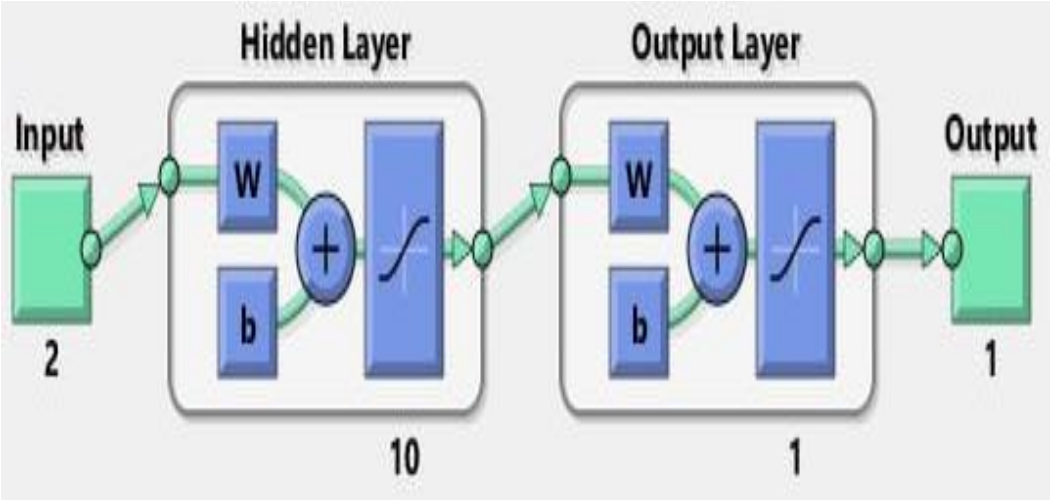


Figure 2.17 Structure adoptée pour la stratégie MPPT neuronale développée.

Enfin, pour davantage d'informations sur la conception de la stratégie MPPT neuronale, les Figures 2.18, 2.19, et 2.20 présentent respectivement : l'interface d'apprentissage de la méthode MPPT neuronale, les allures de performances de validation, ainsi que les graphes de régressions illustrant la relation entre les sorties du réseau neuronal et les cibles attendues.

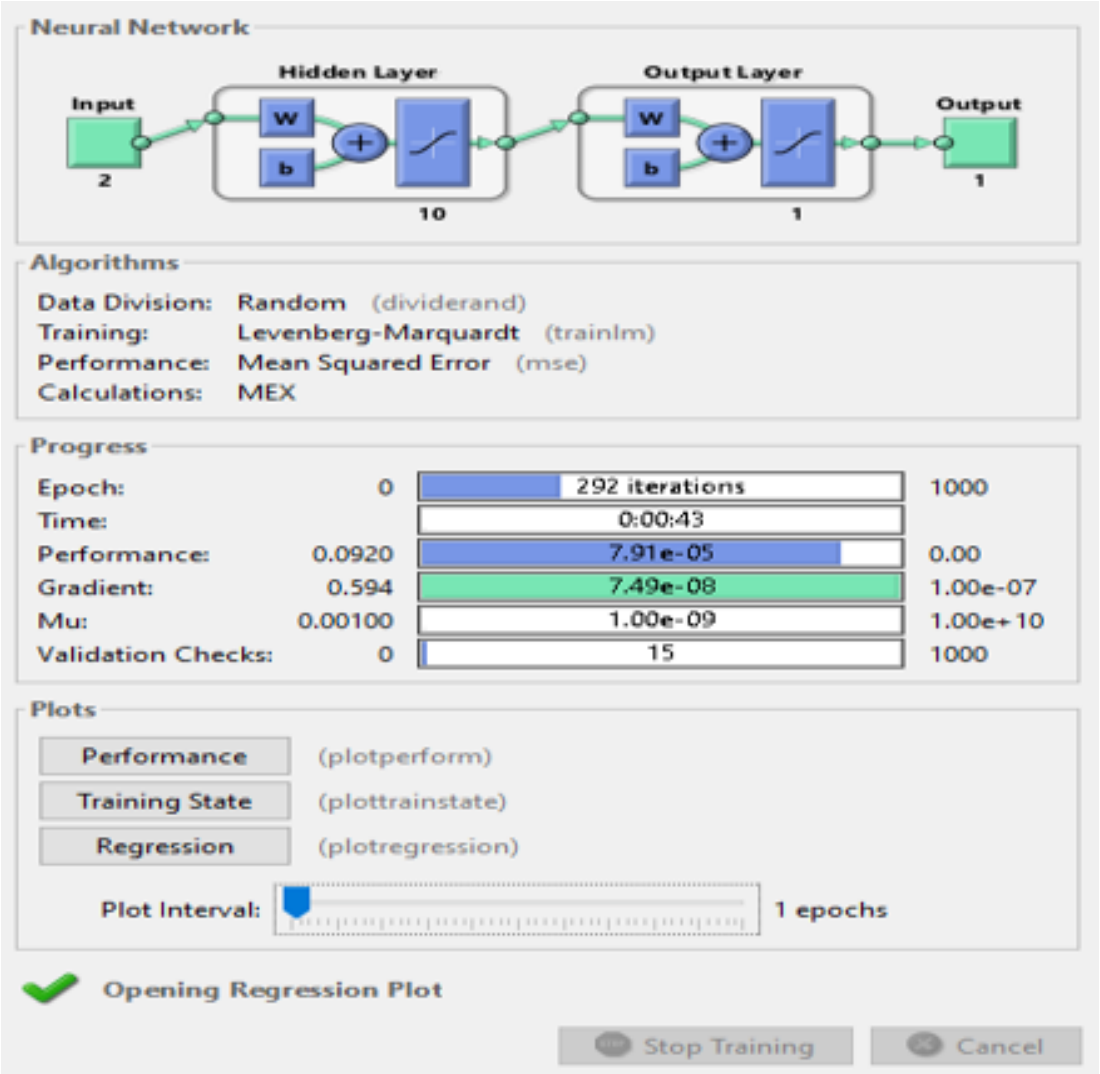


Figure 2.18 Interface d'apprentissage de la stratégie MPPT neuronale.

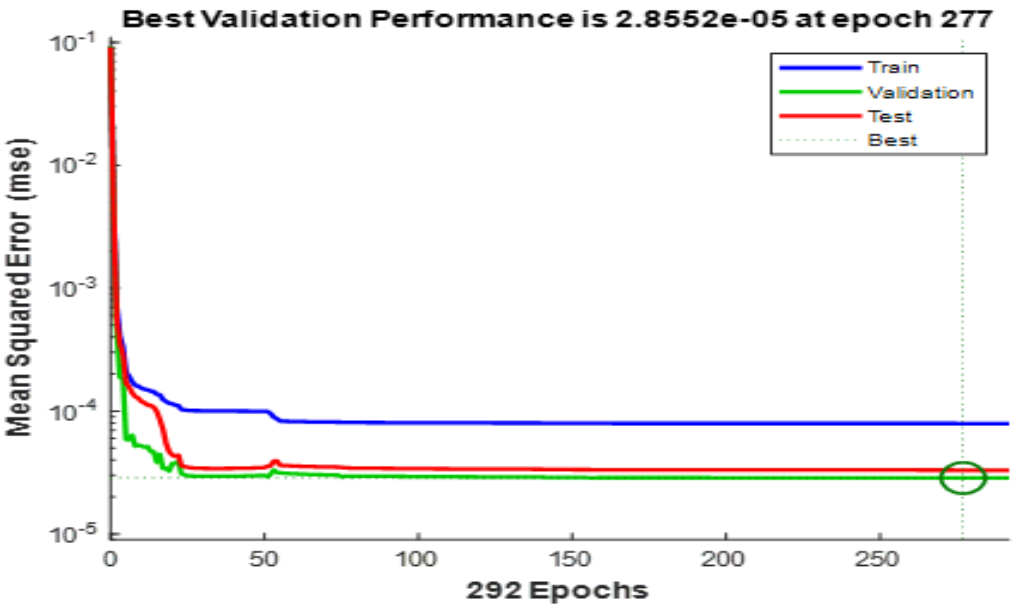


Figure 2.19 Performances de validation de la stratégie MPPT neuronale.

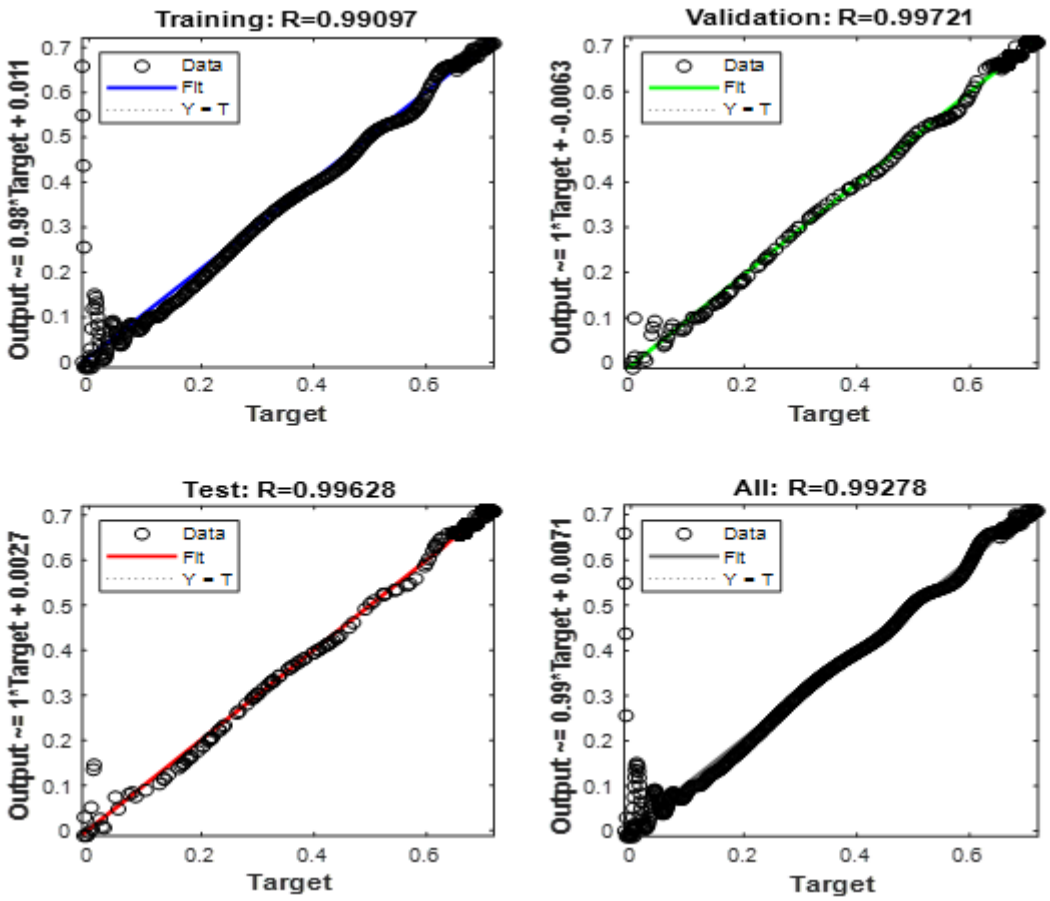


Figure 2.20 Allures de régressions de la stratégie MPPT neuronale.

2.5 Conclusion

Ce chapitre s'est penché sur l'étude approfondie de deux méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) utilisées dans les systèmes photovoltaïques indépendants, en mettant l'accent sur les stratégies P&O et neuronale. Ces deux stratégies ont été appliquées à un système solaire autonome intégrant un convertisseur DC-DC de type élévateur, dont la modélisation a été présentée dans ce chapitre. Les algorithmes $MPPT_s$, à savoir les méthodes P&O et neuronale, ont été décrits et analysés en détails. Enfin, le prochain chapitre sera dédié à l'évaluation comparative de ces deux stratégies à l'aide du logiciel MATLAB /Simulink.

Chapitre 03 :

Présentations et discussions des résultats de simulations

3.1 Introduction

Le MATLAB/Simulink est un logiciel de modélisation, de simulation et d'analyse très répandu dans le domaine du génie électrique**.** Il permet de concevoir, tester et optimiser des systèmes électriques de manière visuelle et interactive [21]. La simulation à l'aide de ce logiciel est essentielle pour la conception de systèmes photovoltaïques optimisés et performants. Le MATLAB/Simulink accélère le développement, réduit les coûts de prototypage et permet d'anticiper les défis rencontrés en conditions réelles [21]. Ce troisième chapitre présente la simulation complète, sous MATLAB/Simulink, d'un système photovoltaïque autonome basé sur deux stratégies de commandes $MPPT_s$: l'une conventionnelle de type P&O et l'autre avancée basée sur les réseaux de neurones artificiels. Les performances des deux techniques $MPPT_s$ ont été présentées et comparées sous différentes conditions de fonctionnement, notamment en tenant compte des variations de température et d'irradiation solaire.

3.2 Résultats de simulation du panneau solaire

3.2.1Caractéristiques du module PV

Le Tableau 3.1 présente les caractéristiques électriques du module PV utilisé dans notre projet de fin d'études [22].

Tableau 3.1 Caractéristiques du module PV appliqué [22]**.**

Paramètres et indices	Valeurs et unités
Puissance maximale (P_m)	200 (W)
Tension au PPM (V_{mp})	26.4 (V)
Courant au PPM (I_{mp})	7.58 (A)
Tension à vide (V_{oc})	32.9 (V)
Courant de court-circuit (I_{cc})	8.21 (A)
Résistance série (R_s)	0.22 (Ω)
Résistance de shunt (R_{sh})	415.405 (Ω)
Nombre de cellules en série (n_s)	54
Température nominale (T_n)	298 (K)
Constante de Boltzmann (K)	1.38×10^{-23} (J/K)
Charge de l'électron (q)	1.6×10^{-19} (C)

3.2.2 Simulation du panneau PV

Sous une température constante de 25 °C, les courbes de la caractéristique P–V et I–V du panneau photovoltaïque, correspondant aux différents niveaux d'irradiation (G = 500, 750 et 1000 W/m²), sont présentées dans les Figures 3.1 et 3.2.

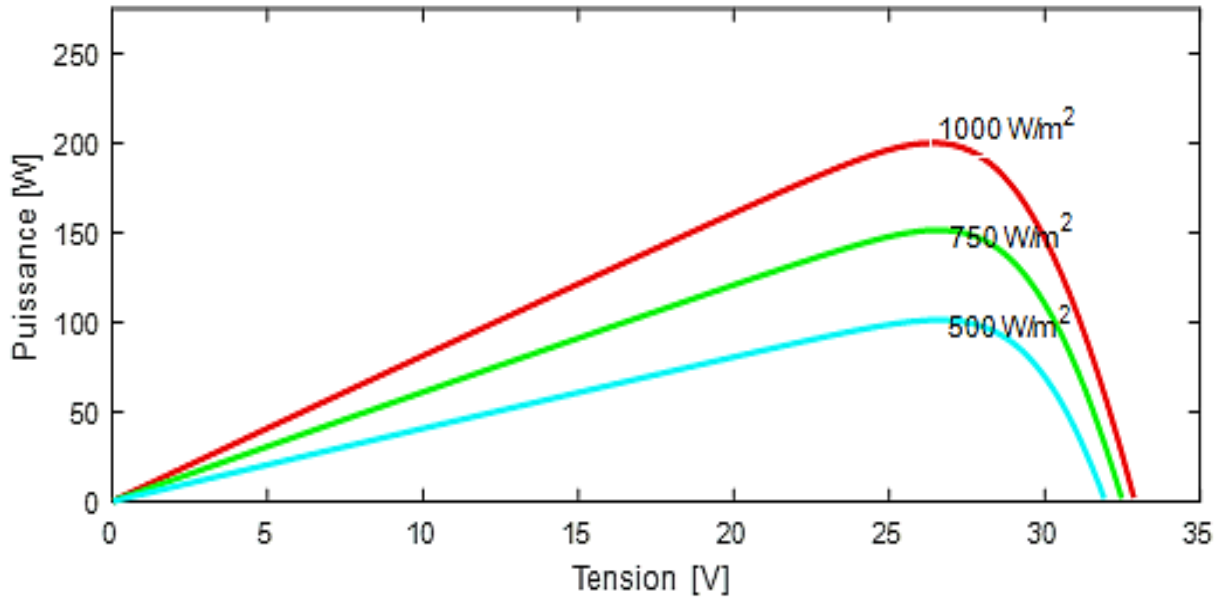


Figure 3.1 Effet de l'éclairement solaire sur la caractéristique P-V.

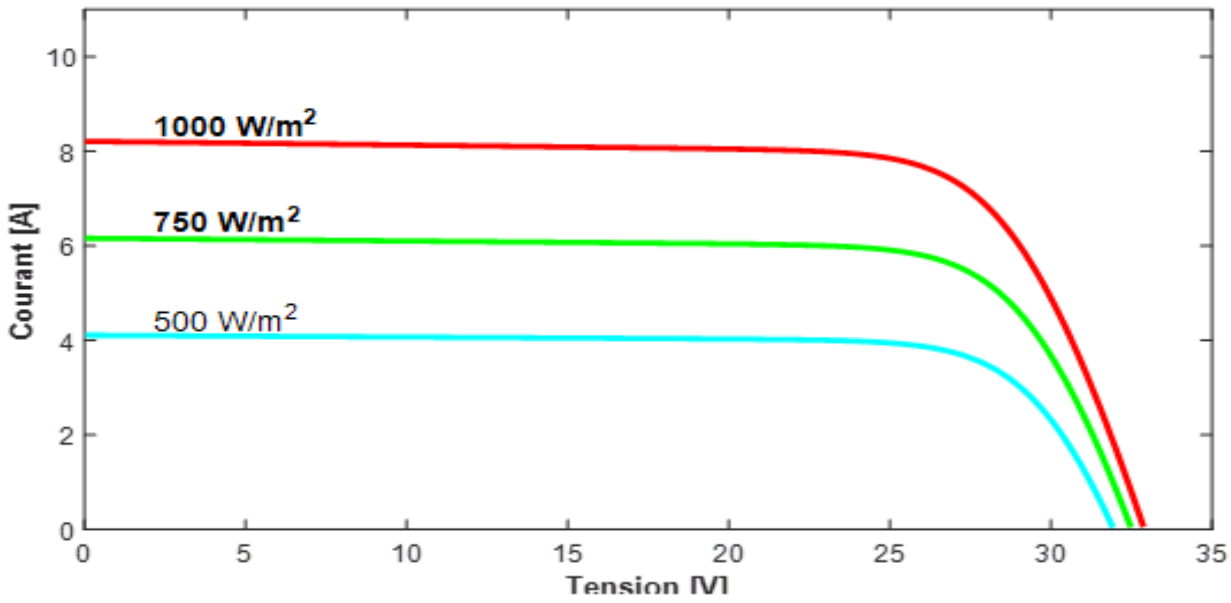


Figure 3.2 Effet de l'éclairement solaire sur la caractéristique I-V.

Comme l'illustrent les Figures 3.1 et 3.2, l'augmentation de l'irradiation n'a qu'un faible impact sur la tension à vide (V_{oc}), qui reste quasiment constante. D'autre part, la puissance du PV ainsi que le courant de court-circuit (I_{cc}) augmentent lorsque l'intensité de l'éclairement augmente.

Sous une irradiation constante de 1000 W/m², les courbes des caractéristiques P–V et I–V du panneau photovoltaïque, correspondant à différentes températures (25, 40 et 60 °C), sont illustrées dans les Figures 3.3 et 3.4. Comme l'indiquent les Figures 3.3 et 3.4, une élévation de la température entraîne une diminution de la puissance maximale (P_m) et de la tension à vide (V_{oc}), tandis que le courant de court-circuit (I_{cc}) demeure quasiment constant.

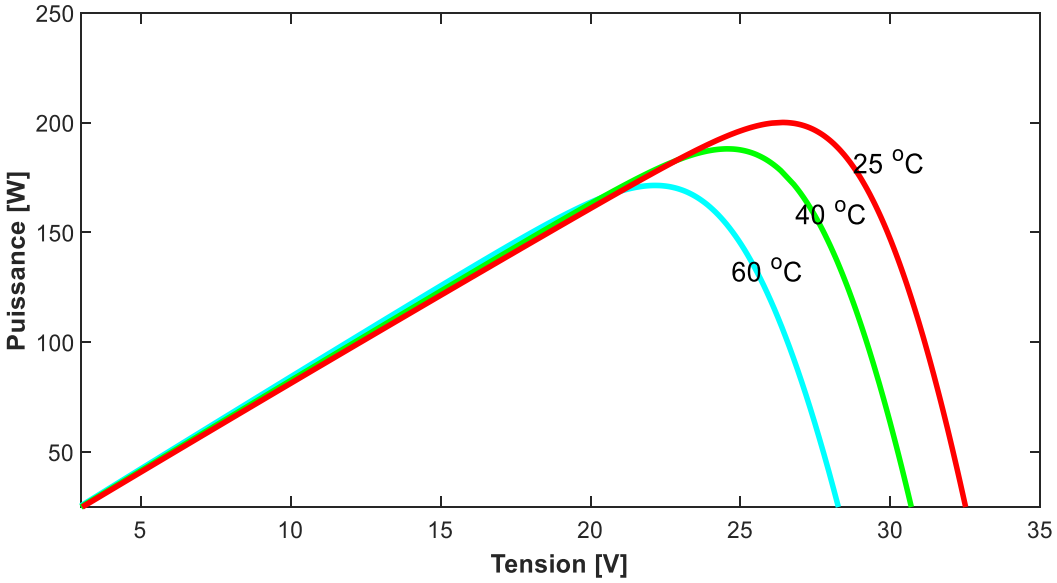


Figure 3.3 Effet de la température sur la caractéristique P-V.

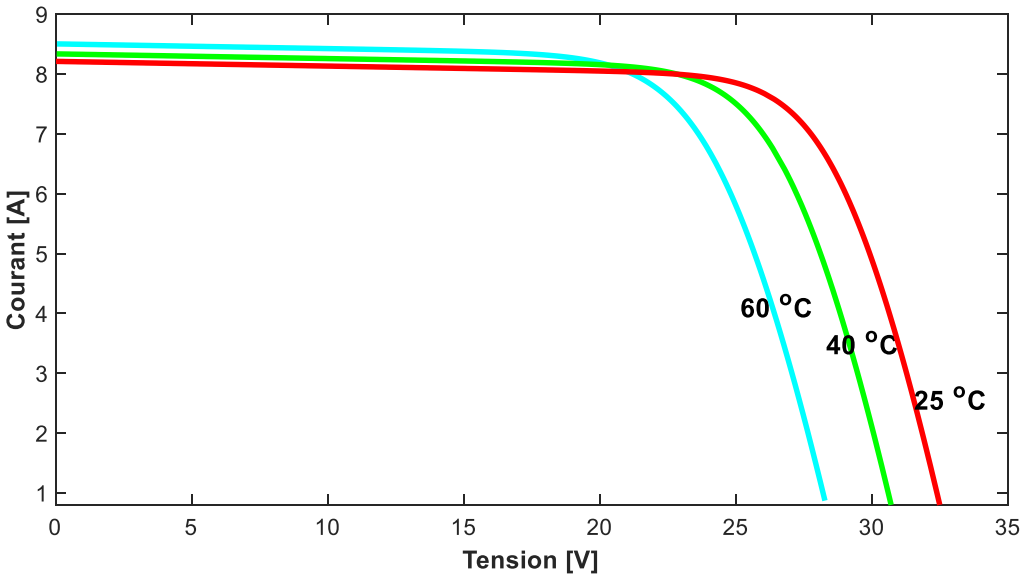


Figure 3.4 Effet de la température sur la caractéristique I-V.

3.3 Commandes MPPT$_s$ traitées sous MATLAB/Simulink

Le schéma de principe de la simulation, effectuée sous MATLAB/Simulink, du système photovoltaïque autonome étudié, intégrant deux techniques de commandes MPPT$_s$ (P&O et Neuronale) est présenté dans la Figure 3.5.

Dans cette simulation, deux scénarios de tests seront exécutés afin d'étudier l'influence de l'irradiation et de la température. Dans le premier scénario, l'irradiation varie selon trois niveaux : 500, 750 et 1000 W/m², tandis que la température reste constante à 25 °C. Dans le second scénario, l'irradiation est maintenue à 1000 W/m², alors que la température fluctue entre 25, 40 et 60 °C. La simulation consistera dans un premier temps à implémenter la commande MPPT classique de type P&O, puis celle avancée basée sur les réseaux de neurones artificiels. L'objectif est d'évaluer et de comparer les performances de ces deux approches $MPPT_s$ dans des conditions d'ensoleillement et de température variables.

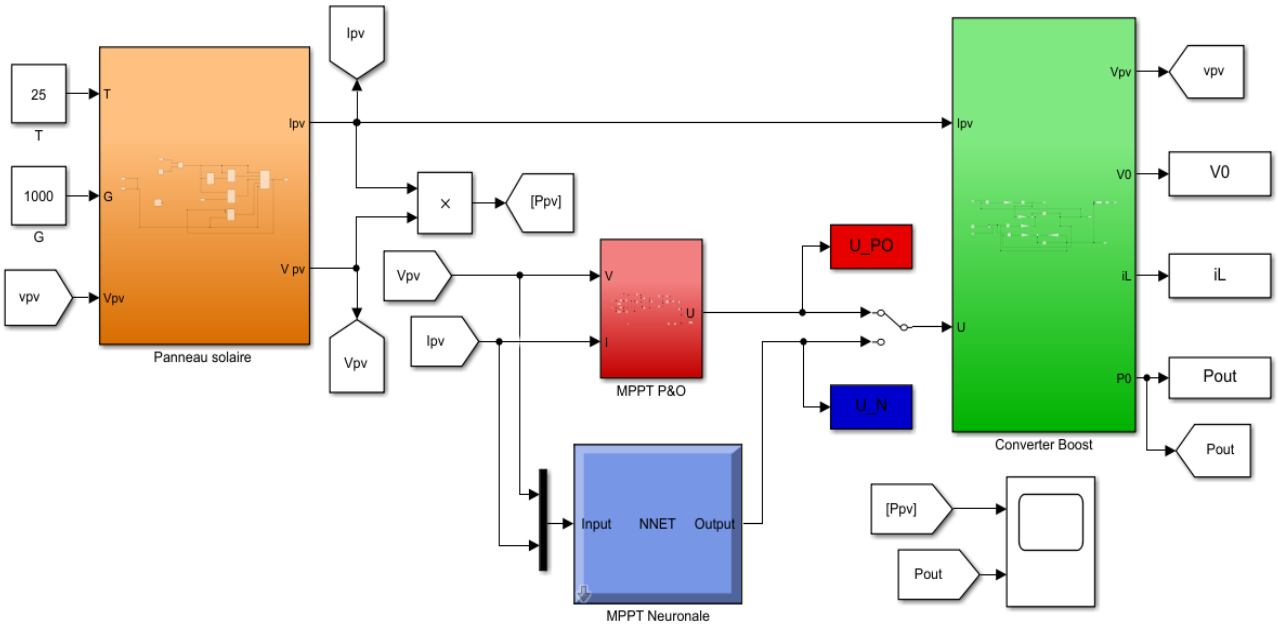
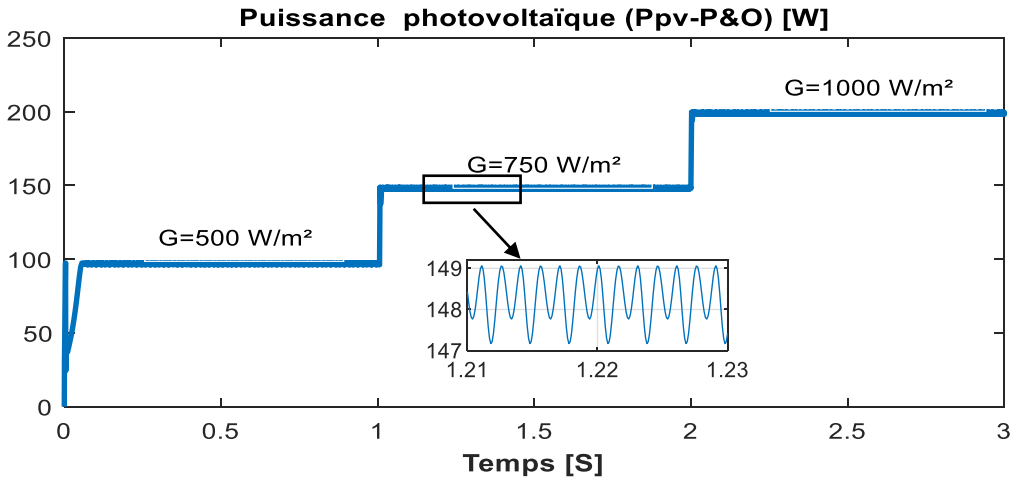


Figure 3.5 Schéma de simulation du système solaire étudié avec deux techniques de commandes $MPPT_s$: P&O et Neuronale.

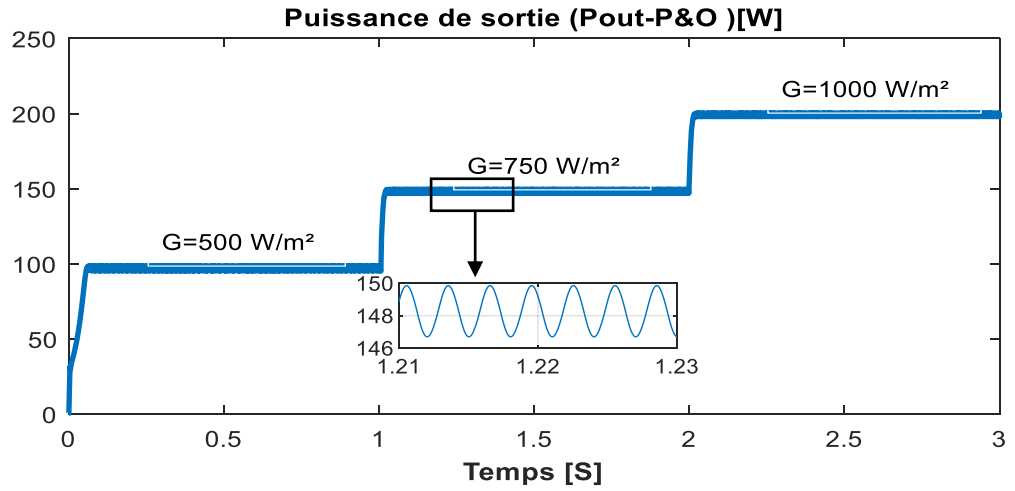
3.3.1 Résultats de simulation de la stratégie MPPT de type P&O

a) Test de la variation des irradiations

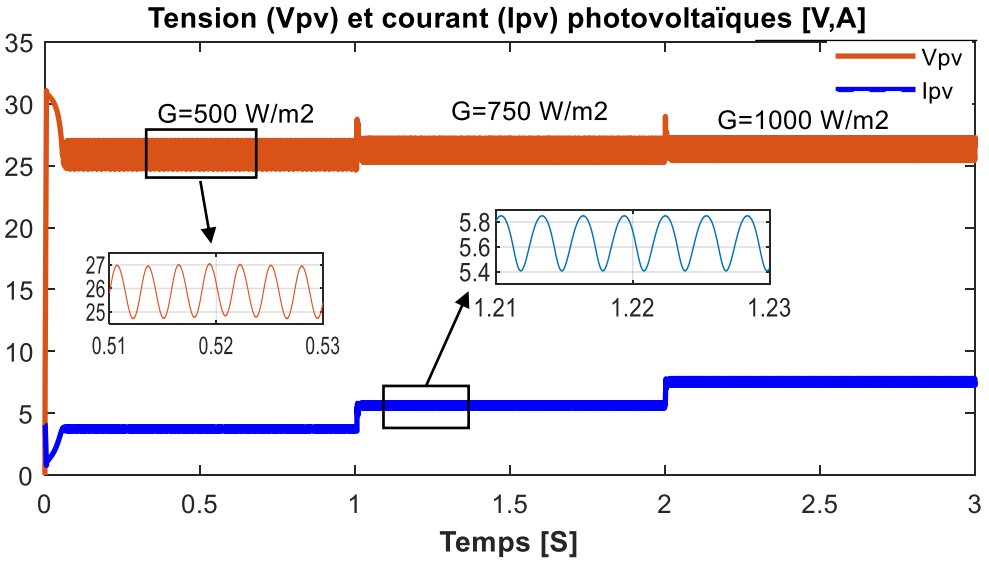
Le comportement du système photovoltaïque autonome sous différents niveaux d'ensoleillement (500, 750 et 1000 W/m²) est illustré par les Figures 3.6 (a), 3.6 (b) et 3.6 (c), pour une durée de simulation de 3 secondes. On observe clairement que la puissance photovoltaïque (P_{pv}) ainsi que la puissance de sortie (P_{out}) augmentent de manière cohérente avec l'irradiation. Les courbes de tension (V_{pv}) et de courant (I_{pv}) confirment cette adaptation, avec des valeurs de courant plus élevées lorsque l'irradiation est plus importante. Enfin, la bonne convergence et la stabilité du système sont visibles à travers l'ensemble des grandeurs représentées dans les graphiques de cette simulation.



(a)



(b)

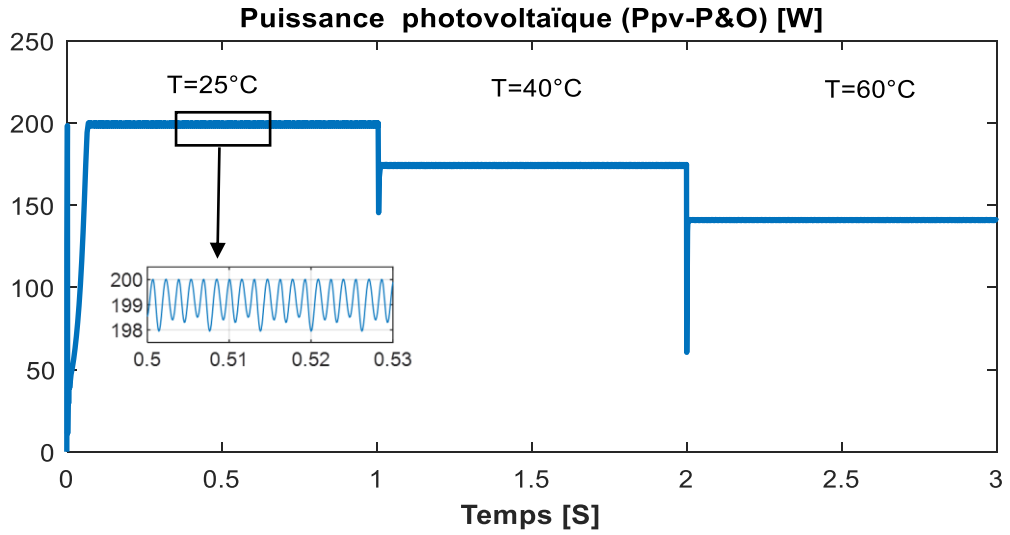


(c)

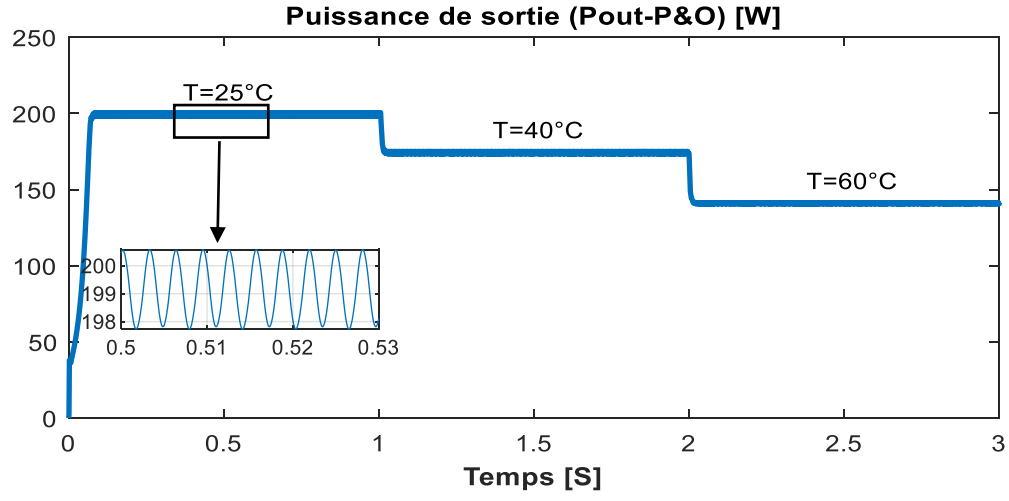
Figure 3.6 Résultats de simulation de la technique MPPT de type P&O pour un profil d'irradiation variable : (a) puissance du panneau PV, (b) puissance de sortie et (c) tension (V_{PV}) et courant (I_{PV}) photovoltaïques.

a) Test de la variation des températures

Les Figures 3.7 (a) et 3.7 (b) mettent en évidence l'impact de la température sur le fonctionnement du système photovoltaïque autonome étudié. Une élévation de la température entraîne une diminution notable de la puissance photovoltaïque (P_{PV}) et la puissance de sortie (P_{out}) ainsi que de la tension de sortie (V_{PV}). En revanche, comme le montre la Figure 3.7 (d), le courant de sortie (I_{PV}) reste globalement stable, montrant une faible sensibilité à la variation de températures. De plus, la Figure 3.7 (c) met en évidence une augmentation significative du rapport cyclique en réponse à l'élévation de la température.



(a)



(b)

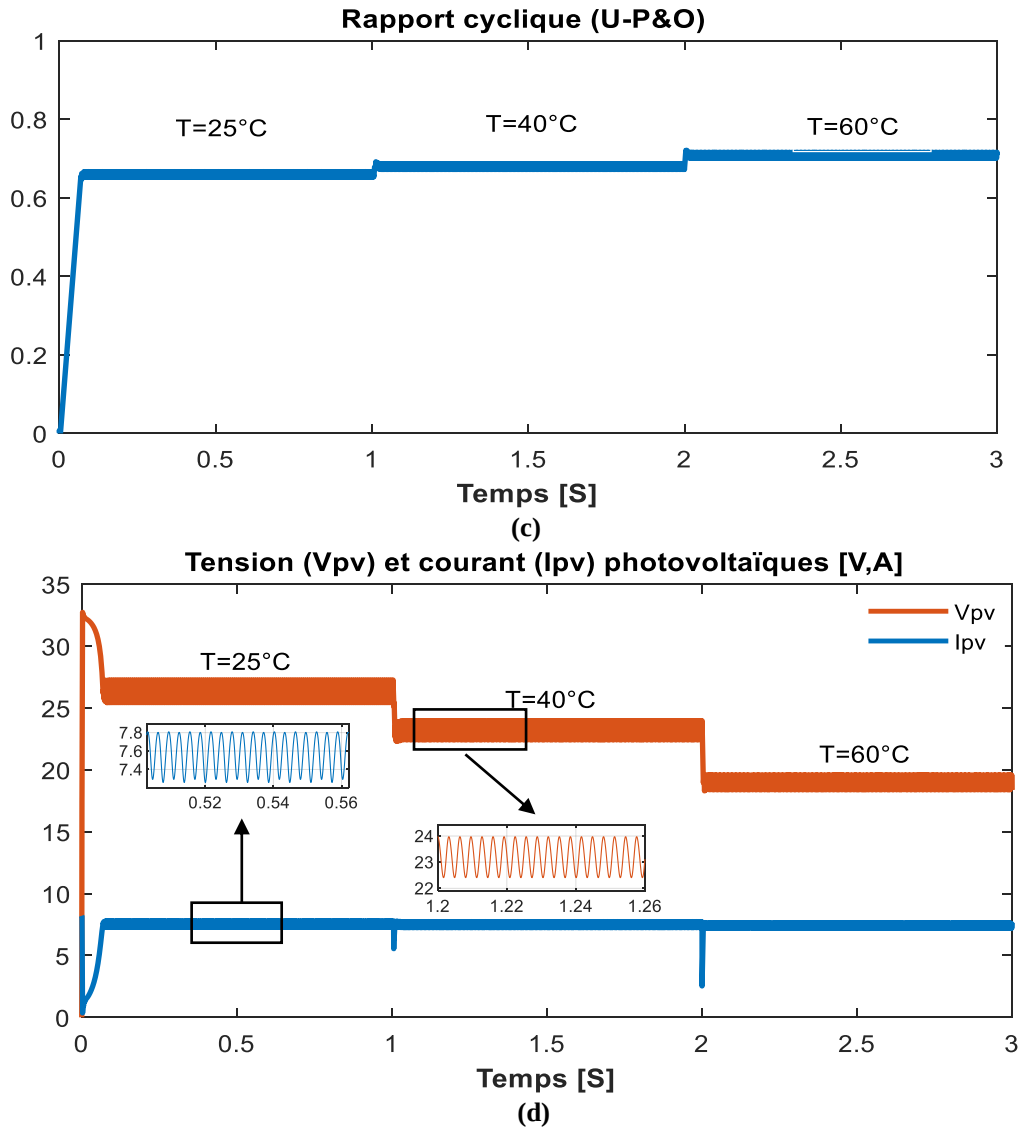


Figure 3.7 Résultats de simulation de la technique MPPT de type P&O pour des températures variables : (a) puissance du panneau PV, (b) puissance de sortie, (c) rapport cyclique et (d) tension (V_{PV}) et courant (I_{PV}) photovoltaïques.

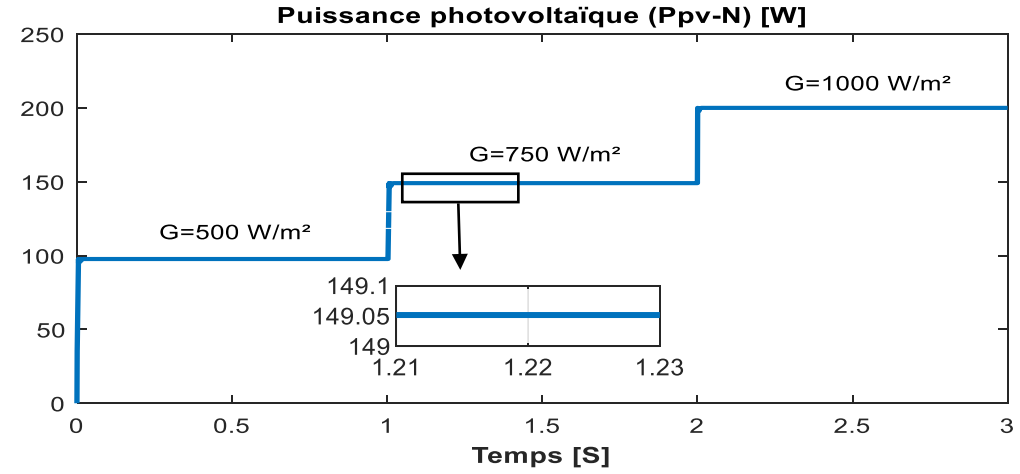
D'après ces résultats, l'algorithme classique P&O utilisé dans le système solaire étudié pour l'extraction de la puissance maximale a démontré une efficacité robuste quelques soient les conditions de fonctionnement appliquées dans les deux tests de simulations. Néanmoins, la présence d'oscillations au niveau des grandeurs contrôlées reste une limite qui caractérise cette technique MPPT conventionnelle.

3.3.2 Résultats de simulation de la stratégie MPPT de type neuronal

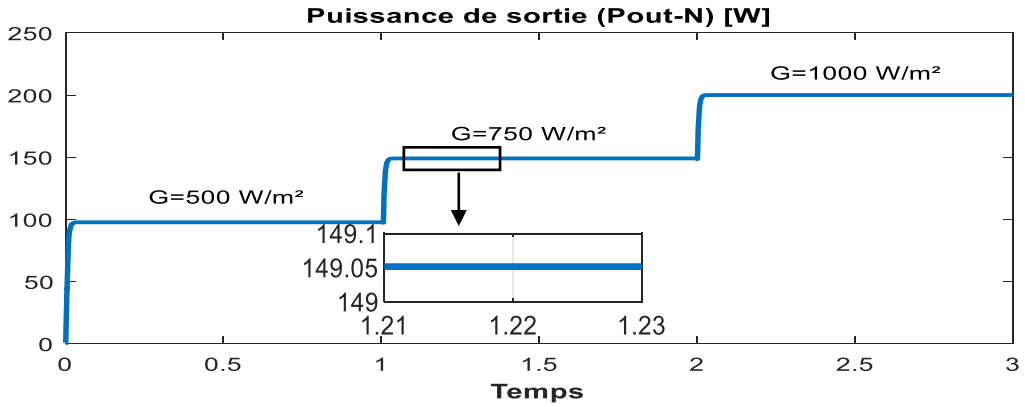
a) Test de la variation des irradiations

Les résultats de simulation de la Figure 3.8 illustrent les performances du système photovoltaïque piloté par une technique MPPT basée sur les réseaux de neurones artificiels, soumis à différents niveaux d'irradiation (500, 750 et 1000 W/m²). Il est clairement visible que la

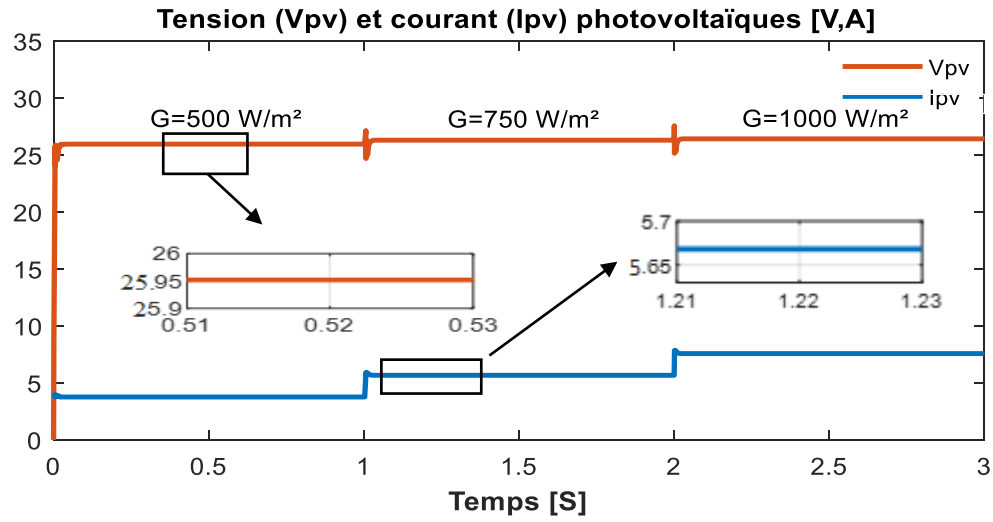
puissance photovoltaïque (P_{PV}-N), la puissance de sortie (P_{out}-N), ainsi que le courant photovoltaïque (I_{PV}) atteignent très rapidement leurs valeurs appropriées avec une bonne stabilité, et ce, sans présence d'oscillations, quel que soit le niveau d'irradiation. En ce qui concerne la tension photovoltaïque (V_{PV}), celle-ci reste pratiquement constante tout au long du test de simulation.



(a)



(b)

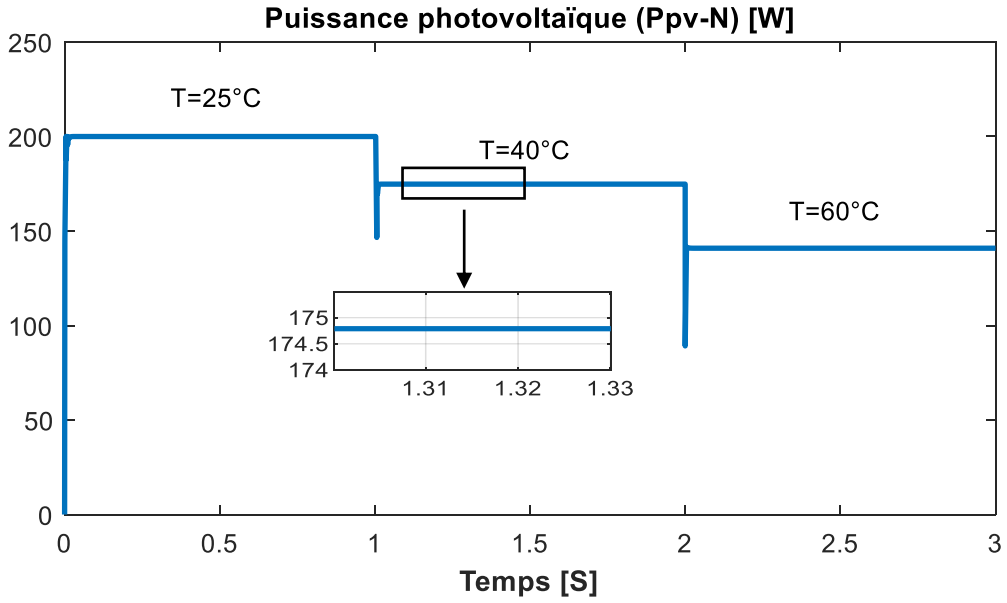


(c)

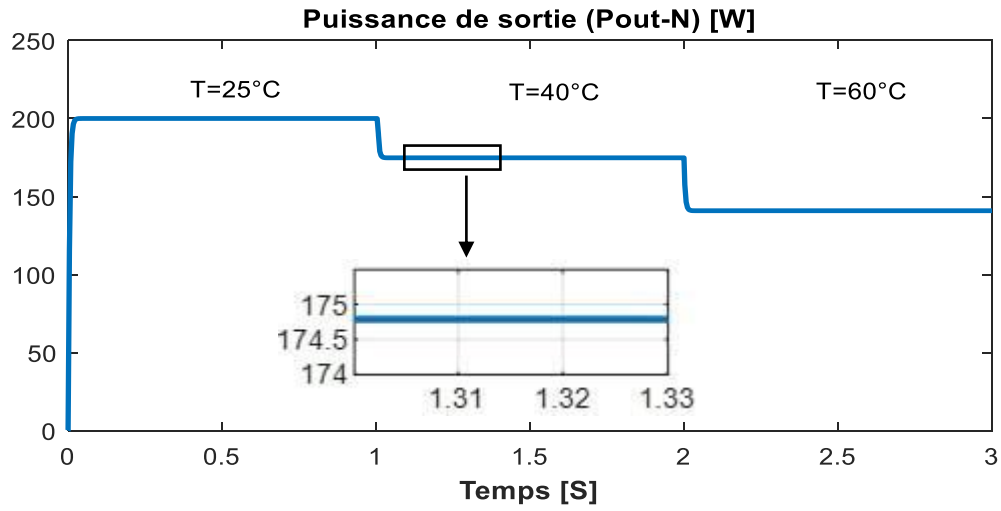
Figure 3.8 Résultats de simulation de la technique MPPT de type neuronal pour un profil d'irradiation variable : (a) puissance du panneau PV, (b) puissance de sortie et (c) tension (V_{PV}) et courant (I_{PV}) photovoltaïques.

a) Test de la variation des températures

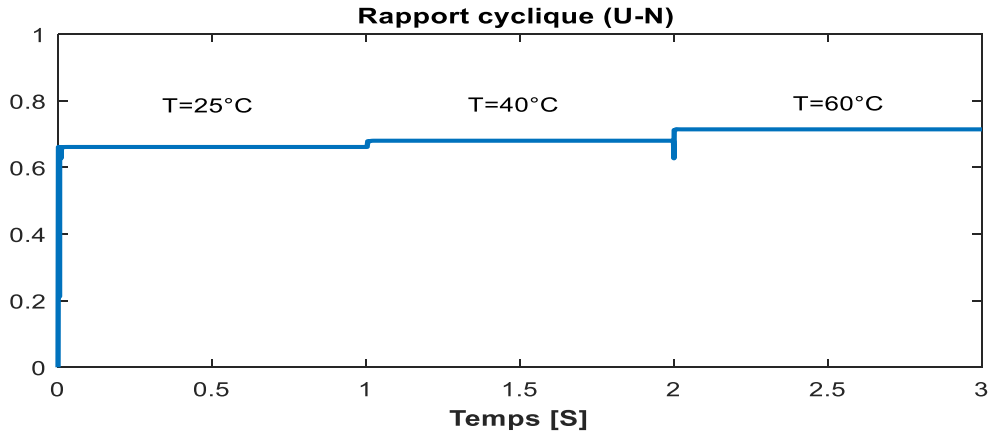
Lors de la variation des températures (25, 40 et 60 °C), la technique MPPT basée sur les réseaux de neurones artificiels permet une réponse rapide et précise des grandeurs suivantes : la puissance photovoltaïque (P_{PV}-N), la puissance de sortie (P_{out}-N), le rapport cyclique, ainsi que la tension photovoltaïque (V_{PV}). Selon la Figure 3.9, ces grandeurs atteignent leurs valeurs appropriées sans oscillations notables, témoignant la stabilité et l'efficacité de cette méthode intelligente. En outre, le courant photovoltaïque (I_{PV}) reste pratiquement constant tout au long de ce test.



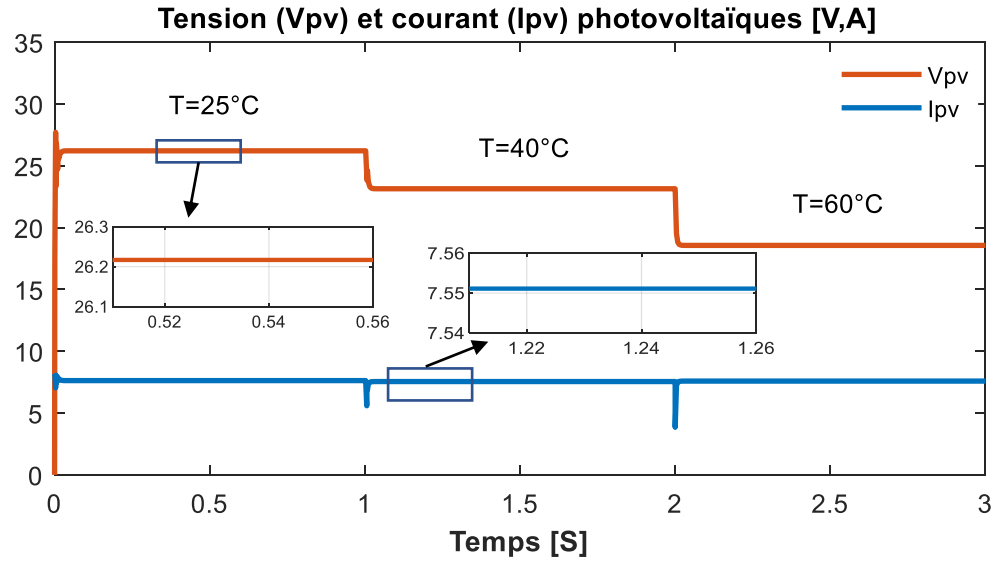
(a)



(b)



(c)

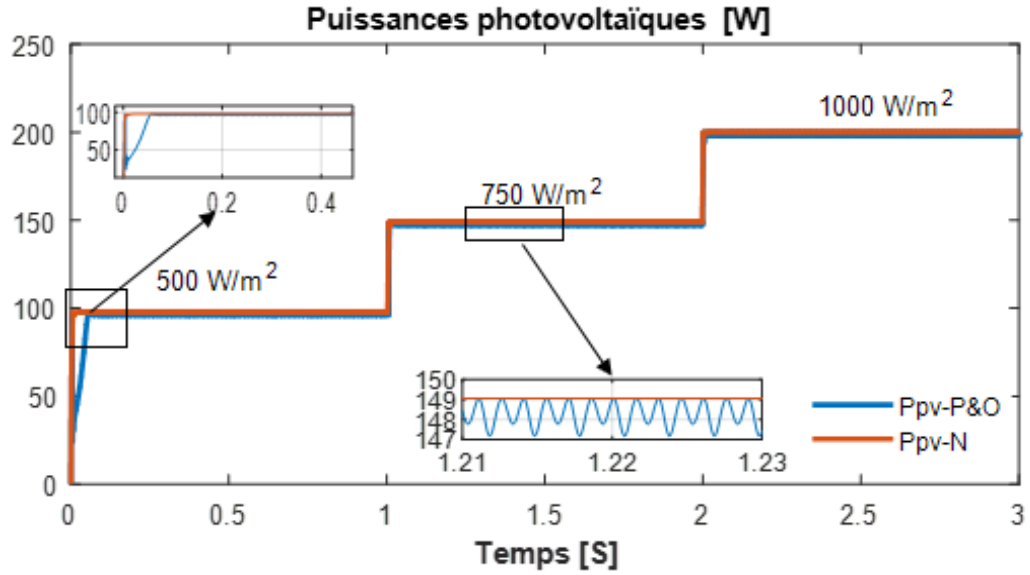


(d)

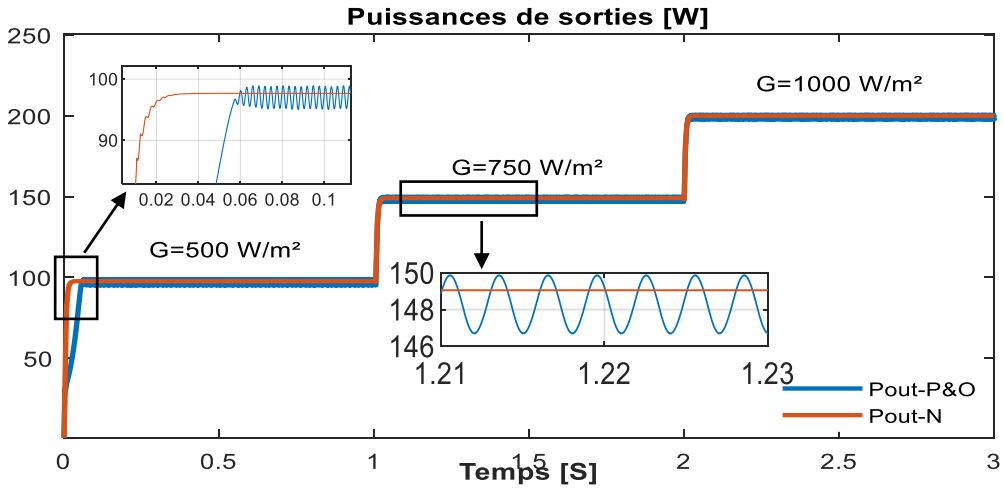
Figure 3.9 Résultats de simulation de la technique MPPT de type neuronal pour des températures variables : (a) puissance du panneau PV, (b) puissance de sortie, (c) rapport cyclique et (d) tension (V_{PV}) et courant (I_{PV}) photovoltaïques.

3.4 Etude comparative

Cette étude comparative a été menée selon les deux scénarios de tests de simulations présentés dans les sections 3.3.1 et 3.3.2. Le premier scénario a permis d'évaluer les performances des algorithmes MPPT$_s$ étudiés (P&O et neuronal) sous des variations d'irradiation de 500, 750 et 1000 W/m², avec une température maintenue constante à 25°C. Le second scénario, quant à lui, a analysé les performances des deux MPPTs face à des variations de température de 25, 40 et 60°C, cette fois sous une irradiation constante de 1000 W/m². Les résultats des simulations illustrant l'étude comparative effectuée sont présentés dans les Figures 3.10 et 3.11.

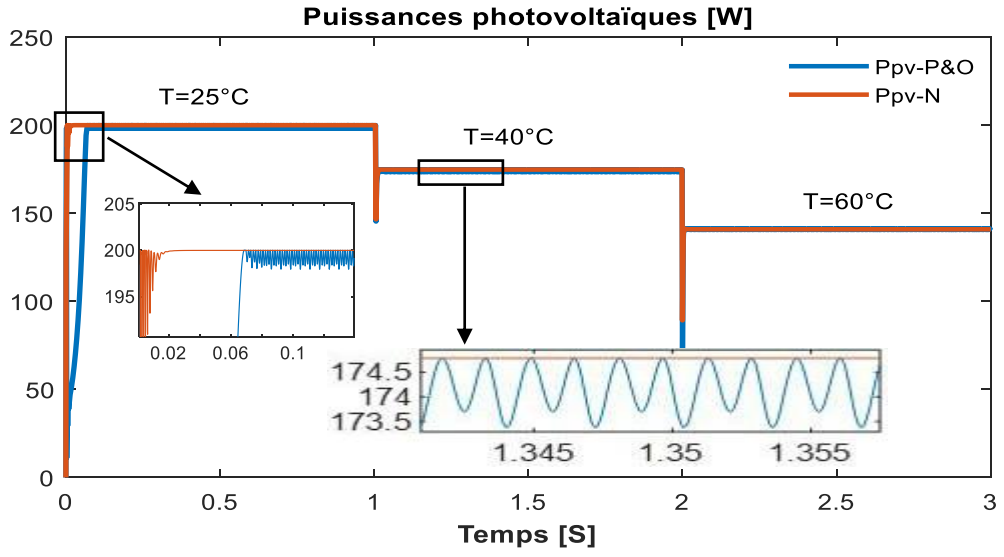


(a)

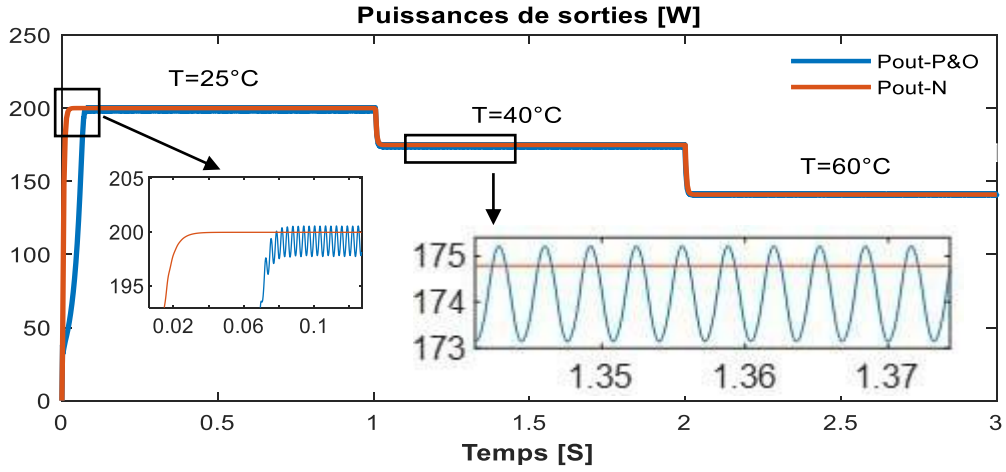


(b)

Figure 3.10 Évaluation de l'efficacité des techniques MPPT P&O et neuronale sous un profil d'irradiation variable : (a) puissances PV et (b) puissances de sorties.



(a)



(b)

Figure 3.11 Évaluation de l'efficacité des techniques MPPT P&O et neuronale sous une température variable: (a) puissances PV et (b) puissances de sorties.

D'après les Figures 3.10 et 3.11 présentées, la technique MPPT neuronale démontre une supériorité marquée par rapport à la technique P&O conventionnelle sur plusieurs aspects clés. Premièrement, la technique MPPT neuronale affiche un temps de convergence vers le point de puissance maximale nettement plus rapide que celui de la méthode P&O, et ce pour l'ensemble des niveaux d'ensoleillement testés (500, 750 et 1000 W/m²) ainsi que pour les différentes températures évaluées (25, 40 et 60°C). Deuxièmement, la technique P&O présente des oscillations marquées dans les courbes des puissances photovoltaïques et celles de sorties, aussi bien en régime dynamique qu'en régime statique. En revanche, la technique MPPT neuronale assure une stabilité remarquable, sans oscillations notables dans les puissances produites, ce qui témoigne la supériorité de cette approche par rapport à la méthode P&O conventionnelle.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer et de comparer les performances des algorithmes $MPPT_s$ P&O et neuronal à travers des simulations détaillées, réalisées sous MATLAB/Simulink. Les résultats ont clairement démontré la supériorité de l'approche neuronale, qui offre une convergence plus rapide vers le point de puissance maximale, une meilleure stabilité en régime permanent avec absence d'oscillations, et une adaptation plus efficace aux variations des conditions environnementales, notamment l'irradiation et la température. La méthode neuronale appliquée s'est révélée particulièrement robuste pour maintenir une extraction optimale de l'énergie solaire, confirmant ainsi son potentiel à améliorer significativement l'efficacité du système PV autonome étudié. Ces conclusions ouvrent des perspectives prometteuses pour l'intégration de techniques intelligentes, telles que les réseaux de neurones artificiels, dans le domaine des énergies renouvelables, en vue d'optimiser les performances et la fiabilité des systèmes de conversion énergétique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a abordé de manière approfondie le système photovoltaïque autonome et son optimisation à travers différentes techniques de suivi du point de puissance maximale. Structuré en trois chapitres principaux, ce travail a permis d'explorer les aspects théoriques et techniques liés à l'énergie solaire et à son exploitation optimale.

Dans le premier chapitre, nous avons posé les bases théoriques en présentant les généralités sur les systèmes solaires. Nous avons examiné les différentes formes d'énergies renouvelables, en mettant l'accent sur l'énergie solaire photovoltaïque et son importance croissante dans le milieu énergétique mondial. Les principes de fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs technologies, leurs modes de connexion et la modélisation mathématique ont été donnés en détails. Enfin, nous avons discuté et analysé les différents types de systèmes photovoltaïques, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre a traité la description et la modélisation du système photovoltaïque autonome, en mettant l'accent sur les techniques $MPPT_s$. Nous avons présenté les différentes structures des convertisseurs DC/DC (Buck, Boost et Buck-Boost). Deux stratégies $MPPT_s$ ont été étudiées : la méthode classique Perturbe et Observe (P&O) et l'approche avancée basée sur les réseaux de neurones artificiels. Cette dernière, inspirée du fonctionnement biologique des neurones, a été décrite en détail au cours de ce chapitre.

Le troisième chapitre a été consacré à la simulation et à l'analyse des performances des deux techniques $MPPT_s$ étudiées par le logiciel MATLAB/Simulink. Les résultats de simulations obtenus ont démontré que la méthode MPPT neuronale offre des avantages significatifs par rapport à l'algorithme classique P&O, notamment une convergence plus rapide vers le point de puissance maximale, une meilleure stabilité et une adaptation plus efficace aux variations des conditions climatiques, telles que l'irradiation et la température.

En conclusion, ce travail met en évidence le potentiel des techniques intelligentes pour améliorer l'efficacité des systèmes solaires, ouvrant la voie à des recherches futures pour une transition énergétique durable.

Afin d'améliorer davantage ce travail, plusieurs perspectives sont envisagées, parmi lesquelles, nous citerons :

- La validation expérimentale de la technique MPPT neuronale développée ;
- L'étude, la simulation et la validation expérimentale d'autres stratégies $MPPT_s$ métaheuristiques comme : Particle Swarm Optimization (PSO), l'Algorithme Génétique (GA) et l'optimisation par essaim de chauves-souris (Bat Algorithm), … etc.

Références bibliographiques

[1] A. Berrak, M. Chaab, "panneaux photovoltaiques", Mémoire de Master, Universite de Badji Mokhtar, Annaba, 2021.

[2] A. Bounour, Y. Bouti, "Etude par simulation d'un système photovoltaïque avec stockage", Mémoire de Master, Universite de Badji Mokhtar, Annaba, 2021.

[3] O. Fellah, H. Sadallah, "Optimisation de la production énergétique d'une chaine photovoltaïque", Mémoire de Master, Universite de Badji Mokhtar, Annaba, 2019.

[4] O. Gadri, S. Yaichi, "Étude et analyse d'un système photovoltaïque", Mémoire de Master, Universite de Kasdi Merbahouargla, Ourgla, 2022.

[5] M. Haraoubia, "Etude simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque", Mémoire de Master, Universite de Badji Mokhtar, Annaba, 2019.

[6] A. Bouden,"Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister en électronique, Université Mentouri de Constantine, 2008.

[7] Kadeval, N. Patel, "Mathematical modelling for solar cell, panel and array for photovoltaic system", Journal of Applied and Natural Science Fourdation, vol. 13, n°. 3, pp. 937 - 943, 2021.

[8] A. Al-Abri, "Mathematical Modeling of Solar PV Panels", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), vol. 6, n°. 9, pp. 1-6, 2018.

[9] M. Bendali, M. Khelif , "Etude et simulation d'une chaine de production photovoltaique", Memoire de Master, Universite de Kasdi Merbah, Ourgla, 2018.

[10] A. Harendi, A. Arbaoui, "Calcul de l'MPPT par réseaux de neurone pour un système photovoltaïque", Mémoire de Master, Universite de Kasdi Merbah,Ourgla, 2015.

[11] A. Belkaid, "Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome", Thèse de Doctorat, Universite de Sétif 1, 2015.

[12] B. A. Sediri, "Commande MPPT à base d'un réseau de neurone artificiel pour un système photovoltaïque", Mémoire de Master , Universite de Badji Mokhtar, Annaba, 2019.

[13] Y. Sedrati, H. Nouar , "Implémentation de l'algorithme P&O pour un système photovoltaïque", Mémoire de Master, Universite de Kasdi Merbah, Ouargla , 2016.

[14] K. Krishnaram , T. Suresh Padmanabhan , FAlsaif & S. Senthilkumar , "Performance optimization of interleaved boost converter with ANN supported adaptable stepped-scaled P&O based MPPT for solar powered applications", Scientific Reports , vol. 14, pp. 8115-8132, 2024.

[15] A. Guenif, A. Djotni, "Technique MPPT d'un système PV par le réseau de neurone", Mémoire de Master, Annaba, 2023.

[16] M. Boutouiga, "Réseaux de neurones artificiels", Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun, Tiaret, 2019.

[17] S. Gula, M. Sarmad,Y. Sunb, F. Alsaifc, "An artificial neural network based MPPT control of modified flyback converter for PV systems in active buildings", Energy Reports, vol. 12, pp. 2352-4847, 2024.

[18] Y. Musa, R. Celikel, "Enhanced photovoltaic systems performance: anti-windup PI controller in ann-based ARV MPPT method", IEEE Access, Vol. 11, pp. 90498–90509, 2023.

[19] S. Manna , Deepak Kumar Singh , H. Alsharif , Mun-Kyeom Kim, "Enhanced MPPT approach for grid-integrated solar PV system: Simulation and experimental study", Energy Reports, vol. 12, pp. 2352-4847, 2024 .

[20] N. Aouchiche, "Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2020.

[21] M. Zaiem, "Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-Flou Réduit", Mémoire de Master , Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.

[22] K. Yahia, "Mathematical Modelling of Photovoltaic (PV) Cell using MATLAB Simulink", video youtube, https://www.youtube.com/watch?v=InTI8GV9-MQ&t=2630s, visité le: 17/03/2025, 2023.