



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



Projet de Fin d'Étude

Université Echahid Hamma Lakhdar 'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité: Réseaux électriques

Thème

**Optimisation des systèmes solaires
photovoltaïques par MPPT basé Réseau
de Neurones Artificiels (RNA).**

Présenté par:

- AYMEN Missi
- CHAUCHE Hassen
- RAMDANI Yahia

Devant le jury composé de :

Président: bark nour dine

Examineur: mammeri oussama

Encadreur: LABBI Yacine

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma gratitude au doyen du Collège, au chef du Département de génie électrique et au surintendant, ainsi qu'à tous les professeurs qui se sont joints à nous et qui nous ont étudiés au cours de nos études. Vous avez tous joué un rôle crucial dans l'orientation, l'enseignement et le soutien nécessaires.

Je me considère chanceux d'acquérir des connaissances grâce à vos précieuses expériences et aux précieuses leçons que vous nous avez données. Je suis reconnaissant de l'occasion que vous nous avez donnée de nous développer en tant que personnes et professionnels.

Je vous souhaite à tous succès dans votre vie professionnelle et personnelle.

Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT). Il existe des techniques MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de la MPPT floue et les techniques avancées, telle que la méthode MPPT basée sur la théorie de réseau de neurones artificiel (ANN). Ce travail s'intéresse à l'étude et comparaison des différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des générateurs photovoltaïques (logique P&O, réseaux de neurones artificiel). Des simulations effectuées sous MATLAB et SIMULINK par l'utilisation des techniques logique, réseau de neurones artificielle sous différents conditions météorologiques ont permis de dire que les résultats obtenus par le contrôleur MPPT Neuronal sont meilleurs que celle du contrôleur MPPT P&O.

Mots clés : PV, MPPT, réseau de neurones artificielle, logique P&O.

Abstract

Solar photovoltaic energy is one of the most widely used renewable energies. It consists in directly converting electromagnetic radiation into electricity thanks to the photovoltaic effect. Photovoltaic (PV) panels have the ability to transform photons into electrons. Energy in the form of direct current is thus directly usable. Due to the strongly non-linear electrical characteristics of PV cells and their associations, the efficiency of PV systems can be improved by solutions using maximum power point finding techniques (so-called MPPT techniques). There are conventional MPPT techniques that are often used, namely the P&O MPPT method and advanced techniques, such as the MPPT method based on the artificial neural network (ANN) theory. This work is concerned with the study and comparison of different techniques for tracking the maximum power point (MPPT) of photovoltaic generators (P&O logic, artificial neural networks). Simulations performed under MATLAB and SIMULINK using logic techniques, artificial neural network under different weather conditions have allowed to say that the results obtained by the Neural MPPT controller are better than that of the P&O MPPT controller.

Keywords: PV, MPPT. artificial neural logic network, P&O.

الملخص

تعد الطاقة الكهروضوئية الشمسية واحدة من أكثر الطاقات المتجددة استخداما. وهو يتألف من التحويل المباشر للإشعاع بالقدرة على تحويل (PV) الكهرومغناطيسي إلى كهرباء بفضل التأثير الكهروضوئي. تتمتع الألواح الكهروضوئية الفوتونات إلى الكثرونات. وبالتالي، فإن الطاقة في شكل تيار مباشر قابلة للاستخدام مباشرة. نظرا للخصائص الكهربائية غير الخطية القوية للخلايا الكهروضوئية وارتباطاتها، يمكن تحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية عن طريق الحلول التقليدية التي يتم استخدامها (MPPT هناك تقنيات MPPT). ما يسمى بتقنيات (باستخدام تقنيات إيجاد أقصى نقطة للطاقة القائمة على نظرية الشبكة MPPT المراقبة والاضطراب والتقنيات المتقدمة، مثل طريقة MPPT غالبا. وهي طريقة (MPPT) يهتم هذا العمل بدراسة ومقارنة التقنيات المختلفة لتتبع الحد الأقصى للطاقة. (ANN) العصبية الاصطناعية للمولدات الكهروضوئية (المراقبة والاضطراب، الشبكات العصبية الاصطناعية). عمليات المحاكاة التي تم إجراؤها باستخدام تقنيات منطقية، سمحت الشبكة العصبية الاصطناعية في ظل ظروف SIMULINK و MATLAB باستخدام أفضل من تلك الخاصة Neural MPPT جوية مختلفة بالقول إن النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة وحدة التحكم MPPT التحكم بجهاز الضبابي

الكلمات المفتاحية: PV, MPPT, شبكة عصبية اصطناعية, خوارزمية المراقبة والاضطراب

Sommaire

Sommaire

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Sommaire.....	VI
Liste des figures	VIII
Liste des Tableau	IX
Liste des symboles.....	X
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Energie solaire et Système Photovoltaïque

I.1. Introduction :	4
I.2. L'énergie Solaire :	4
I.2.1. Système Photovoltaïque:	5
I.2.2. Le semi-conducteur:	6
I.3. Les Cellules photovoltaïques:	6
I.3.1. Jonction PN:	6
I.3.2. Principe de fonctionnement :	7
I.4. Les différentes technologies des cellules solaires:	8
I.4.1. Les cellules monocristallines:	8
I.4.2. Les cellules polycristallines:	9
I.4.3. Les cellules amorphes :	9
I.4.4. Cellule en silicium multicristallin :	9
I.4.5. Cellule Tandem :	10
I.4.6 Modélisation Du Module PV :	11
I.5. Modèle mathématique et formulation :	11
I.5.1. Modèle réel à une diode d'une cellule photovoltaïque :	11
I.5.2. Modèle à deux diodes :	12
I.6.Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque:	13
I.6.1.Courant de court-circuit:	13
I.6.2.Tension de circuit ouvert:	13
I.6.3.Facteur de forme FF:	14
I.6.4.Le rendement η :	14
I.7.Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ aux STC:	14
I.8. L'influence des différents paramètres de la cellule solaire sur son fonctionnement:	15
I.8.1. L'influence de l'éclairement:	15
I.8.2. L'influence de la température:	16
I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	17
I.10. Conclusion :	19
Bibliographie	20

Chapitre II : Convertisseurs DC-DC et Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT)

II.1. Introduction:	22
II.2. Le Suivi de la Puissance Maximale du Générateur Photovoltaïque:	22
II.3. Connexion directe source-charge:	22
II.4. Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge:	23
II.4.1. Convertisseurs DC/DC:	23
II.5. Principe du MPPT :	29
II.5.1. Adaptation manuelle de la charge au générateur photovoltaïque:	30
II.5.2. Technique de l'incrémentation de la conductibilité(IncCond) :	31
II.5.3. Algorithme "Perturbation et Observation" (P&O)	33
II.6. Conclusion:	38
Bibliographies :	39
Chapitre III : Application et Résultats : Implémentation MPPT basé sur ANN	
III.1. Introduction:	41
III.2. Implémentation de l'approche ANN pour le MPPT :	41
III.2.1. L'approche ANN : Principes et Méthodologie	42
III.2.2. Implémentation de l'approche PSO pour le MPPT dans MATLAB	47
III.3. Conclusion	52
Conclusion générale.....	54

Liste des figures

Figure (I.1) : Jonction PN.	7
Figure (I.2) : Schéma d'une cellule photovoltaïque.	8
Figure (I.3) : Silicium Monocristallin	8
Figure (I.4) : Silicium Polycristallin	9
Figure (I.5) : Silicium Amorphe	9
Figure (I.6) : Schéma équivalent d'une cellule PV avec une diode	11
Figure (I.7) : Modèle à deux diodes d'une cellule PV	12
Figure (I.8): Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ sous les conditions : $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$ (à l'aide de l'outil MATLAB / Simulink)	15
Figure (I.9): Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ sous les conditions : $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$	15
Figure (I.10): Caractéristique $I(V)$ d'un panneau photovoltaïque pour différents éclairagements	16
Figure (I.11): Courbe $P(V)$ de puissance d'un panneau photovoltaïque pour différents éclairagements	16
Figure (I.12): Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$	17
Figure (I.13): Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$	17
Figure (II.1): Connexion directe source-charge.	22
Figure (II.2): Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.	23
Figure (II.3) : Schéma électrique de base du convertisseur Boost (hacheur survolteur).	24
Figure (II.4) : Allure des variables dynamiques IL	26
Figure (II.5) : Caractéristique de tension et courant du convertisseur Boost.	28
Figure (II.6) : Modèle de simulation du hacheur survolteur.	28
Figure (II.7) : courbe $P(w)$ du hacheur survolteur.	29
Figure (II.8) : courbe $V(v)$ du hacheur survolteur.	29
Figure (II.9) : courbe $I(A)$ du hacheur survolteur.	29
Figure (II.10) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un régulateur MPPT.	30
Figure (II.11) : Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond.	32
Figure (II.12) : Organigramme de l'algorithme IncCond.	33
Figure (II.13): Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation	35
Figure (II-14): Modèle de simulation du Perturbation et Observation.	36
Figure (II-15): courbe $P(w)$ du Perturbation et Observation.	36
Figure (II-16): courbe $V(v)$ du Perturbation et Observation.	37
Figure (II-17): courbe $I(A)$ du Perturbation et Observation.	37

Liste des Tableau

Tableau (I.1) : Comparaison des différentes technologies des cellules photovoltaïques	10
Tableau (I.2) : Caractéristiques électriques du module PV	11
Tableau (II.1): Paramètres de simulation.	28
Tableau (II.2): Table de vérité de l'algorithme "Perturbation et Observation":	34

Liste des symboles

MOSFETS : Transistors à effet de champ d'oxyde de métal.

IGBT : Insulated-Gate-Bipolar-Transistor.

GPV : générateur photovoltaïque.

MPPT : Maximum power point tracker.

DC-DC : Direct Current-Direct Current.

PV : Photovoltaïque.

Incond : conductance Incrémentale.

P&O : perturbation et observation.

PWM : Pulse with modulation.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

FF : Facteur de forme.

Nomenclature

I₀ : Courant de sortie [A].

I_d : Courant de la diode.

I_{ph} : le photo-courant.

I_{SC} : le courant de court-circuit de la cellule [A].

V_{ph} : Tension de sortie de la cellule(V).

V₀ : Tension de sortie [V].

V_L : Tension aux bornes de l'inductance [V].

V_{OC} : La tension du circuit-ouvert.

R_{ph} : la résistance de photovoltaïque.

R_s : Résistance série.

T₁ : est une température standard normale.

I_{ref} : courant de reference.

V_{ref} : tension de reference.

P_{MAX} :Puissance maximale [W].

n_p : Nombre de particules dans l'espace de recherche.

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, les énergies renouvelables jouent un rôle crucial dans la production d'électricité, et parmi elles, l'énergie solaire photovoltaïque se distingue comme une option prometteuse pour l'Algérie. Cette technologie permet de convertir directement une partie du rayonnement solaire en énergie électrique grâce à des cellules photovoltaïques (PV) basées sur l'effet photovoltaïque.

Cependant, les systèmes de génération photovoltaïque font face à des défis majeurs tels qu'une faible efficacité de conversion en cas de faible irradiation solaire et une production d'énergie électrique fluctuant en fonction des conditions météorologiques. Afin de maximiser la puissance produite par les panneaux solaires, il est essentiel d'utiliser des techniques de suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking - MPPT).

Dans ce mémoire, nous étudions les approches disponibles pour le MPPT dans les systèmes photovoltaïques. Notre objectif est d'implémenter l'algorithme Perturb and Observe (P&O) ainsi que l'approche basée sur les réseaux de neurones artificiels (ANN) pour évaluer leur efficacité dans la maximisation de la puissance produite par un système photovoltaïque.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons une description détaillée du phénomène photovoltaïque, du principe du générateur photovoltaïque, de l'effet PV, des cellules PV et de leurs paramètres. Nous abordons également la modélisation du module photovoltaïque, les différents circuits électriques équivalents et leurs caractéristiques.

Le deuxième chapitre explique brièvement les différents types de convertisseurs DC/DC et leur fonctionnement. Nous réalisons une co-simulation combinant Simulink de MATLAB et PSIM pour simuler les algorithmes MPPT considérés, notamment l'algorithme P&O et l'approche basée sur les réseaux de neurones artificiels.

Le troisième chapitre se concentre sur la mise en œuvre pratique de l'approche basée sur les réseaux de neurones artificiels pour le système MPPT en utilisant MATLAB comme environnement de développement. Nous présentons en détail les étapes d'implémentation, les paramètres utilisés et les résultats obtenus. Une analyse comparative est également réalisée pour évaluer les performances de l'approche ANN par rapport à l'algorithme P&O.

En conclusion, ce mémoire vise à maximiser la puissance produite par un système photovoltaïque en utilisant des techniques de suivi du point de puissance maximale. L'algorithme P&O et l'approche basée sur les réseaux de neurones artificiels ont été étudiés et implémentés dans l'environnement MATLAB pour atteindre cet objectif. Les résultats obtenus

Introduction générale

permettront d'évaluer l'efficacité et l'efficiance de chaque méthode, ainsi que leur adaptation aux conditions réelles du système photovoltaïque.

Chapitre I: Energie solaire et Système Photovoltaïque

I.1. Introduction :

L'approche conventionnelle consiste à utiliser le modèle de circuit électrique équivalent, qui repose principalement sur une source de courant générée par la lumière, connectée en parallèle à une diode à jonction p-n. De nombreux modèles ont été proposés pour simuler une cellule solaire ou un système photovoltaïque (PV) complet, en prenant en compte différentes intensités solaires et conditions de température.

Dans ce chapitre, nous aborderons plus en détail le fonctionnement de l'énergie solaire, le principe de base des cellules photovoltaïques et les composants d'un système photovoltaïque. Nous discuterons également des différents modèles et approches de modélisation utilisés pour simuler le comportement d'un système photovoltaïque dans différentes conditions environnementales.

I.2. L'énergie Solaire :

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable qui provient du rayonnement solaire. Elle est considérée comme une source d'énergie propre et durable, offrant de nombreux avantages environnementaux. L'énergie solaire est capturée et convertie en énergie électrique à l'aide de cellules photovoltaïques (PV).

Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il suffit simplement de l'exploiter. Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires [10]:

- L'énergie passive : Ce type d'énergie est utilisé pour le chauffage, l'éclairage naturel et la climatisation des locaux. Il consiste à laisser entrer le rayonnement solaire naturellement dans une construction par le biais de surfaces vitrées et/ou en utilisant des façades du type double-peau ou mur trombe. Intégrée dès la conception architecturale, l'énergie solaire passive n'engendre que des coûts supplémentaires minimes.
- L'énergie solaire thermique : Cette forme d'énergie consiste à transformer les rayons du soleil en énergie thermique (chaleur). Elle peut être directement utilisée pour le chauffage ou pour produire de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ces derniers sont ensuite capturés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques.
- L'énergie thermodynamique : Cette méthode est l'un des moyens de valoriser directement le rayonnement solaire. Elle consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs afin de chauffer un fluide à haute température. Ce fluide génère ensuite de la vapeur à haute pression qui est utilisée pour actionner une turbine.

- L'énergie photovoltaïque : L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie qui est récupérée et directement transformée en électricité à partir de la lumière du soleil grâce à des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe, dans un semi-conducteur, d'un photon en électron.

L'énergie solaire présente de nombreux avantages, tels que sa disponibilité abondante, surtout dans les régions ensoleillées, sa fiabilité, sa durabilité et son faible impact environnemental. Elle offre également une solution efficace pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et atténuer les problèmes liés au changement climatique. De plus, la technologie photovoltaïque, qui est l'un des principaux moyens de conversion de l'énergie solaire en électricité, présente également de nombreux avantages. Elle est caractérisée par sa modularité, sa facilité d'installation et sa capacité à produire de l'électricité de manière silencieuse et sans émissions polluantes. Les panneaux photovoltaïques sont largement utilisés dans divers domaines, tels que les systèmes d'alimentation en électricité autonomes, les installations résidentielles et commerciales, ainsi que dans les grandes centrales solaires. En combinant ces deux aspects, l'énergie solaire photovoltaïque se positionne comme une solution prometteuse pour répondre aux besoins croissants en électricité tout en préservant l'environnement.

Dans ce chapitre, nous explorerons plus en détail l'énergie solaire photovoltaïque, son fonctionnement, les principaux composants des panneaux photovoltaïques et les processus de conversion de la lumière solaire en électricité.

I.2.1. Système Photovoltaïque:

Un système photovoltaïque se compose de trois parties principales. La première partie concerne la production d'énergie électrique, la deuxième partie est dédiée au contrôle de l'énergie et à sa distribution en fonction des besoins, et la troisième partie concerne l'alimentation des différents récepteurs.

- **Production d'énergie:**

La partie production d'énergie est principalement constituée d'un ou plusieurs modules qui convertissent l'énergie solaire en électricité. Un panneau photovoltaïque est composé de petites cellules qui produisent une puissance électrique très faible (1 à 3 W) avec une tension continue inférieure à 1V. Pour augmenter la production d'électricité, ces cellules sont connectées en série pour former un module ou un tableau. Enfin, les modules sont regroupés.

- **Contrôle d'énergie:**

Un dispositif de stockage avec ou sans régulation, ainsi que les câbles de connexion, font partie du contrôle de l'énergie.

• Utilisation:

La partie utilisation comprend plusieurs récepteurs (par exemple : l'éclairage, le pompage, etc.)[3].

I.2.2. Le semi-conducteur:

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité se situe entre celle des conducteurs et celle des isolants. La conductivité des semi-conducteurs dépend fortement de leur pureté, de la régularité de leur structure, de la température et d'autres propriétés physiques et chimiques. Cette caractéristique est leur principal avantage car elle permet la fabrication de la plupart des composants électroniques aux caractéristiques diverses.

À une température de 0 K (-273 °C), chaque atome de la structure cristalline est lié à quatre atomes voisins par le partage de leurs électrons de valence (liaisons covalentes), assurant ainsi la cohésion du cristal. Les électrons impliqués dans ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, ce qui signifie qu'il n'y a aucune charge mobile capable de permettre le passage d'un courant électrique. La conductivité du silicium est alors très faible [4].

Cependant, l'augmentation de la température libère certains électrons périphériques de la structure, en leur apportant de l'énergie. De plus, la libération d'un électron entraîne la formation d'un trou dans la structure cristalline, créant ainsi une paire électron-trou [4].

I.3. Les Cellules photovoltaïques:

I.3.1. Jonction PN:

Une jonction P-N est formée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N (donneurs d'électrons) et d'un semi-conducteur dopé P (constitué de trous). L'interface entre ces deux régions est appelée jonction. Pour la réalisation de cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- Une jonction PN (homojonction, c'est-à-dire que les deux régions sont constituées du même matériau semi-conducteur, le plus souvent du silicium).
- Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents).
- Une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques qui interviennent dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires.

Les électrons de la jonction se déplacent vers la région P tandis que les trous se déplacent vers la région N. Il reste alors des atomes ionisés fixes. Cette zone, appelée "zone de charge d'espace", où les porteurs libres sont absents, crée un champ électrique. À l'extérieur de cette zone, le champ électrique est nul.

Dans une homojonction à l'équilibre thermodynamique, une barrière de potentiel (V_d) (tension de diffusion) se forme à la frontière des deux régions lors du processus de déplétion.

$$V_d = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_d N_A}{n_i^2} \right) \quad (I.1)$$

$$V_d = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_d N_A}{n_i^2} \right) \quad (I.1)$$

V_d [V] représente la tension de diffusion à travers une jonction.

$k = 1.380662 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, la constante de Boltzmann.

T [K°] désigne la température absolue du cristal.

$q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$, la charge élémentaire.

N_d [cm^{-3}] est la concentration des donneurs.

N_A [cm^{-3}] est la concentration des trous.

n_i^2 [cm^{-3}] est la concentration intrinsèque.

Ici, $VT = kT/q = 26 \text{ mV}$ à température ambiante.

Les cellules solaires photovoltaïques sont souvent des jonctions dissymétriques, c'est-à-dire qu'un dopage est plus fort que l'autre. Dans ce cas, la région de charge d'espace se trouve principalement dans la région faiblement dopée[5].

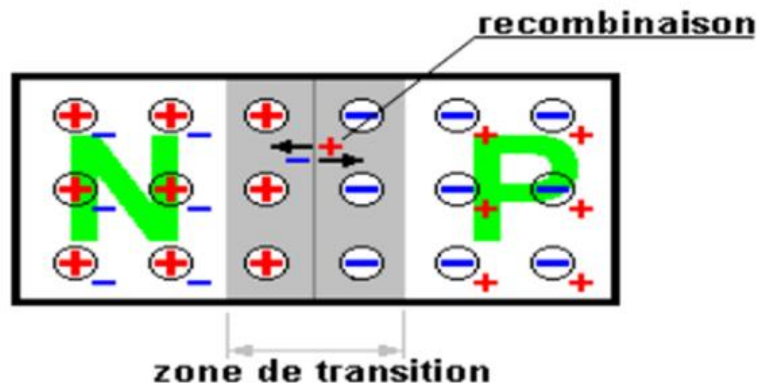


Figure (I.1) : Jonction PN[5].

La figure (I.1) représente une jonction PN, qui est une structure clé dans les cellules photovoltaïques. Une jonction PN est formée par la mise en contact d'un matériau semi-conducteur dopé N (contenant des donneurs d'électrons) avec un matériau semi-conducteur dopé P (contenant des trous). Cette jonction crée une zone de déplétion où les électrons se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Cette zone de déplétion est également appelée "zone de charge d'espace" et crée un champ électrique. La figure (I.1) représente visuellement cette jonction PN et illustre son fonctionnement dans le contexte des cellules photovoltaïques.

I.3.2. Principe de fonctionnement :

Une cellule photovoltaïque (PV) est un dispositif composé d'un matériau semi-

conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Son fonctionnement repose sur les propriétés d'absorption des matériaux semi-conducteurs vis-à-vis du rayonnement lumineux. Ainsi, le choix des matériaux utilisés dans la conception des cellules photovoltaïques est basé sur les caractéristiques physiques de certains électrons qui peuvent être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie en fonction de leurs longueurs d'onde. Une fois libérées, ces charges se déplacent à travers le matériau, créant ainsi un courant électrique continu. La circulation de ce courant engendre une force électromotrice aux bornes du semi-conducteur, ce qui correspond à l'effet photovoltaïque.

La Figure (I.2) représente le schéma d'une cellule photovoltaïque selon les références [11].

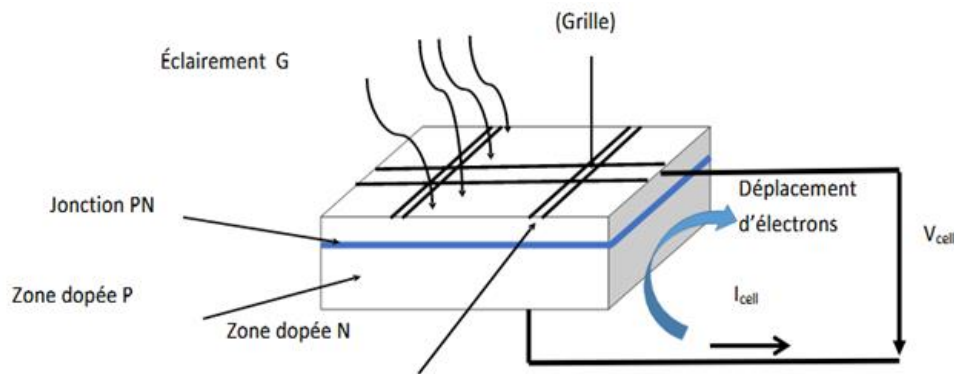


Figure (I.2) : Schéma d'une cellule photovoltaïque[11].

I.4. Les différentes technologies des cellules solaires:

Elles peuvent être classées comme suit [12]:

I.4.1. Les cellules monocristallines:

Elles sont caractérisées par : la première génération de photopiles, un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en laboratoire), une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très coûteuse, et une grande quantité d'énergie nécessaire pour obtenir du cristal pur.



Figure (I.3) : Silicium Monocristallin

I.4.2. Les cellules polycristallines:

Elles sont caractérisées par : un coût de production moins élevé, un procédé nécessitant moins d'énergie et un rendement de 11-13% (18% en laboratoire).



Figure (I.4) : Silicium Polycristallin

I.4.3. Les cellules amorphes :

Elles sont caractérisées par : un coût de production bien plus bas, un rendement plus bas (8-10% et 13% en laboratoire), une durée de vie plus faible. Le silicium amorphe est le plus souvent utilisé dans les produits de consommation tels que les calculatrices, les montres, etc. Cependant, elles réagissent mieux aux températures élevées ou à une lumière diffuse. De plus, les cellules monocristallines et polycristallines sont les types de cellules les plus couramment utilisés sur le marché photovoltaïque (représentant environ 60% de la production).



Figure (I.5) : Silicium Amorphe

I.4.4. Cellule en silicium multicristallin :

Pendant le processus de refroidissement du silicium dans une lingotière, plusieurs cristaux se forment. Les cellules photovoltaïques obtenues présentent une apparence bleutée, mais non uniforme, avec des motifs créés par les différents cristaux. Elles sont caractérisées par :

- Une forme carrée (avec des coins arrondis dans le cas du silicium monocristallin), ce qui permet une meilleure densité dans un module.

- Un bon rendement de conversion, d'environ 100 WC/m² (voire plus), bien que légèrement inférieur à celui du monocristallin.
- Un coût de production inférieur à celui du monocristallin.
- Un rendement plus faible en cas de faible éclaircissement.

I.4.5. Cellule Tandem :

Il s'agit de l'empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (par exemple, une couche mince de silicium amorphe sur du silicium cristallin) qui absorbent dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines. Ces cellules se caractérisent par [6]:

- Une sensibilité élevée sur une large plage de longueurs d'onde.
- Un excellent rendement.
- Un coût élevé en raison de la superposition de deux cellules.

Tableau (I.1) : Comparaison des différentes technologies des cellules photovoltaïques [7]

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium monocristallin	12à18% (24,7% au laboratoire)	20 à 30 ans	Très performant, Stabilité de production, Méthode de production couteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium Poly cristallin	11 à 15% (19,8% au laboratoire)	20 à 30 ans	Très performant, Stabilité de production, Méthode de production couteuse et laborieuse.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13%) au laboratoire	≤ 10 ans	Peut fonctionner sous la lumière fluorescente, Fonctionnement faible si luminosité, Fonctionnement par temps couvert, Fonctionnement si Ombrage Partiel, La puissance de sortie varie dans le temps .En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils Électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite monocristallin (Ga As)	18 à 20% (27,5% au laboratoire)		Lourd, fissure facilement	Systems de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite Poly cristallin (CdS,CdTe,ClG S,etc.)	8% (16% au laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils Électroniques (montres ,calculatrices ...), intégration dans le bâtiment

I.4.6 Modélisation Du Module PV :

Spécifications du module PV multicristallin Dimel-85 est choisi pour la modélisation. Il fournit 85 watts de puissance nominale maximale et se compose de 36 cellules Ses spécifications sont présentées dans le tableau 1.

Tableau (I.2) : Caractéristiques électriques du module PV

PARAMETRE ELECTRIQUE	DIMEL-85
PUISSANCE MAX (PM)	85W
VMPP	17.85 V
IMPP	4.77 A
ISC	5.15 A
VOC	21.8 V
NOMBRE DE CELLULES EN SERIE	36

En utilisant le programme Matlab, le module PV a été implémenté en utilisant un organigramme pour les modèles de circuits à une diode. Pour simplifier, a été considéré comme infini. Les paramètres nécessaires sont évalués et des hypothèses ont été faites lors de l'exécution des équations listées dans la section précédente. Ce programme prend l'irradiance, la température de la cellule et la tension du module PV comme entrées et à l'aide d'équations, il renvoie la valeur du courant de sortie du module PV pour toutes les valeurs du vecteur de tension ainsi appliqué dans le programme.

I.5. Modèle mathématique et formulation :

I.5.1. Modèle réel à une diode d'une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque avec une diode est présenté dans la Figure (I.6). Il comprend une source de courant, une diode, une résistance série et une résistance shunt.

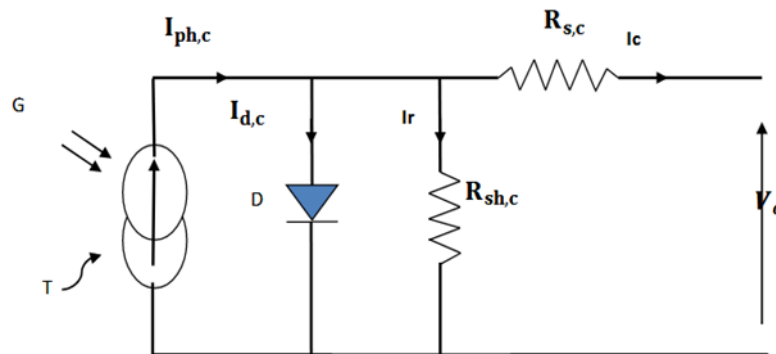


Figure (I.6) : Schéma équivalent d'une cellule PV avec une diode

En se basant sur ce circuit, le courant généré par la cellule peut être exprimé par l'équation suivante :

$$I_c = I_{ph,c} - I_{d,c} - I_r$$

$$I_c = I_{ph,c} - I_{0,c} \left(\exp \frac{q(V_c + R_{s,c} I_c)}{nKT} - 1 \right) - \frac{(V_c + R_{s,c} I_c)}{R_{sh,c}} \quad (I.2)$$

Dans cette équation, $I_{ph,c}$ représente le photocourant de la cellule, $I_{0,c}$ est le courant de saturation inverse de la diode de la cellule, q , n , K et T désignent respectivement la charge de l'électron, le facteur d'idéalité de la diode, la constante de Boltzmann et la température de la cellule. V_c représente la tension aux bornes de la cellule, I correspond au courant de la cellule, et $R_{s,c}$ et $R_{sh,c}$ représentent les résistances série et shunt de la cellule [5].

I.5.2. Modèle à deux diodes :

Actuellement, le modèle électrique le plus proche d'une cellule photovoltaïque est celui à deux diodes (double exponentiel), où la cellule est représentée comme un générateur de courant électrique équivalent à une source de courant avec deux diodes en parallèle. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, ce modèle est complété par les résistances série R_s et parallèle R_{sh} , comme illustré dans le schéma électrique équivalent de la Figure (I.7) [5].

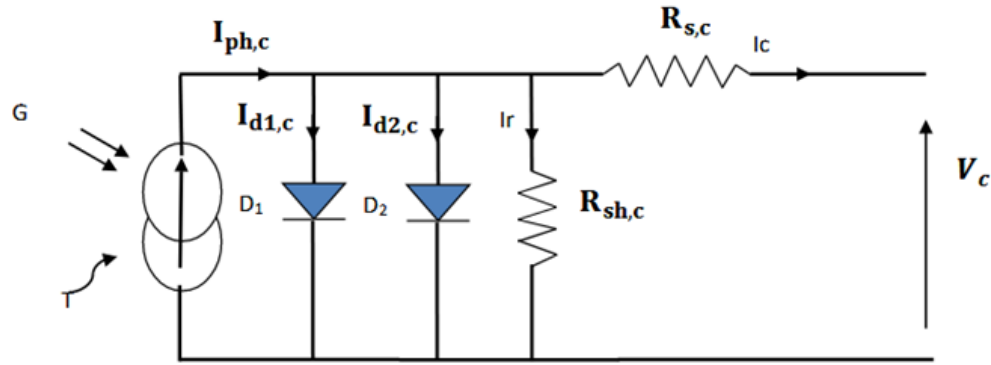


Figure (I.7) : Modèle à deux diodes d'une cellule PV

En effectuant des calculs et des développements mathématiques complexes, ce modèle fournit un courant similaire au courant d'une cellule PV selon la relation suivante :

$$r I_c = I_{ph,c} - I_{d1,c} - I_{d2,c} - I_r \quad (I.3)$$

Par conséquent, le courant peut être exprimé comme suit :

$$I_c = I_{ph,c} - I_{01,c} \left(\exp \frac{q(V_c + R_{s,c} I_c)}{n_1 K T} - 1 \right) - I_{02,c} \left(\exp \frac{q(V_c + R_{s,c} I_c)}{n_2 K T} - 1 \right) - \frac{V_c + R_{s,c} I_c}{R_{sh,c}} \quad (I.4)$$

Dans cette équation :

$I_{ph,c}$ représente le photo-courant d'une cellule,

$I_{0,c}$ représente le courant de saturation inverse de la diode d'une cellule,

q représente la charge de l'électron,
 n représente le facteur d'idéalité de la diode,
 K représente la Constante de Boltzmann,
 T représente la température de la cellule,
 V_C représente la tension aux bornes de la cellule,
 I_c représente le courant de la cellule,
 $R_{s,c}$ représente les résistances série de la cellule,
 $R_{sh,c}$ représente les résistances shunt de la cellule [5].

I.6.Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque:

I.6.1.Courant de court-circuit:

Le courant de court-circuit, noté I_{cc} , représente la valeur maximale du courant généré par une cellule photovoltaïque. Il est mesuré dans des conditions de court-circuit, c'est-à-dire lorsque la tension aux bornes de la cellule est nulle [10].

L'expression mathématique du courant de court-circuit est donnée par l'équation suivante:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{(I_{cc} + R_s)}{nKT} - 1 \right) \times \frac{(I_{cc} \times R_s)}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

Pour la plupart des cellules (notamment celles ayant une résistance série faible), on peut négliger le terme :

$$I_0 \left(\exp \frac{(I_{cc} + R_s)}{nKT} - 1 \right) \quad (I.6)$$

Dans ce cas, une expression simplifiée du courant de court-circuit est approximativement donnée par :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{(1 + \frac{R_s}{R_{sh}})} \quad (I.7)$$

Il convient de noter que cette équation est une approximation et peut varier en fonction des caractéristiques spécifiques de la cellule photovoltaïque.

I.6.2.Tension de circuit ouvert:

La tension de circuit ouvert représente la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque lorsque aucun courant ne circule à travers elle, c'est-à-dire lorsque le courant généré est nul. Elle est souvent associée à la chute de tension dans la diode (jonction p-n) lorsque celle-ci est traversée par le photo-courant I_{ph} . Elle reflète la tension de la cellule en l'absence de lumière solaire, telle que la tension durant la nuit. Mathématiquement, elle peut être exprimée par la

formule suivante[10]:

$$V_{co} = \frac{m.K.T_{ck}}{q} V_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (I.8)$$

I.6.3.Facteur de forme FF:

Le facteur de forme (FF) est le rapport entre la puissance maximale pouvant être transmise à la charge et le produit du courant de court-circuit (I_{cc}) et de la tension de circuit ouvert (V_{oc})[5]:

$$FF = \frac{P_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{CC}} = \frac{V_{OPT} \cdot I_{OPT}}{V_{OC} \cdot I_{CC}} \quad (I.9)$$

Le facteur de forme est une mesure concrète de la caractéristique courant-tension (I-V). Sa valeur est généralement supérieure à 70% pour une bonne cellule. Cependant, il diminue lorsque la température de la cellule augmente.

I.6.4.Le rendement η :

Le rendement η des cellules photovoltaïques représente l'efficacité de conversion en puissance. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_{OPT}}{P_{incidente}} = \frac{V_{OPT} \cdot I_{OPT}}{G \cdot S} \quad (I.10)$$

De plus, ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert [11].

I.7.Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ aux STC:

Nous examinerons le comportement de notre panneau photovoltaïque dans des conditions standard de fonctionnement avec un ensoleillement $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et une température $T = 25^\circ\text{C}$.

Nous pouvons observer trois points très importants qui fournissent les grandeurs électriques du système en court-circuit ($I = 8.1 \text{ A}$, $V = 0$), en circuit ouvert ($I = 0$, $V = 32.9 \text{ V}$) et le point de puissance maximale de 212 W correspondant à ($I = 7.6 \text{ A}$, $V = 27.9 \text{ V}$).

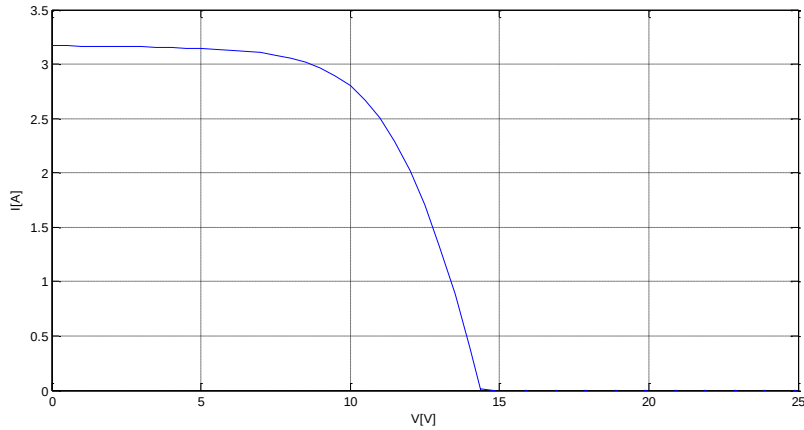


Figure (I.8): Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ sous les conditions : $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$ (à l'aide de l'outil MATLAB / Simulink)

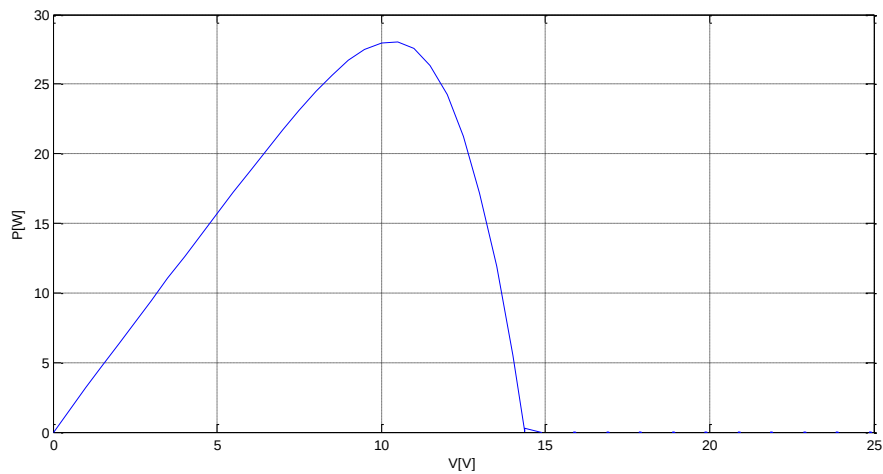


Figure (I.9): Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ sous les conditions : $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$

I.8. L'influence des différents paramètres de la cellule solaire sur son fonctionnement:

I.8.1. L'influence de l'éclairement:

Les figures I.10 et I.11 présentent les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ où nous avons tracé la variation du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différentes intensités de rayonnement solaire. Dans la première partie des caractéristiques, le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. En revanche, la tension ne se dégrade pas beaucoup lorsque la luminosité augmente.

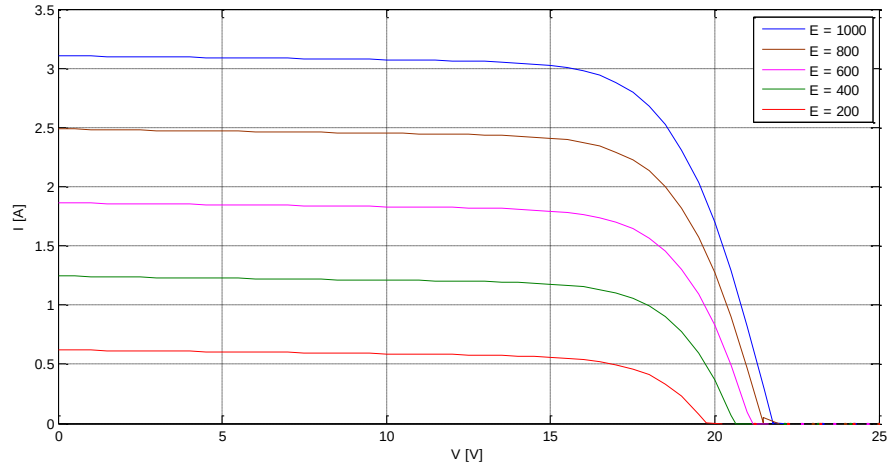


Figure (I.10): Caractéristique I(V) d'un panneau photovoltaïque pour différents éclairements

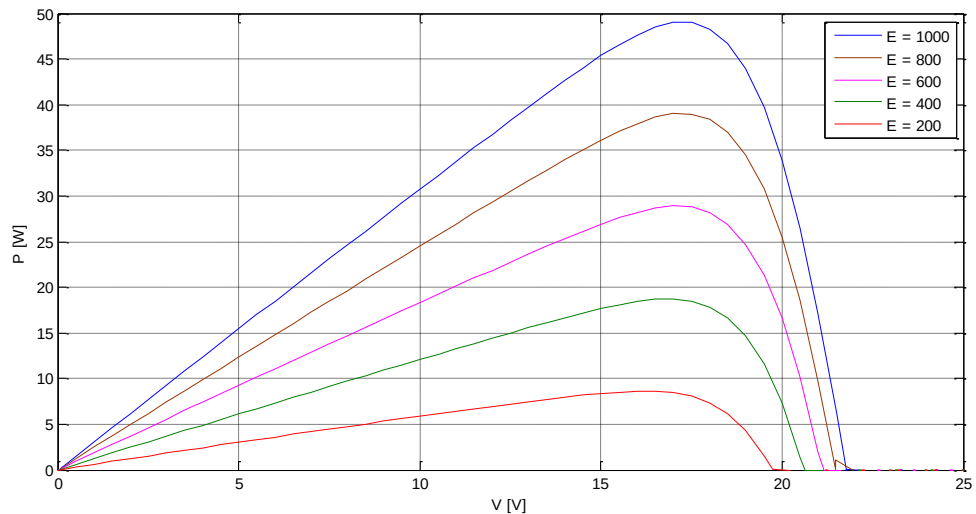


Figure (I.11): Courbe P(V) de puissance d'un panneau photovoltaïque pour différents éclairements

I.8.2. L'influence de la température:

L'influence de la température est très significative et nécessite des choix importants dans la conception des systèmes.

La température de la cellule photovoltaïque a un effet notable sur sa tension. En revanche, l'effet de la température sur le courant de la cellule photovoltaïque est négligeable. Il est observé que plus la température à l'intérieur de la cellule augmente, plus la tension à vide diminue. Étant donné que la puissance de la cellule est le produit du courant et de la tension, la même observation s'applique à la courbe de puissance.

Ces effets sont représentés dans les figures ci-dessous (I.12) et (I.13) qui montrent différentes courbes I(V) et P(V) pour un module à des températures allant de 25 °C à 75 °C sous un ensoleillement de 1000 W/m².

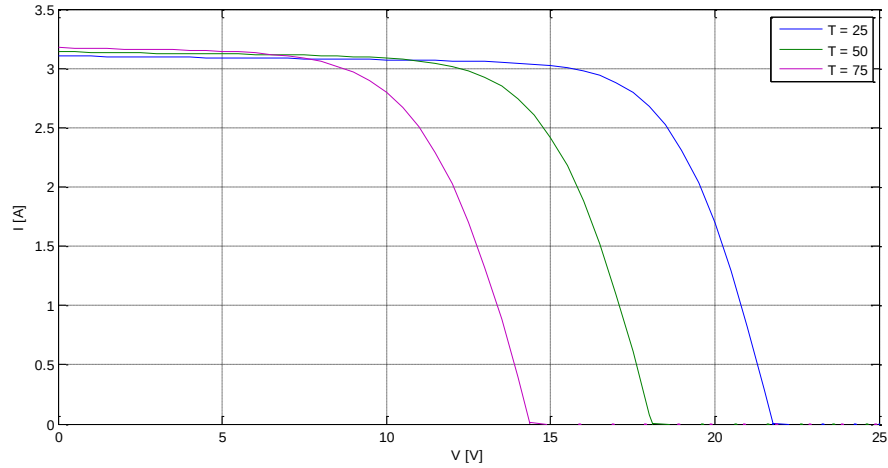


Figure (I.12): Influence de la température sur la caractéristique I(V)

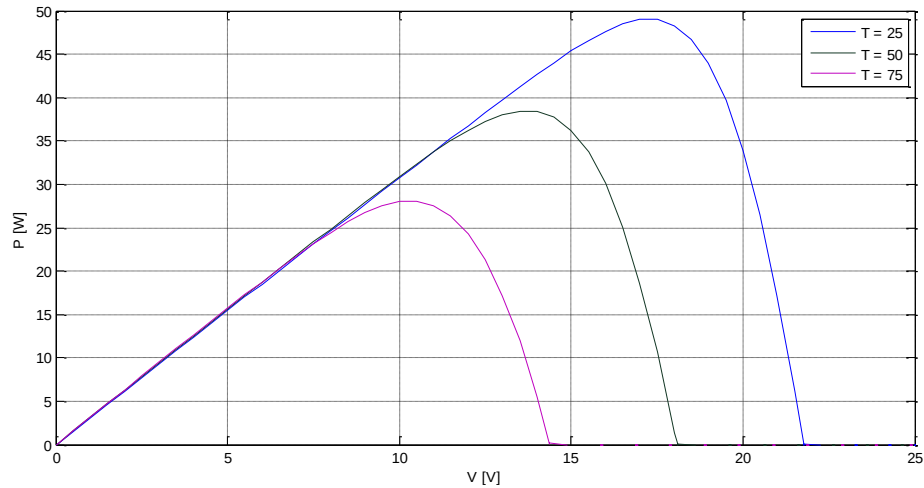


Figure (I.13): Influence de la température sur la caractéristique P(V)

I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques présentent de nombreux avantages tout en ayant quelques inconvénients [8]:

- **Les avantages :**

- ✓ Haute fiabilité.
- ✓ Potentiel illimité. Seulement 5 % de la surface des déserts serait suffisant pour alimenter l'ensemble de la planète.
- ✓ Caractère modulaire des panneaux photovoltaïques, permettant un montage simple et adaptable à différents besoins énergétiques.
- ✓ La technologie photovoltaïque est écologique, car le produit final est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation de l'environnement.

✓ L'utilisation de l'énergie solaire permet d'éviter l'utilisation d'énergies fossiles ou nucléaires pour produire la même quantité d'électricité, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre et la production de déchets nucléaires.

• **Les inconvénients :**

✓ La fabrication des modules photovoltaïques nécessite une technologie de pointe et des investissements coûteux.

✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule en silicium cristallin est de 28 %).

✓ De nombreux appareils sur le marché fonctionnent avec du courant alternatif de 220 à 230 V. Cependant, l'énergie générée par un panneau solaire est unidirectionnelle et de faible tension (< 30 V), elle doit donc être convertie à l'aide d'un onduleur.

✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque augmente. Cependant, la fiabilité et les performances du système restent équivalentes tant que la batterie et les composants de régulation associés sont judicieusement choisis.

✓ La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

Malgré ces inconvénients, l'énergie photovoltaïque reste une solution prometteuse pour la production d'électricité propre et durable.

I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé les aspects généraux des systèmes photovoltaïques tels que la cellule solaire, le module photovoltaïque et le panneau solaire. Nous avons expliqué le fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que ses différents types. De plus, nous avons présenté la structure des panneaux photovoltaïques ainsi que les différents types de systèmes photovoltaïques utilisés dans les habitations [9].

Dans le prochain chapitre, nous aborderons les convertisseurs statiques CC/CC, notamment les hacheurs, ainsi que la commande MPPT. Ces éléments sont essentiels pour optimiser la conversion d'énergie et améliorer l'efficacité globale des systèmes photovoltaïques.

Bibliographie

- [1] J.-P. Colinge, "Physique des dispositifs semi-conducteurs", 1996.
- [2] S. Mohamed, "Djedai Lazhari Mémoire de fin d'étude 'Optim. d'un Syst. poursuit Sol. appliquée au champ photovoltaïque' Univ. Ouargla, 2011.
- [3] M. Capderou, "Atlas Solaire de l'Algérie, modèles théoriques et expérimentaux", Vol. 1, T1, Off. des Publ. Univ. Algérie, 1987.
- [4] LASMI Yassine, "Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes" Mémoire de Magistère, UNIVERSITE SETIF-1 - ALGERIE, 2013.
- [5] BENDJELLOUL Zakaria, "contribution à la modélisation d'une cellule solaire", Mémoire de magister, UNIVERSITE DE BECHAR, le 28/06/2009.
- [6] ChikhAli, Etude de la Poursuite du Point de Fonctionnement Optimal du Générateur Photovoltaïque (G. PV), * 3rd International Conférence: Sciences of Electronics, Technologies of Information and Télécommunications, March 27-31, 2005 – TUNISIA Unité de Recherche En Energies Renouvelables En Milieu Saharien, URER/MS, Adrar, 01000, Algérie.
- [7] T. Hiyama, S. Kouzuma, T. Imakubo "Identification of Optimal Operating Point using Neural Network for Real Time Maximum Power Tracking Control", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.10, No. 2, June 1995, p. 360-367.
- [8] Agence d'études et de promotion de l'isère, rapport sur "la filière photovoltaïque - enjeux et perspectives" septembre 2010.
- [9] M. Kara Abdelfattah, "dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie" l'université de sétif1, 2014.
- [10] BENADEL Faiza, "Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV", Mémoire de magister, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2016.
- [11] KABACH Abdelhak et FERSSASI Ahmed Chrif, Mémoire de fin d'études de Master, "Optimisation d'un système PV adapté par une commande MPPT réseau de neurone", UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2020.

Chapitre II :
Convertisseurs DC-DC et
Suivi du Point de Puissance
Maximale (MPPT)

II.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous abordons tout d'abord les définitions et les concepts de base des convertisseurs DC-DC, ainsi que les modèles mathématiques nécessaires pour étudier leur comportement lors de la simulation du système PV global. Ensuite, nous examinons en détail la technique du Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) à travers les méthodes classiques de perturbation et observation (P&O) et de conductance incrémentale (IncCond).

II.2. Le Suivi de la Puissance Maximale du Générateur Photovoltaïque:

La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est une partie essentielle des systèmes photovoltaïques. Depuis la publication de la première méthode de commande de ce type en 1968, plusieurs techniques ont été développées pour s'adapter aux sources d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques diffèrent par leur complexité, le nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, le coût, le rendement et le champ d'application. [15]

II.3. Connexion directe source-charge:

À l'heure actuelle, il existe encore de nombreuses applications où une connexion directe entre un générateur photovoltaïque et une charge est utilisée. Ce choix est principalement motivé par sa simplicité d'utilisation et son coût très faible, bien que sa fiabilité soit fondamentalement faible en raison de l'absence d'électronique. La Figure (II.1) illustre ce cas de connexion. Cependant, si cette charge était une batterie et que le module photovoltaïque n'était pas exposé à la lumière, il pourrait fonctionner comme un récepteur, ce qui entraînerait une décharge de la batterie à travers le générateur photovoltaïque et potentiellement l'endommager de manière irréversible. Afin d'éviter cette situation, une diode anti-retour est nécessaire entre le générateur photovoltaïque et la charge. Cette configuration est illustrée à la Figure (II.1). Cependant, cette configuration présente l'inconvénient de ne pas offrir de limitation ou de réglage de la tension de la batterie. De plus, le transfert de la puissance maximale disponible du générateur photovoltaïque vers la charge n'est pas garanti[14].

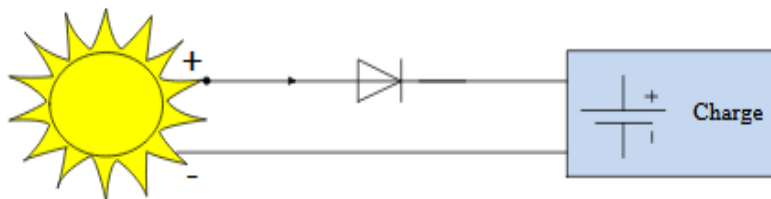


Figure (II.1): Connexion directe source-charge.

II.4. Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge:

Un générateur photovoltaïque (GPV) présente des caractéristiques I-V non linéaires avec un point de puissance maximum (PPM). Ces caractéristiques dépendent notamment du niveau d'éclairement (E) et de la température (T) de la cellule. De plus, en fonction des caractéristiques de la charge à laquelle le GPV est connecté, il peut y avoir un écart considérable entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode de connexion directe. Afin d'extraire en permanence la puissance maximale disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, il est couramment utilisé un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge, comme illustré dans la Figure (2.2). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments et assure, grâce à une action de contrôle, le transfert de la puissance maximale fournie par le générateur pour qu'elle se rapproche autant que possible de la puissance maximale disponible [16].

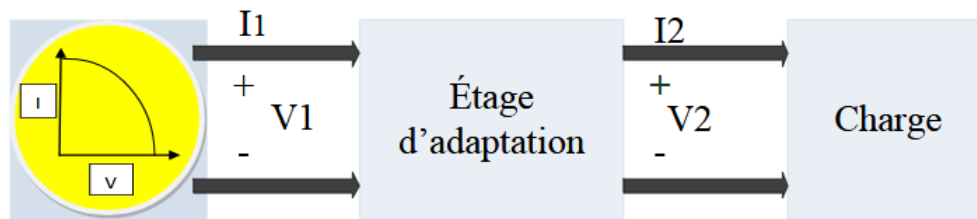


Figure (II.2): Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

Cet étage, grâce à une commande spécifique, permet au générateur de délivrer sa puissance maximale, notée $\max(P_{\max} = I_{\text{opt}} \times V_{\text{opt}}$, où V_{opt} et I_{opt} représentent respectivement les tensions et les courants optimaux du générateur photovoltaïque pour une courbe I-V donnée), tout en veillant à ce que la tension ou le courant de la charge correspondent aux caractéristiques de celle-ci. Afin de permettre au générateur PV de fonctionner le plus souvent possible dans son régime optimal, il est communément adopté d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Le convertisseur DC-DC assure le fonctionnement des modules à leur point de puissance optimale, indépendamment de l'éclairement et de la température, afin de délivrer cette puissance à l'utilisation.

II.4.1. Convertisseurs DC/DC:

Pour assurer une conversion de puissance efficace et éviter la dissipation d'énergie ainsi que les surchauffes des composants électroniques, il est essentiel de maintenir un rendement élevé. C'est pourquoi toute la conversion de puissance est réalisée autour des composants de stockage d'énergie tels que les inductances et les condensateurs, ainsi que les commutateurs. Le choix des commutateurs de puissance dépend de la puissance à convertir ou à contrôler.

Les transistors MOSFET (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont généralement utilisés pour des puissances relativement basses (quelques kW), tandis que les transistors bipolaires à gâchette isolée (IGBT) sont utilisés pour des puissances plus élevées. Les thyristors ont traditionnellement été utilisés dans les applications de très haute puissance. [16]

Dans les paragraphes suivants, deux topologies de base de circuits de conversion (DC-DC) seront décrites. Dans cette section, nous présentons les principes de deux types de convertisseurs DC/DC fréquemment utilisés dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités, à savoir le convertisseur Buck et le convertisseur Boost. Ces convertisseurs ne sont constitués que d'éléments réactifs tels que des bobines et des condensateurs, qui, dans des conditions idéales, ne consomment aucune énergie. C'est pourquoi ils sont caractérisés par un rendement élevé. [17]

Dans ces études, l'interrupteur du convertisseur est contrôlé par un signal de modulation de largeur d'impulsion (MLI), avec une fréquence fixe (f_s) et un rapport cyclique variable (D).

II.4.1.1. Convertisseur Boost :

Le convertisseur Boost, également connu sous le nom d'élévateur de tension, est représenté par le schéma de la figure (II.3). Au premier stade (αT), le transistor (S) est en position fermée, ce qui permet au courant de circuler progressivement dans l'inductance, lui permettant d'accumuler de l'énergie jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L), qui s'oppose à la diminution du courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de la source et est appliquée à la charge (R) à travers la diode (D). [18]

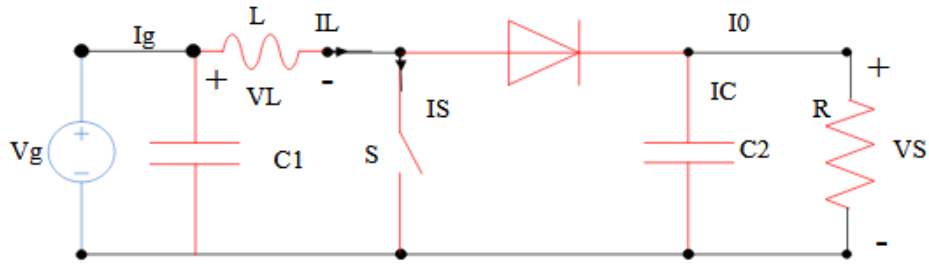


Figure (II.3) : Schéma électrique de base du convertisseur Boost (hacheur survolteur).

II.4.1.1.1. Modèle mathématique équivalent :

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

Pour le premier intervalle αT :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_L \quad (2.1)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad (2.2)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g - R_L I_L \quad (2.5)$$

Pour le deuxième intervalle $(1-\alpha)$:

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_L \quad (2.4)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad (2.5)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g - R_L I_L - V_0 \quad (2.4)$$

II.4.1.1.2. Modèle approximé du convertisseur Boost :

Les systèmes d'équations de base (2. (4, 5 et 6)) et (2. (7, 8 et 9)) représentent le convertisseur Boost pour un intervalle de temps αT_s et $(1-\alpha)$ respectivement. Étant donné que le convertisseur oscille entre ces deux états avec une fréquence élevée, il est nécessaire de trouver une représentation dynamique approximative valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela, nous supposons que la variation des variables dynamiques CI et VL est linéaire, c'est-à-dire que nous pouvons approximer une exponentielle par un segment ($\varepsilon \approx 1$ si $\varepsilon \ll 1$) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante. Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique x sur les deux intervalles de temps αT_s et $(1-\alpha)$:

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt(\alpha T_s)} \alpha T_s + \frac{dx}{dt((1-\alpha) T_s)} (1-\alpha) T_s \quad (2.7)$$

Où $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur un intervalle T_s .

Cette relation est valide si :

$\frac{dx}{dt(\alpha T_s)}$ et $\frac{dx}{dt((1-\alpha) T_s)}$ sont constants sur les intervalles αT_s et $(1-\alpha)$ respectivement. En

d'autres termes, cette approximation est valable si les périodes αT_s et $(1-\alpha)$ sont très faibles par rapport à la constante de temps du circuit $C1R_g$, $C2Z$ et L/RL . [17]

Dans ce cas, la forme exponentielle du courant parcourant la self et la tension aux bornes du condensateur est linéaire, comme le montre la figure (2.4).

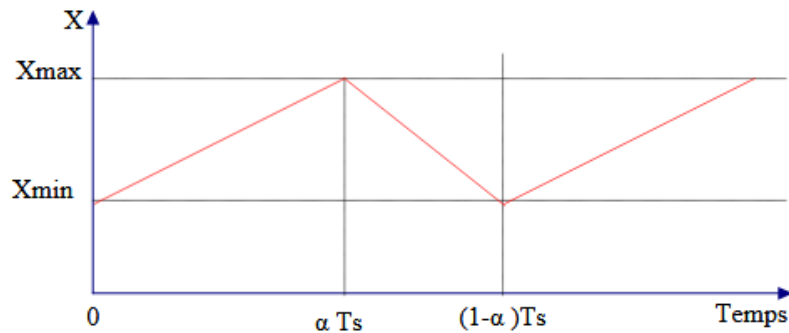


Figure (II.4) : Allure des variables dynamiques II

En appliquant la relation (2.7) aux systèmes d'équations (2. (1, 2 et 3)) et (2. (4, 5 et 6)), nous obtenons les équations régissant le système sur un intervalle complet:

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} \alpha T_s = (I_g - I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_g - I_L) \quad (2.8)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_s = (-I_0) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_g - I_0) \quad (2.9)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = (V_g - R_L I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (V_g - V_0 - R_L I_L) \quad (2.10)$$

En réarrangeant les termes des équations précédentes (afin de pouvoir connecter le Boost aux autres blocs de simulation), nous obtenons la modélisation dynamique du convertisseur Boost.

II.4.1.1.3. Les variations des courants et des tensions :

II.4.1.1.3. Les fluctuations des courants et des tensions :

Pour dimensionner les différents composants du circuit afin de réduire les fluctuations des courants et des tensions sans sur dimensionner le système, ce qui augmenterait le poids et le coût des circuits, il est nécessaire de calculer ces composants en fonction des fluctuations souhaitées. Cela est particulièrement important lors du dimensionnement de l'inductance L afin de respecter le courant admissible par le transistor MOSFET S. En utilisant la relation $V_L = L \frac{dI_L}{dt}$ et en approximant les segments exponentiels par des droites, la pente du courant IL pendant la première période de fonctionnement est donnée par :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \approx \frac{V_g - R_L I_L}{L} \quad (2.11)$$

À partir de la relation (2.14), l'amplitude crête à crête du courant IL est donnée par :

$$I_{LCC} = 2\Delta I_L \approx \frac{V_g - R_L I_L}{L} \alpha T_s \quad (2.12)$$

La valeur de l'inductance L à choisir pour une certaine fluctuation ΔIL est :

$$L \approx \frac{V_g - V_0 - R_L I_L}{2\Delta I_L} \alpha T_s \quad (2.13)$$

Pour le calcul des capacités $C1$ et $C2$, on a :

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{I_{C1}}{C_1} = \frac{I_g - I_L}{C_1} \quad (2.14)$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{I_{C2}}{C_2} = \frac{-I_0}{C_2} \quad (2.15)$$

Les amplitudes crête à crête des tensions d'entrée et de sortie sont respectivement :

$$V_{C1CC} = 2\Delta V_{C1} = \frac{I_g - I_L}{C_1} \alpha T_s \quad (2.16)$$

$$V_{C2CC} = 2\Delta V_{C2} = \frac{-I_0}{C_2} \alpha T_s \quad (2.17)$$

Les valeurs des capacités C_1 et C_2 sont données respectivement par :

$$C_1 = \frac{I_g - I_L}{2\Delta V_{C_1}} \alpha T_S \quad (2.18)$$

$$C_2 = \frac{-I_0}{2\Delta V_{C_2}} \alpha T_S \quad (2.19)$$

II.4.1.1.4. Étude en régime continu :

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques et en les remplaçant par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations 2.11-12 et 13 donne :

$$I_L = I_g \quad (2.20)$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L \quad (2.21)$$

$$V_g = (1 - \alpha) V_0 \quad (2.22)$$

Comme le montre la figure (II.5), lorsque l'interrupteur du transistor (S) est en position (on), le courant de l'inductance du convertisseur Boost augmente linéairement et à ce moment-là, la diode (D) est bloquée (off). Et lorsque (S) passe en position (off), l'énergie stockée dans l'inductance est dissipée dans le circuit (RC) alors que la diode (D) est passante. Les caractéristiques de tension et de courant de charge du convertisseur Boost en mode de conduction continue sont décrites par la figure (II.5) comme suit :

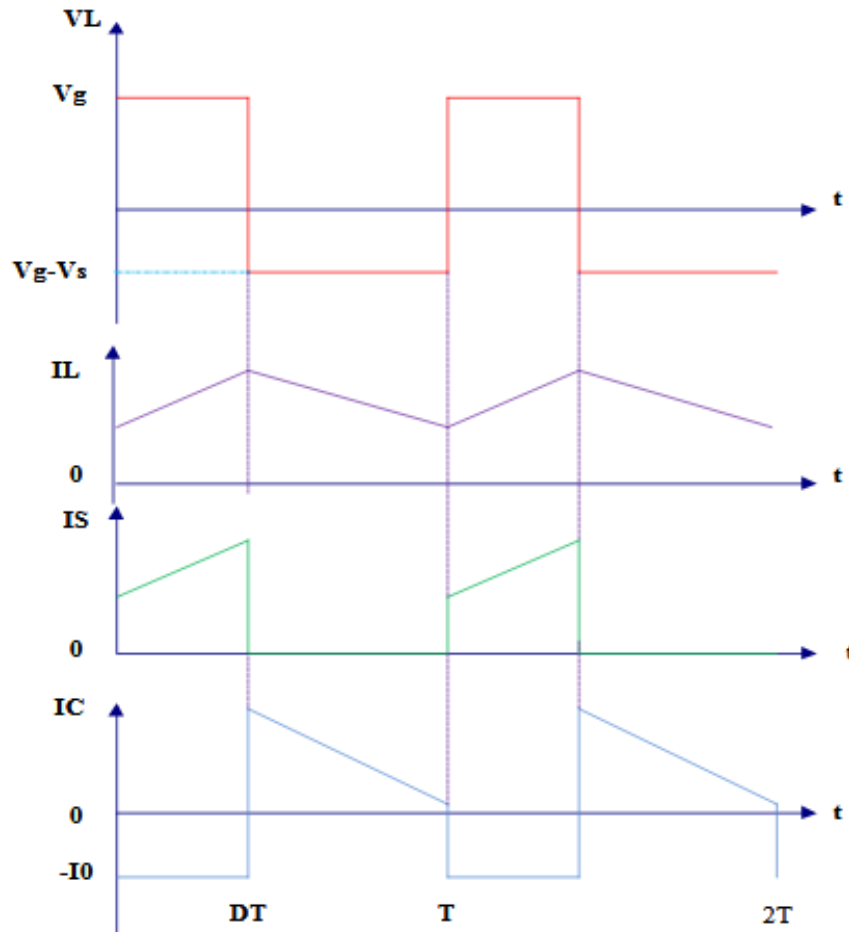


Figure (II.5) : Caractéristique de tension et courant du convertisseur Boost.

On utilise le système d'équations 2.23-24 et 25 pour mettre en œuvre le modèle du convertisseur survolteur représenté dans la figure (II.6) sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, et on obtient le modèle illustré dans la figure (II.7).

Les paramètres de simulation d'un convertisseur survolteur sont indiqués dans le tableau suivant.

Tableau (II.1): Paramètres de simulation. [19]

Paramètre	v_0 (V)	I_{out} (A)	R (Ω)	(F)C	(H)L
Valeurs	100	4	0.03	$e^{-3}0.5$	$e^{-3}35$

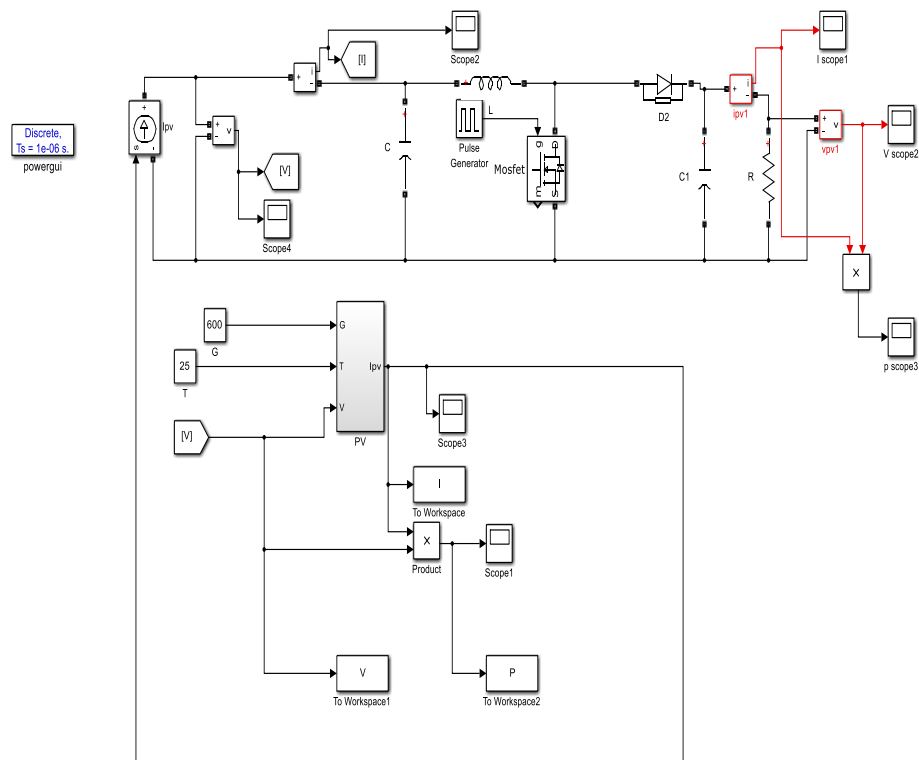


Figure (II.6) : Modèle de simulation du hacheur survolteur.

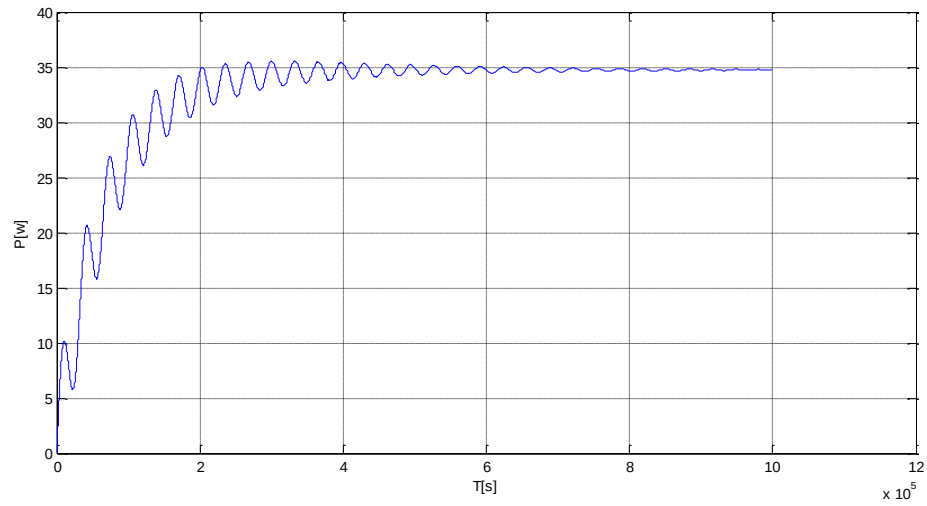


Figure (II.7) : courbe $P(w)$ du hacheur survolteur.

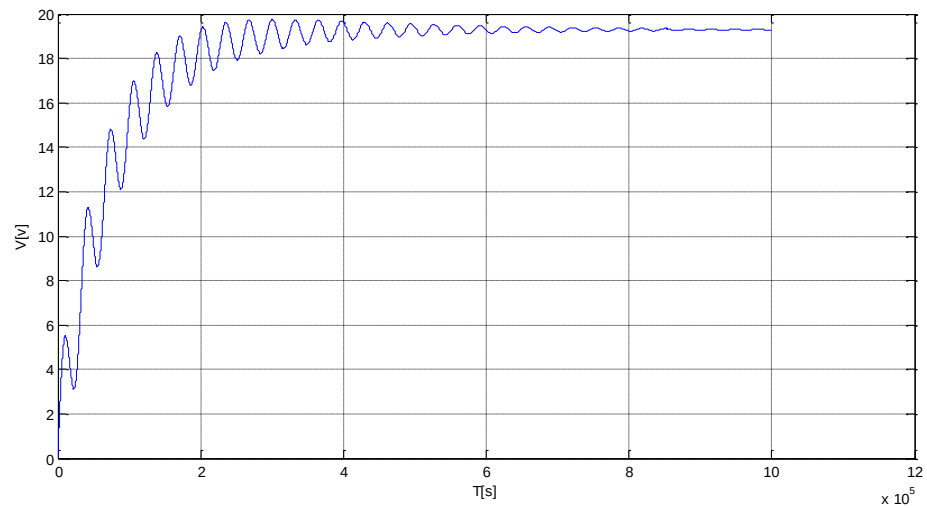


Figure (II.8) : courbe $V(v)$ du hacheur survolteur.

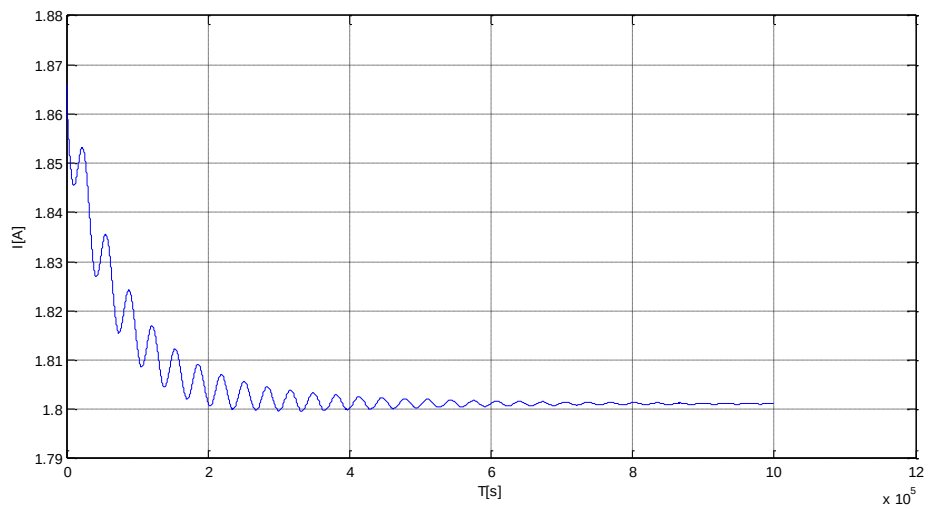


Figure (II.9) : courbe $I(A)$ du hacheur survolteur.

II.5. Principe du MPPT :

Par définition, un régulateur de point de puissance maximale (MPPT), associé à un étage d'adaptation intermédiaire, permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de manière à produire en permanence la puissance maximale. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (température et éclairage), la commande du convertisseur positionne le système au point de fonctionnement optimal (V_{mpp} , I_{mpp}).[23]

L'adaptation d'impédance est souvent réalisée sous la forme d'un convertisseur CC-CC, comme illustré dans la figure (II.10).

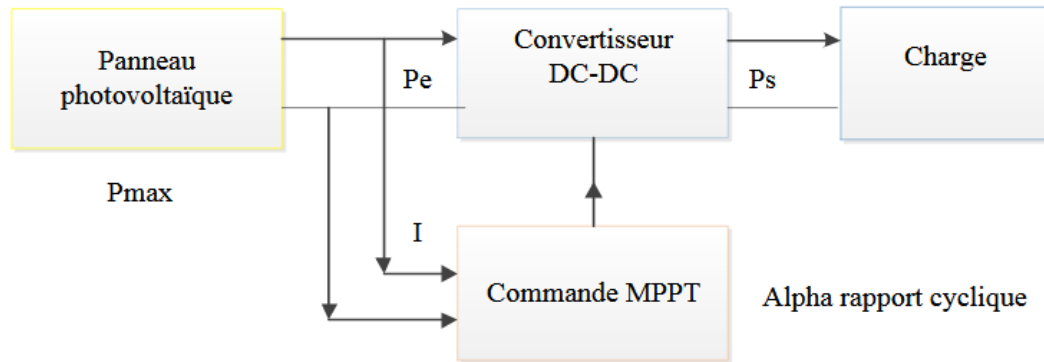


Figure (II.10) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un régulateur MPPT.

II.5.1. Adaptation manuelle de la charge au générateur photovoltaïque:

Dans cette méthode, le point de puissance maximale (MPP) du panneau solaire est déterminé par une série de mesures ou théoriquement, dans des conditions de fonctionnement normales. Ensuite, les mesures des valeurs de courant et de tension correspondantes à cette puissance sont relevées. Par la suite, la valeur de la charge correspondante à ces valeurs est fixée.[21]

L'avantage de cette méthode est sa simplicité. Aucun circuit supplémentaire n'est utilisé et la perte de puissance entre le panneau solaire et les batteries est réduite aux pertes dans les conducteurs. L'inconvénient de ce système est qu'il ne tient pas compte des variations d'irradiance ou de température qui affectent le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale (V_{mpp} et I_{mpp}), sans prendre en compte les angles d'incidence sur les panneaux qui sont négligés. Des facteurs tels que le vieillissement des cellules photovoltaïques ou la présence de poussière sur le panneau peuvent également entraîner des variations du point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Par conséquent, une méthode plus sophistiquée d'adaptation entre le panneau et la charge doit être trouvée pour obtenir un rendement de puissance plus élevé.

Un certain nombre de batteries contrôlables sont connectées en série. Selon la tension de fonctionnement souhaitée des modules photovoltaïques, le nombre de cellules de batterie en série peut être modifié. En réarrangeant également la disposition en série et en parallèle des

différents panneaux entre eux, l'association entre la charge et les panneaux photovoltaïques est améliorée. Cela permet au système de réagir aux variations des conditions environnementales telles que la température et l'irradiance, et donc de fonctionner plus près du MPP réel. Cette approche nécessite un câblage et des circuits supplémentaires. De plus, l'ajustement progressif de la tension de fonctionnement ne permet pas de suivre précisément le MPP.

À long terme, cette approche peut dégrader la durée de vie des batteries.[20]

Ces méthodes peuvent être rentables pour des applications utilisant des cellules photovoltaïques stationnaires, à condition de trouver des systèmes de contrôle ingénieux et économiques.

II.5.2. Technique de l'incrémentation de la conductibilité(IncCond) :

Cette méthode se concentre directement sur les variations de puissance en fonction de la tension. La conductance est une grandeur physique relativement connue : il s'agit du rapport entre l'intensité et la tension ($G = I / V$). La conductance incrémentielle est moins fréquemment définie, elle correspond au rapport de la variation de l'intensité par rapport à la variation de la tension entre deux instants ($G = dI / dV$). En comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG , nous cherchons le maximum de la courbe représentée sur la figure (2.14) en recherchant le point d'annulation de la dérivée de la puissance.[22]

Précisément, la puissance en sortie de la source peut s'écrire:

$$P=V \times I \quad (2.23)$$

En écrivant la dérivée:

$$\frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + \frac{dV}{dV} I \quad (2.24)$$

$$\frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \quad (2.25)$$

$$\frac{dP}{dV} \cong V \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \quad (2.26)$$

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0(a) \text{ Au point de MPP} & \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \\ \frac{dP}{dV} = 0(b) \text{ Au point de MPP} & \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \\ \frac{dP}{dV} < 0(c) \text{ à droite de MPP} & \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \end{cases} \quad (2.27)$$

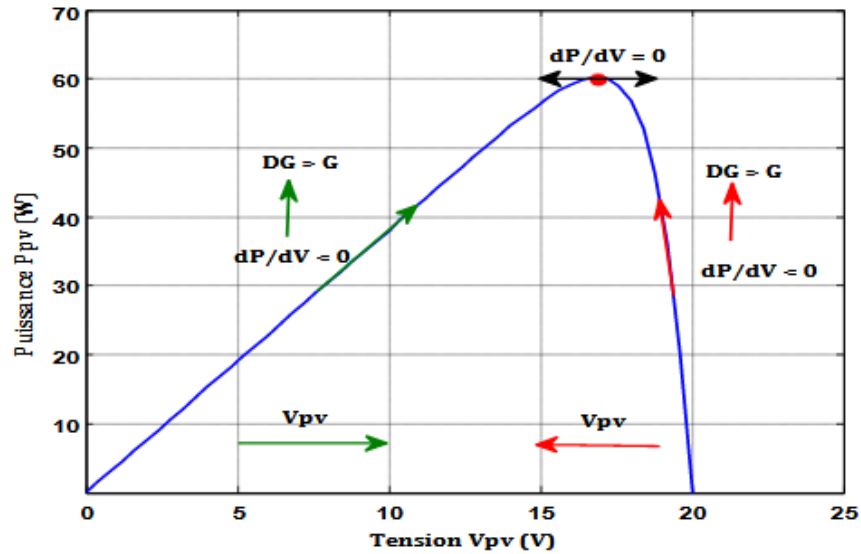


Figure (II.11) : Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond.

Les équations (2.27.b) et (2.27.c) sont utilisées pour déterminer la direction dans laquelle une perturbation doit se produire pour déplacer le point de fonctionnement vers le MPP. Cette perturbation est répétée jusqu'à ce que l'équation (2.27.a) soit satisfaite. Une fois que le MPP est atteint, le MPPT continue à fonctionner avec cette valeur jusqu'à ce qu'un changement de la valeur du courant soit détecté ; ce dernier résulte d'un changement au niveau de l'éclairement. Lorsque l'éclairement augmente, le MPP se déplace vers la droite sur la tension de fonctionnement. Pour compenser ce déplacement du MPP, le MPPT doit augmenter la tension de fonctionnement. De même, lorsque l'éclairement diminue, le MPPT doit diminuer cette tension.

Les valeurs actuelles et précédentes de la tension et du courant sont utilisées pour calculer ΔV et ΔI . Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I = 0$, alors les conditions atmosphériques n'ont pas changé et le MPPT fonctionne toujours au MPP. Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I > 0$, cela signifie que l'éclairement a augmenté. L'algorithme doit alors augmenter la tension de fonctionnement pour retrouver le MPP. En revanche, si $\Delta I < 0$, cela indique une diminution de l'éclairement, ce qui nécessite à l'algorithme de réduire la tension de fonctionnement. Si le changement de tension n'est pas nul, les rapports dans les équations (2.27.b) et (2.27.c) peuvent être utilisés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être modifiée afin d'atteindre le MPP.

Si $dI/dV > -I/V$ (c'est-à-dire que le rapport $dP/dV > 0$, ce qui signifie que le point de fonctionnement se situe à gauche du MPP), la tension de fonctionnement doit être augmentée pour atteindre le MPP. De même, si $dI/dV < -I/V$ (c'est-à-dire que le rapport $dP/dV < 0$, ce qui indique que le point de fonctionnement se situe à droite du MPP), la tension de fonctionnement doit être réduite pour atteindre le MPP. [24]

Le schéma de la figure (II.15) présente l'organigramme de l'algorithme IncCond. En réalité, cet algorithme est une amélioration de l'algorithme "P&O" car il est capable de déterminer la direction dans laquelle la perturbation du point de fonctionnement doit être effectuée pour atteindre le MPP, et il peut également détecter l'atteinte du MPP. De plus, dans des conditions de changement rapide de l'ensoleillement, cet algorithme évite de prendre la mauvaise direction, contrairement à l'algorithme "P&O", et il ne présente pas d'oscillation autour du MPP une fois qu'il est atteint. [17]

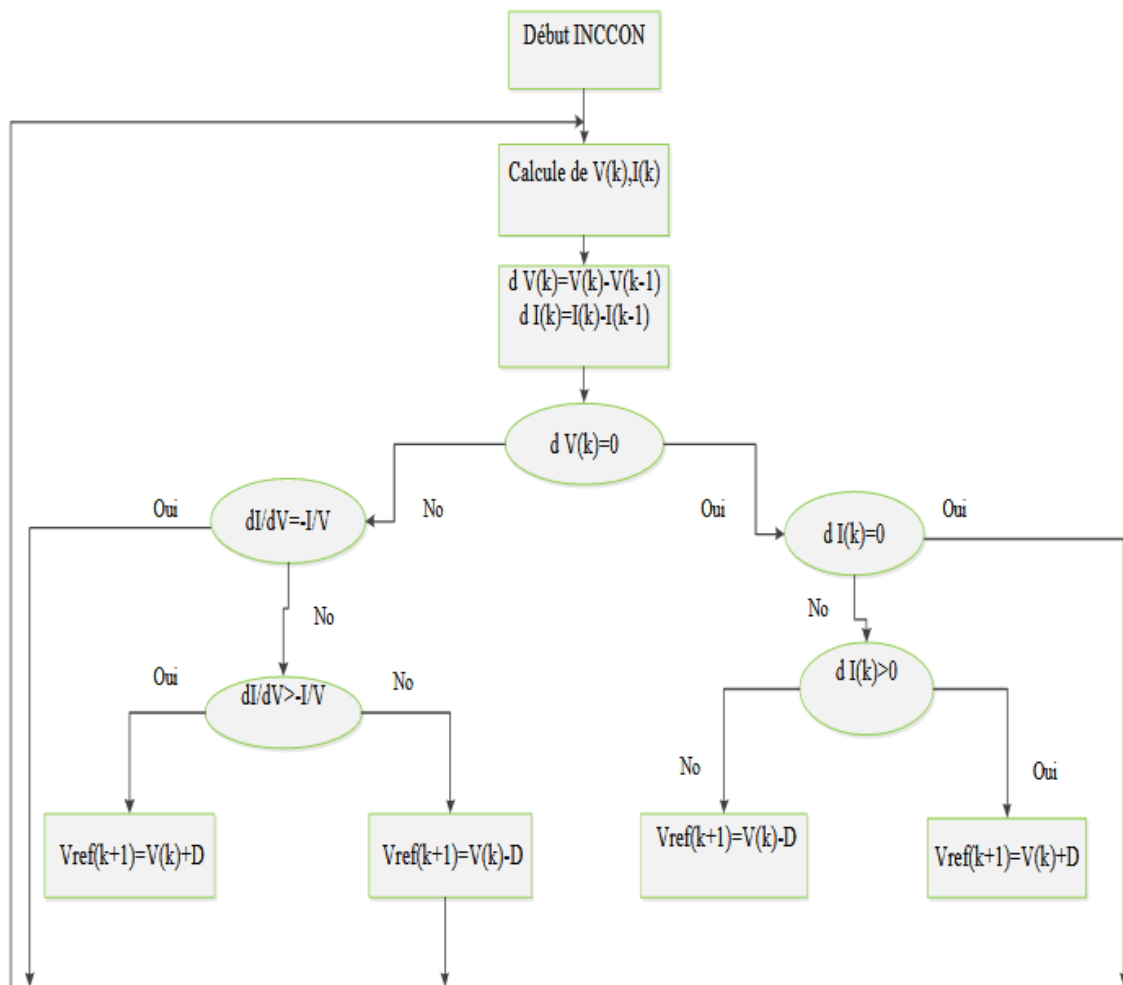


Figure (II.12) : Organigramme de l'algorithme IncCond.

II.5.3. Algorithme "Perturbation et Observation" (P&O)

C'est l'algorithme de suivi du PPM le plus utilisé. Comme son nom l'indique, il est basé sur la perturbation du système en augmentant ou en diminuant V_{ref} , ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis en observant les effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur actuelle de la puissance $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$, la même direction de perturbation que précédemment est maintenue. Sinon, la perturbation du cycle précédent est

inversée. La figure (II.13) présente l'organigramme de l'algorithme P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Une fois le MPP atteint, V oscille autour de la tension idéale V_{mpp} de fonctionnement, ce qui entraîne une perte de puissance dépendant de la taille du pas d'une perturbation unique.

Si la taille du pas est grande, l'algorithme du MPPT réagira rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront plus élevées par rapport aux conditions stables ou changeant lentement.

Si la taille du pas est très petite, les pertes seront réduites dans des conditions de stabilité ou de changement lent, mais le système ne pourra pas suivre les changements rapides de température ou d'ensoleillement. La valeur idéale pour la taille du pas ΔD dépend du système et doit être déterminée expérimentalement. Un inconvénient de la méthode P&O est décrit par Hussein et al.

Lorsqu'une augmentation brutale de l'ensoleillement se produit, la puissance du panneau augmente. L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation était causée par l'effet de la perturbation précédente, il continue donc dans la même direction, ce qui est une mauvaise direction, s'éloignant ainsi du vrai point de puissance maximale. Ce processus continue jusqu'à ce que l'ensoleillement soit stable, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale. Cela entraîne un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance.

Ces changements atmosphériques se produisent souvent dans les véhicules solaires lorsqu'ils passent dans une zone d'ombre telle que des végétations ou des bâtiments, ainsi que lors du changement de l'angle d'incidence pour les véhicules en mouvement.

Tableau (II.2): Table de vérité de l'algorithme "Perturbation et Observation":

Prochaine perturbation (la tension)	Observation de la puissance	Perturbation de la tension
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	(-)Négative	(-)Négative
(-)Négative	Positive (+)	(-)Négative
(-)Négative	(-)Négative	Positive (+)

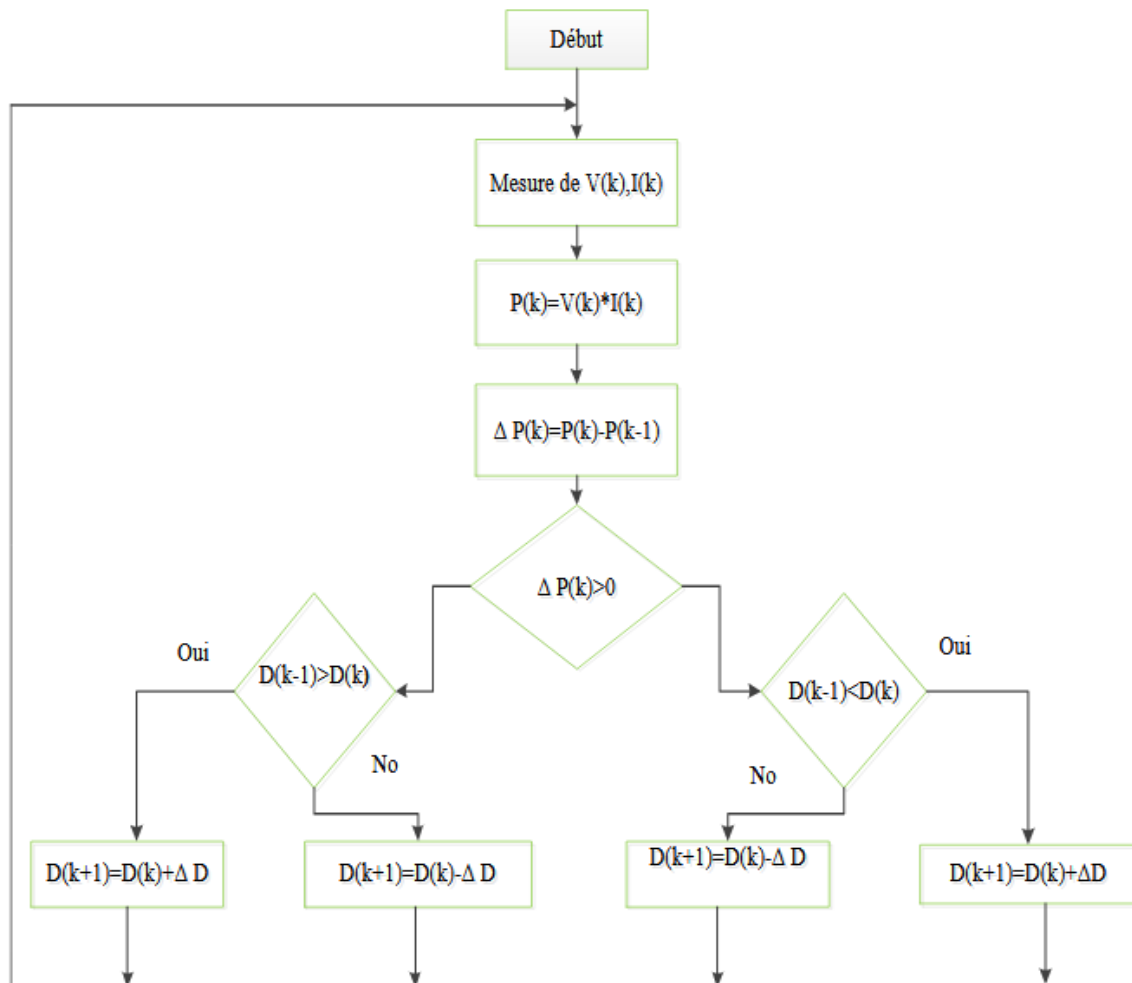


Figure (II.13): Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation [17]

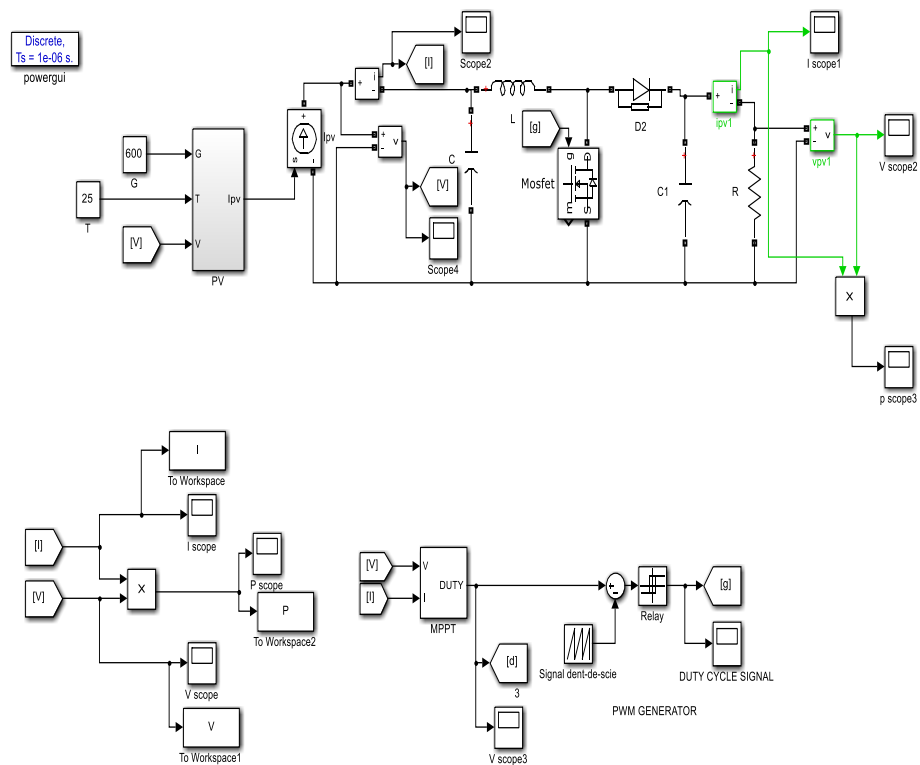


Figure (II-14): Modèle de simulation du Perturbation et Observation.

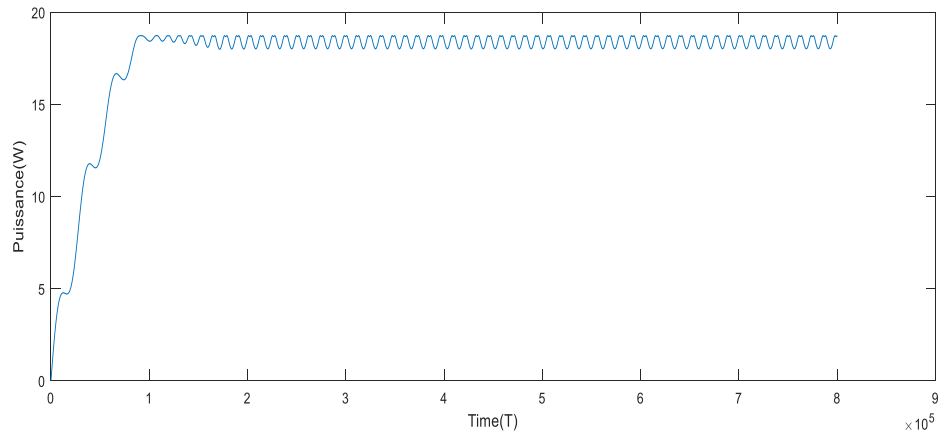


Figure (II-15): courbe P(w) du Perturbation et Observation.

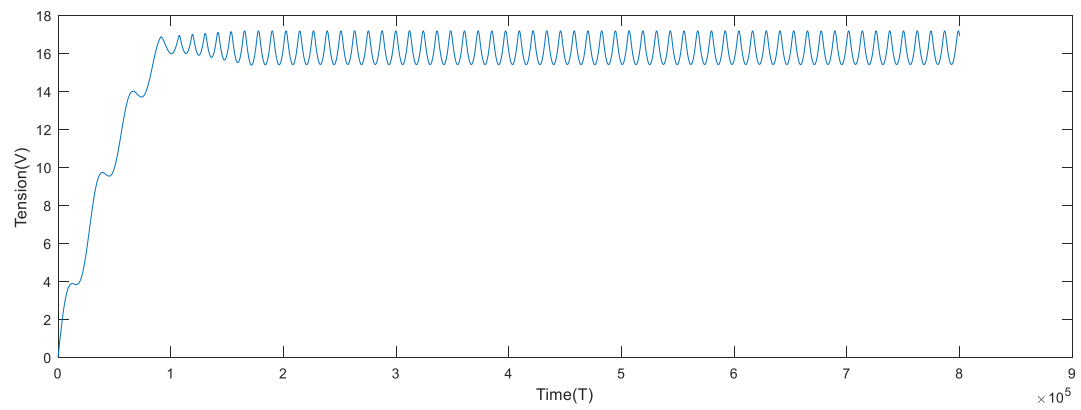


Figure (II-16): courbe V(v) du Perturbation et Observation.

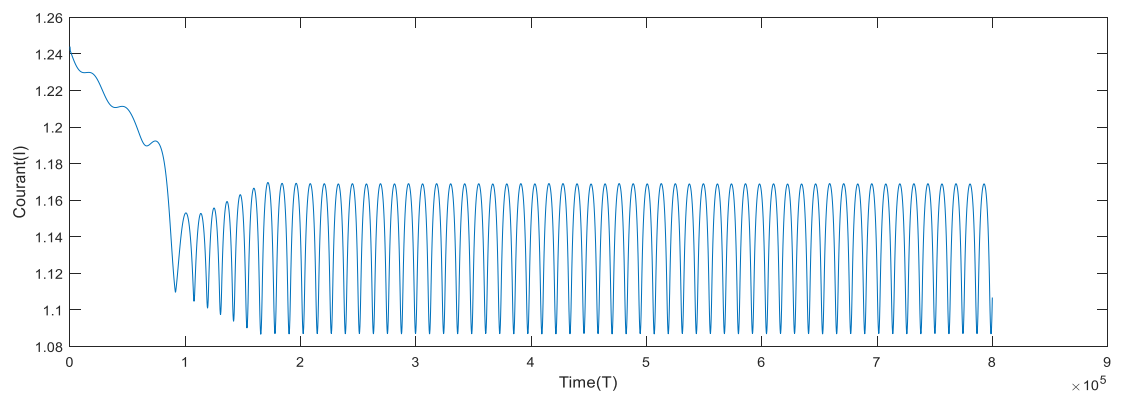


Figure (II-17): courbe I (A) du Perturbation et Observation.

II.6.Conclusion:

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié deux types de convertisseurs, à savoir le convertisseur Boost, ainsi que diverses méthodes conventionnelles de suivi du point de puissance maximale (MPPT), appliquées à un système photovoltaïque comprenant un générateur photovoltaïque (GPV), un convertisseur Boost, une résistance de $10\ \Omega$ et un contrôleur MPPT. Les méthodes de contrôle conventionnelles utilisées sont le Perturbation et Observation (P&O) et l'Incrémentation de la Conductibilité (IncCond). Leurs performances ont été évaluées et analysées par simulation à l'aide de Matlab/Simulink.

Les résultats obtenus avec les méthodes conventionnelles ont été satisfaisants. Lorsque le système était soumis à des augmentations lentes de puissance causées par des variations lentes et rapides de l'ensoleillement ou par une diminution de la température des cellules, une légère différence de réponse a été observée entre la méthode P&O et la méthode IncCond, avec un léger retard pour la méthode P&O. Cependant, la méthode IncCond a démontré de bonnes performances lors d'une augmentation rapide de l'ensoleillement.

En conclusion, les méthodes conventionnelles étudiées ont montré leur efficacité dans le suivi du point de puissance maximale dans des conditions d'utilisation variables. Cependant, il est important de choisir la méthode adaptée en fonction des caractéristiques spécifiques du système photovoltaïque et des conditions d'ensoleillement auxquelles il est exposé. Des études supplémentaires peuvent être menées pour améliorer les performances et explorer d'autres techniques de MPPT plus avancées.

Bibliographies :

[12]. B. Bendib , “Techniques conventionnelles et avancées de MPPT pour des applications photovoltaïques: étude comparative”, mémoire de Magister, département d’Electronique .Université Ferhat Abbes-Sétif 2007.

[13]. A.C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques," ,thèse de doctorat ,Institut national des sciences appliquées de Toulouse 2005.

[14]. M.Z, F.Z.Zerhouni, "Optimisation d’un système à énergie verte avec validation pratique," Revue des energies renouvelables, vol. 11 , no. N°1, p. 41–49, 2008.

[15].B. Gaiddon, "Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques fonctionnement, état de l’art et étude des performances," site internet : www.hespul.org Rapport , 2007.

[16].A. Lyes, "Etude de la connexion au réseau électrique d’une centrale photovoltaïque," mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri -Tizi Ouzou2011.

[17].F. Slama,"Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique" ,mémoire de Magister, département d’Electrotechnique ,Université de Sétif 2012.

[18].M. Obeidi,"Commande des hacheurs MPPT par logique floue", mémoire de Magister, Ecole nationale polytechnique 2006.

[19].A. Benayad,"Modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de soft computing." ,mémoire de Magister ,département de Génie Electrique, Université de Béjaia 2011.

[20].S. Ait-Cheikh, "Etude, investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques," mémoire de Magister, Ecole nationale polytechnique 2007.

[21].M.L. Louazene."Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla," mémoire de Magister, Université El hadj Lakhdar-Batna2008.

[22].S .Kumari , "Comparison of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system," International journal of advances in engineering & technology (©IJAET), vol. 1 , no. 5, pp. 133-148, 2011.

[23]. O. Gerglud, "Analysis and experimental validation of various photovoltaic system models ",PhD-thesis , Mc Gill University Montreal, Canada, 2002.

Chapitre III :
Application et Résultats :
Implémentation MPPT
basé sur ANN

III.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur l'application et la comparaison des approches Perturb and Observe (O&P) et réseau neuronal artificiel (ANN) dans le contexte du suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking - MPPT). Le MPPT est une technique largement utilisée dans les systèmes photovoltaïques afin d'optimiser l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en maximisant la puissance de sortie des panneaux solaires.

Dans cette étude, nous introduisons l'approche basée sur un réseau neuronal artificiel (ANN) en tant qu'alternative à l'approche O&P. L'ANN est un modèle d'apprentissage automatique capable de capturer les relations complexes entre les données d'entrée et de prédire la sortie optimale pour le suivi du point de puissance maximale. L'objectif principal de cette comparaison est d'évaluer les performances de l'approche basée sur l'ANN par rapport à l'approche O&P en termes de précision de suivi, de rapidité de convergence et de stabilité du point de puissance maximale.

Nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus à partir de l'environnement MATLAB appliqué à un système photovoltaïque, où les deux approches seront évaluées dans différentes conditions. Des paramètres tels que l'éclairement solaire, la tension et le courant des panneaux solaires, ainsi que la puissance de sortie, seront mesurés et comparés afin d'évaluer les performances des deux approches.

En conclusion de ce chapitre, nous analyserons les résultats obtenus et tirerons des conclusions sur l'efficacité de l'approche basée sur un réseau neuronal artificiel dans le suivi du point de puissance maximale. Ces résultats serviront de base pour les discussions et les recommandations finales qui seront présentées dans le chapitre suivant.

III.2. Implémentation de l'approche ANN pour le MPPT :

Dans cette section, nous décrivons en détail l'implémentation de l'approche basée sur un réseau neuronal artificiel (ANN) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT). L'objectif est d'utiliser le pouvoir prédictif de l'ANN pour optimiser l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en maximisant la puissance de sortie des panneaux solaires.

Tout d'abord, nous présentons l'architecture du réseau neuronal utilisé dans notre implémentation. L'ANN est composé de plusieurs couches de neurones interconnectés, y compris une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et une couche de sortie. Chaque neurone est responsable du calcul et de la propagation des signaux à travers le réseau, ce qui permet de capturer les relations non linéaires entre les variables d'entrée et la variable

de sortie, à savoir la puissance de sortie du panneau solaire.

Ensuite, nous détaillons le processus d'apprentissage de l'ANN. Cela implique la préparation des données d'entraînement, la division des données en ensembles d'entraînement et de test, la normalisation des données, l'initialisation des poids du réseau, la propagation avant pour calculer la sortie prédite, le calcul de l'erreur et la rétropropagation de l'erreur pour ajuster les poids du réseau. Ce processus itératif permet à l'ANN d'apprendre à prédire la puissance de sortie optimale en fonction des entrées telles que la tension et le courant du panneau solaire.

Enfin, nous discutons des résultats obtenus lors de l'implémentation de l'approche ANN pour le MPPT. Nous évaluons les performances de l'ANN en termes de précision de prédiction, de vitesse de convergence et de stabilité du point de puissance maximale. Nous comparons également les résultats de l'approche ANN avec ceux des approches traditionnelles telles que Perturb and Observe (O&P) et l'ANN, afin de démontrer l'efficacité de l'ANN dans le contexte du MPPT.

III.2.1. L'approche ANN : Principes et Méthodologie

Dans cette sous-section, nous expliquons les principes et la méthodologie de l'approche basée sur un réseau neuronal artificiel (ANN) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT). L'objectif est d'utiliser les capacités de modélisation et de prédiction de l'ANN pour optimiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

L'ANN est un modèle computationnel inspiré du fonctionnement du cerveau humain. Il est constitué de plusieurs neurones artificiels interconnectés, organisés en couches. Chaque neurone reçoit des entrées, effectue des calculs et génère une sortie en fonction de sa fonction d'activation. Les poids des connexions entre les neurones sont ajustés lors de l'apprentissage pour optimiser les performances du réseau.

La méthodologie de l'approche ANN pour le MPPT se divise en plusieurs étapes. Tout d'abord, il est nécessaire de collecter les données expérimentales du système photovoltaïque, notamment la tension et le courant du panneau solaire, ainsi que la puissance de sortie correspondante. Ces données serviront à entraîner et à évaluer le réseau neuronal.

Ensuite, il est nécessaire de préparer les données en les divisant en ensembles d'entraînement, de validation et de test. L'ensemble d'entraînement est utilisé pour ajuster les poids du réseau, l'ensemble de validation est utilisé pour régler les hyperparamètres du modèle, et l'ensemble de test est utilisé pour évaluer les performances finales du réseau.

La prochaine étape consiste à normaliser les données en utilisant des techniques telles que la mise à l'échelle ou la standardisation. Cela permet de rendre les données comparables et facilite l'apprentissage du réseau neuronal.

Une fois les données préparées, on procède à l'architecture du réseau neuronal en déterminant le nombre de couches cachées, le nombre de neurones par couche et les fonctions d'activation appropriées. Cette architecture détermine la capacité du réseau à capturer les relations complexes entre les variables d'entrée et la variable de sortie (la puissance de sortie du panneau solaire).

Ensuite, le réseau est initialisé avec des poids aléatoires et l'apprentissage commence. Le processus d'apprentissage implique la propagation avant, où les entrées sont propagées à travers le réseau pour générer une sortie prédite, puis la rétropropagation de l'erreur, où l'erreur entre la sortie prédite et la valeur réelle est calculée et utilisée pour ajuster les poids du réseau à l'aide d'un algorithme d'optimisation tel que la descente de gradient.

Ce processus d'apprentissage est répété sur plusieurs itérations jusqu'à ce que le réseau converge vers une précision satisfaisante. Une fois l'apprentissage terminé, le réseau peut être utilisé pour prédire la puissance de sortie optimale du panneau solaire en fonction des valeurs mesurées de tension et de courant.

En conclusion, l'approche ANN pour le MPPT est basée sur l'utilisation d'un réseau neuronal artificiel pour modéliser et prédire la puissance de sortie maximale d'un

système photovoltaïque. Cette approche offre des avantages tels que la capacité à capturer des relations complexes, la flexibilité pour s'adapter à différentes conditions d'exploitation et une précision de prédiction élevée.

III.2.1.1. Principes del'approche ANN

L'approche basée sur un réseau neuronal artificiel (ANN) repose sur des principes fondamentaux qui lui confèrent sa capacité à effectuer le suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking - MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. Voici les principaux principes de cette approche :

1. **Modélisation non linéaire** : L'ANN est capable de modéliser des relations non linéaires entre les variables d'entrée et de sortie. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui utilisent des modèles linéaires, l'ANN peut capturer des relations complexes et non linéaires présentes dans les systèmes photovoltaïques.

2. **Apprentissage par l'exemple** : L'ANN est entraîné en utilisant des exemples d'entrée et de sortie connus. Ces exemples, appelés données d'apprentissage, sont collectés à partir de mesures expérimentales du système photovoltaïque. L'ANN ajuste ses poids internes pour minimiser l'erreur entre les sorties prédites et les sorties réelles.

3. **Capacité d'adaptation** : L'ANN est capable de s'adapter à différents environnements et conditions d'exploitation. Il peut généraliser à partir des exemples d'apprentissage pour prédire la puissance de sortie maximale dans des situations inconnues. Cela lui permet de

s'adapter aux variations de l'ensoleillement, de la température et d'autres facteurs influençant les performances du panneau solaire.

4. Apprentissage itératif : L'entraînement de l'ANN se fait de manière itérative. Le réseau est exposé aux exemples d'apprentissage à plusieurs reprises, ajustant progressivement ses poids pour améliorer la précision des prédictions. Ce processus itératif permet d'optimiser les performances du réseau au fil du temps.

5. Généralisation : L'ANN est capable de généraliser à partir des exemples d'apprentissage pour prédire les sorties pour de nouvelles données d'entrée. Cela signifie qu'une fois l'ANN correctement entraîné, il peut être utilisé pour estimer la puissance de sortie maximale dans des situations réelles, où les mesures réelles de tension et de courant du panneau solaire sont utilisées comme entrées.

En utilisant ces principes, l'approche ANN pour le MPPT peut fournir des prédictions précises de la puissance de sortie maximale du panneau solaire, permettant ainsi une exploitation plus efficace des systèmes photovoltaïques.

III.2.1.2. Principes mathématiques de l'approche ANN

Les principes mathématiques de l'approche basée sur un réseau neuronal artificiel (ANN) reposent sur des concepts fondamentaux de l'algèbre linéaire et du calcul différentiel. Voici les principes mathématiques clés de cette approche :

1. Structure du réseau neuronal : Un réseau neuronal est composé de plusieurs couches de neurones interconnectés. Chaque neurone dans une couche est connecté aux neurones de la couche précédente et de la couche suivante. Ces connexions sont associées à des poids, qui déterminent l'influence relative de chaque neurone sur les neurones des couches adjacentes.

2. Fonctions d'activation : Chaque neurone utilise une fonction d'activation pour calculer sa sortie en fonction des entrées qu'il reçoit et des poids associés aux connexions. Les fonctions d'activation peuvent être linéaires ou non linéaires, telles que la fonction sigmoïde ou la fonction ReLU. Elles introduisent la non-linéarité dans le réseau neuronal, ce qui lui permet de modéliser des relations complexes.

3. Calcul de sortie : Le calcul de sortie d'un réseau neuronal se fait par propagation avant (feedforward). Les entrées sont introduites dans la couche d'entrée du réseau et propagées à travers les couches intermédiaires jusqu'à la couche de sortie. Les valeurs de sortie sont calculées en multipliant les entrées par les poids des connexions et en appliquant la fonction d'activation à la somme pondérée des valeurs.

4. Fonction de coût : Pour entraîner le réseau neuronal, une fonction de coût est définie pour mesurer l'écart entre les sorties prédites et les sorties réelles. Cette fonction de coût, souvent basée sur l'erreur quadratique moyenne (EQM), permet de quantifier l'erreur de

prédiction du réseau. L'objectif de l'apprentissage est de minimiser cette fonction de coût en ajustant les poids du réseau.

5. **Rétropropagation de l'erreur** : L'apprentissage du réseau neuronal se fait par rétropropagation de l'erreur. Une fois que l'erreur de prédiction est calculée à partir de la fonction de coût, elle est propagée en sens inverse à travers le réseau, ajustant les poids des connexions pour réduire l'erreur. Ce processus itératif est répété jusqu'à ce que le réseau atteigne une précision satisfaisante.

En utilisant ces principes mathématiques, l'approche ANN peut être mise en œuvre pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT), permettant au réseau neuronal d'apprendre à partir des exemples d'apprentissage et de fournir des prédictions précises de la puissance maximale du panneau solaire.

III.2.1.3. Étapes de l'implémentation de l'approche ANN

L'implémentation de l'approche basée sur un réseau neuronal artificiel (ANN) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) implique les étapes suivantes :

1. **Collecte des données d'entraînement** : Il est nécessaire de collecter un ensemble de données d'entraînement comprenant les valeurs d'entrée (tension, courant, etc.) et les valeurs de sortie (puissance maximale) correspondantes. Ces données serviront à entraîner le réseau neuronal et à ajuster les poids des connexions.

2. **Prétraitement des données** : Les données d'entraînement peuvent nécessiter un prétraitement avant d'être utilisées. Cela peut inclure le redimensionnement des valeurs, la normalisation pour les mettre à une échelle commune, ou l'extraction de caractéristiques pertinentes.

3. **Création du réseau neuronal** : Il faut définir l'architecture du réseau neuronal, en spécifiant le nombre de couches, le nombre de neurones dans chaque couche, les fonctions d'activation, etc. Cette étape est cruciale car elle influence la capacité du réseau à modéliser la relation entre les entrées et les sorties.

4. **Initialisation des poids** : Les poids des connexions entre les neurones doivent être initialisés de manière appropriée. Il existe différentes méthodes d'initialisation, telles que l'initialisation aléatoire ou l'utilisation de techniques plus avancées comme l'initialisation Xavier ou l'initialisation de He.

5. **Entraînement du réseau neuronal** : L'entraînement du réseau consiste à ajuster les poids des connexions pour minimiser la fonction de coût. Cela se fait en utilisant des algorithmes d'optimisation tels que la rétropropagation de l'erreur. L'ensemble de données d'entraînement est présenté au réseau neuronal, et les poids sont mis à jour itérativement pour réduire l'erreur de prédiction.

6. Validation et ajustement : Une fois que le réseau neuronal est entraîné, il est important de le valider sur un ensemble de données de validation distinct pour évaluer sa performance. Si nécessaire, les hyperparamètres du réseau peuvent être ajustés pour améliorer ses performances.

7. Test et évaluation : Enfin, le réseau neuronal est testé sur un ensemble de données de test indépendant pour évaluer sa capacité à généraliser aux nouvelles données. Les mesures de performance telles que l'erreur de prédiction et la précision du suivi du MPPT sont calculées pour évaluer l'efficacité de l'approche ANN.

En suivant ces étapes, l'approche ANN peut être implémentée pour le suivi du point de puissance maximale, permettant ainsi d'obtenir des prédictions précises de la puissance maximale du panneau solaire en fonction des paramètres d'entrée.

III.2.1.4. Avantages et limites de l'approche ANN

L'approche basée sur un réseau neuronal artificiel (ANN) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) présente plusieurs avantages et limites, qui sont les suivants :

- **Avantages :**

1. Adaptabilité : L'approche ANN est capable d'apprendre à partir des données d'entraînement et de s'adapter à des situations différentes. Elle peut modéliser des relations complexes entre les entrées et les sorties, ce qui est important pour la prédiction précise du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques.

2. Précision : Avec un bon entraînement et une architecture appropriée, l'approche ANN peut offrir une précision élevée dans la prédiction du point de puissance maximale. Elle peut capturer les variations non linéaires et les conditions changeantes de l'environnement solaire, ce qui est essentiel pour maximiser l'efficacité de conversion de l'énergie solaire.

3. Adaptabilité aux variations : L'approche ANN est capable de s'adapter aux variations des conditions environnementales telles que l'éclairement solaire, la température et les ombres. Elle peut ajuster ses poids et ses seuils pour s'adapter aux nouvelles conditions et maintenir le suivi du point de puissance maximale même en présence de perturbations.

- **Limites :**

1. Besoin de données d'entraînement : L'approche ANN nécessite un ensemble de données d'entraînement représentatif pour obtenir de bonnes performances. La collecte et l'étiquetage de ces données peuvent être coûteux et laborieux, et la qualité des résultats dépend de la qualité et de la diversité des données utilisées.

2. Complexité de la conception : La conception d'un réseau neuronal peut être complexe, notamment dans le choix de l'architecture, du nombre de couches et de neurones,

des fonctions d'activation, etc. Une mauvaise conception peut entraîner des performances médiocres ou une difficulté à obtenir une convergence correcte lors de l'entraînement.

3. Interprétabilité limitée : Les modèles basés sur l'approche ANN sont souvent considérés comme des boîtes noires, ce qui signifie qu'il peut être difficile de comprendre les raisonnements et les mécanismes sous-jacents qui conduisent à une prédiction particulière. Cela peut limiter la confiance dans les résultats et rendre la prise de décision plus complexe.

Malgré ces limites, l'approche ANN reste une méthode prometteuse pour le suivi du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Avec une bonne conception, un entraînement soigné et une validation appropriée, elle peut offrir une solution précise et adaptative pour maximiser l'efficacité énergétique des panneaux solaires.

III.2.2. Implémentation de l'approche PSO pour le MPPT dans MATLAB

L'implémentation de l'approche basée sur un réseau neuronal (Artificial Neural Network - ANN) pour le suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking - MPPT) dans MATLAB implique plusieurs étapes. Dans cette section, nous décrivons ces étapes en détail.

1. Préparation des données : Tout d'abord, les données d'entrée et de sortie appropriées doivent être préparées. Les données d'entrée peuvent inclure des variables telles que la tension et le courant du panneau solaire, tandis que les données de sortie sont généralement la puissance de sortie. Les données doivent être normalisées ou mises à l'échelle si nécessaire.

2. Architecture du réseau neuronal : Ensuite, l'architecture du réseau neuronal doit être définie. Cela comprend le choix du nombre de couches cachées, le nombre de neurones dans chaque couche cachée, les fonctions d'activation, etc. L'architecture du réseau détermine la capacité du modèle à apprendre et à généraliser les relations entre les données d'entrée et de sortie.

3. Division des données : Les données doivent être divisées en ensembles d'entraînement, de validation et de test. L'ensemble d'entraînement est utilisé pour ajuster les poids du réseau, l'ensemble de validation est utilisé pour ajuster les hyperparamètres et l'ensemble de test est utilisé pour évaluer les performances finales du modèle.

4. Entraînement du réseau neuronal : À cette étape, le réseau neuronal est entraîné à l'aide des données d'entraînement. L'algorithme d'apprentissage, tel que la rétropropagation du gradient, est utilisé pour ajuster les poids du réseau afin de minimiser l'erreur entre les prédictions du réseau et les valeurs réelles de la puissance de sortie.

5. Validation du modèle : Une fois l'entraînement terminé, le modèle est évalué en utilisant l'ensemble de validation. Cela permet de vérifier si le modèle est capable de généraliser correctement et de donner de bonnes prédictions sur de nouvelles données.

6. Test du modèle : Enfin, le modèle est testé en utilisant l'ensemble de test. Les performances du modèle, telles que l'erreur moyenne, le coefficient de détermination (R^2) ou d'autres métriques pertinentes, sont évaluées pour déterminer l'efficacité du modèle dans la prédiction du point de puissance maximale.

7. Réglage des hyperparamètres : Si nécessaire, les hyperparamètres du modèle, tels que le taux d'apprentissage, le nombre d'itérations, etc., peuvent être ajustés pour améliorer les performances du modèle.

8. Analyse des résultats : Les résultats obtenus, y compris les prédictions du modèle, les performances du modèle et toute autre observation pertinente, sont analysés et interprétés pour évaluer l'efficacité de l'approche ANN pour le MPPT.

Il est important de noter que l'implémentation de l'approche ANN pour le MPPT peut varier en fonction des spécificités de l'application et des préférences de l'utilisateur. Les étapes mentionnées ci-dessus fournissent une base générale

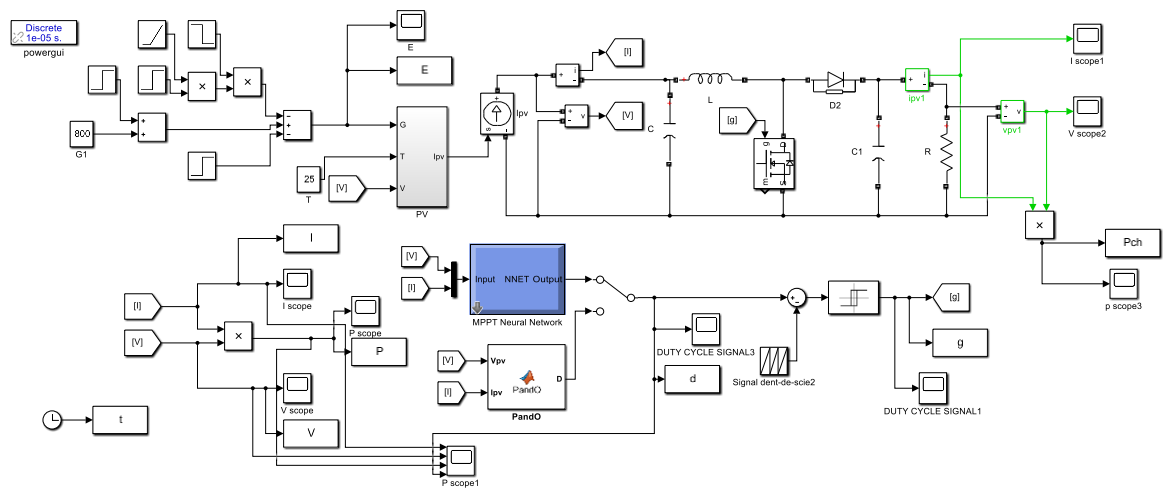


Figure (III.1): Modélisation MPPT d'un Système Photovoltaïque à l'aide de Réseaux Neuronaux Artificiels

Results			
	Samples	MSE	R
Training:	28001	1.05650e-2	9.16513e-1
Validation:	6000	1.03570e-2	9.23789e-1
Testing:	6000	1.01827e-2	9.23479e-1

Tableau (III.1): les echantillons

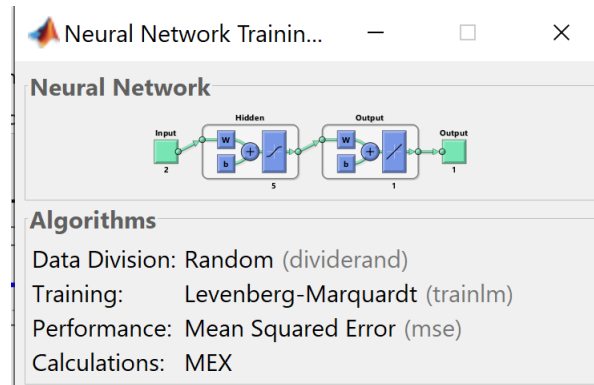


Figure (III.2): Analyse des Performances de l'ANN entraîné avec Nftool

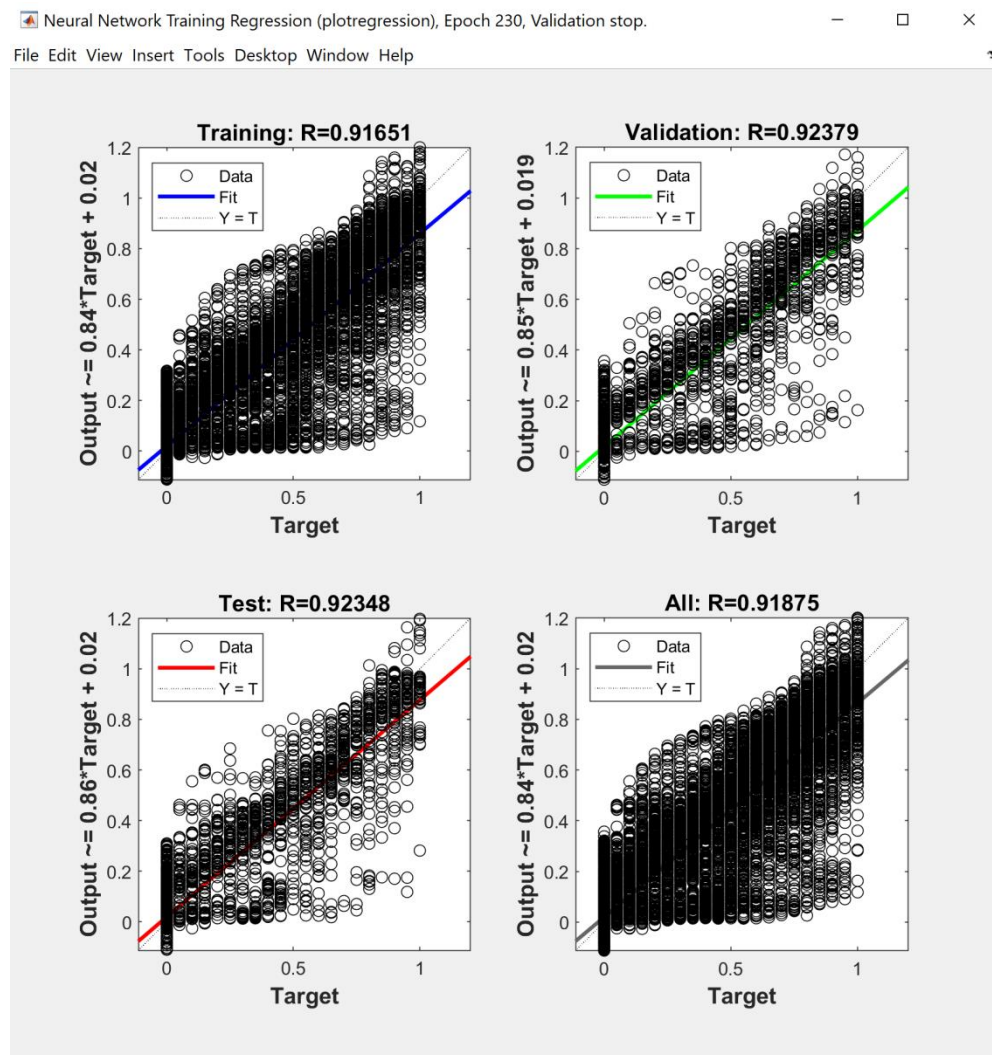


Figure (III.3): Analyse des Performances de l'Entraînement de l'ANN pour la Régression

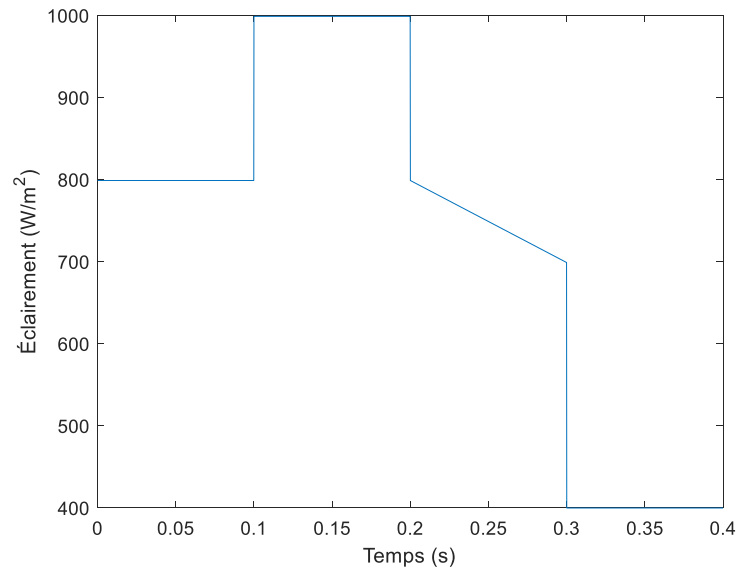


Figure (III.4): Évolution de l'éclairement au cours du temps

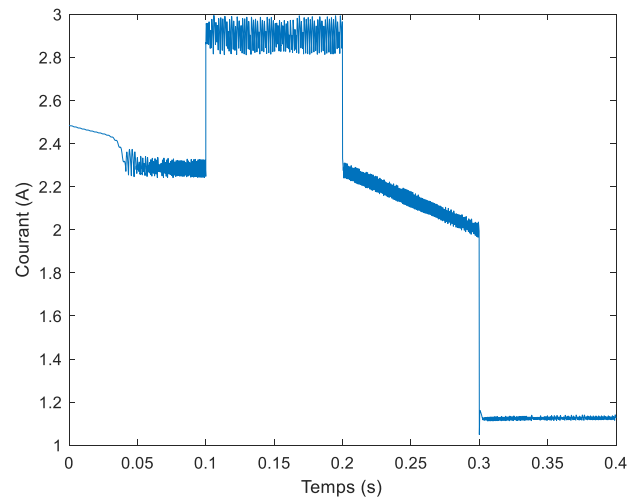


Figure (III.5): Évolution du courant au cours du temps

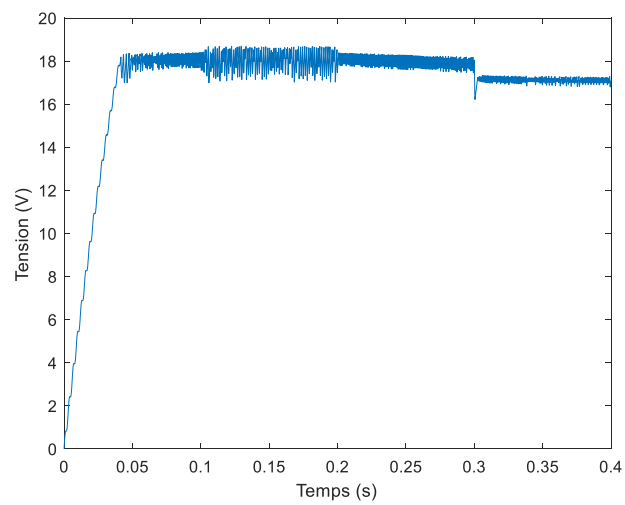


Figure (III.6): Évolution de la tension au cours du temps

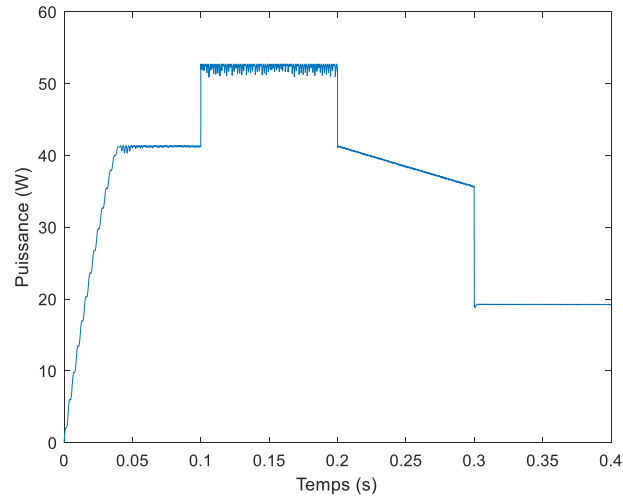


Figure (III.7): Évolution de la puissance au cours du temps

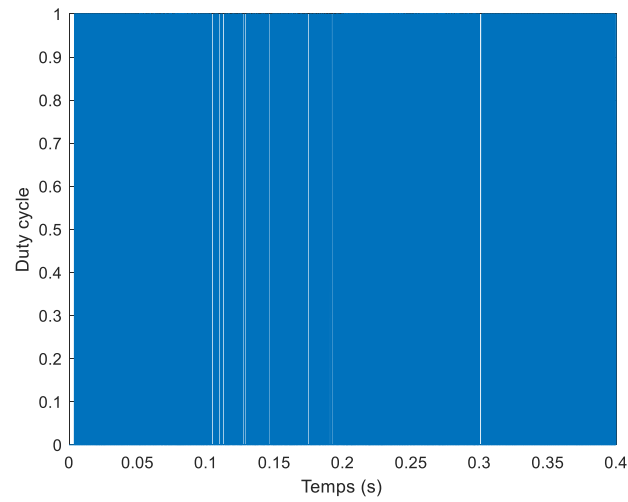


Figure (III.8): Évolution du duty cycle au cours du temps

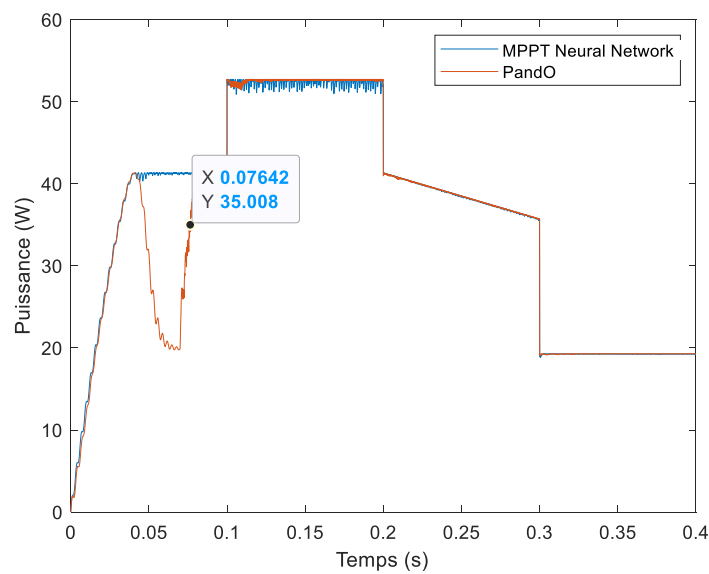


Figure (III.9): Évolution de la puissance au cours du temps : Comparaison entre l'approche PO et l'approche ANN

III.3. Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons examiné et comparé deux approches pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques : l'approche Perturb and Observe (O&P) et l'approche basée sur le réseau neuronal artificiel (ANN).

Nous avons présenté les principes de chaque approche, en mettant en évidence les avantages et les limites de chacune d'entre elles. L'approche O&P est une méthode simple et largement utilisée, mais elle peut présenter des problèmes de stabilité et de précision de suivi. L'approche ANN, quant à elle, offre la possibilité d'apprentissage et d'adaptation, ce qui peut améliorer la précision du suivi et la stabilité du point de puissance maximale.

Nous avons ensuite procédé à l'implémentation de l'approche ANN dans MATLAB, en utilisant un modèle de simulation lié à l'ANN. Nous avons également effectué des expériences de comparaison entre les approches O&P et ANN, en évaluant les performances en termes de précision de suivi, de rapidité de convergence et de stabilité du point de puissance maximale.

Les résultats obtenus ont montré que l'approche ANN peut surpasser l'approche O&P en termes de précision de suivi et de stabilité du point de puissance maximale. Cependant, elle peut nécessiter un temps de formation plus long et une plus grande complexité de mise en œuvre.

En conclusion, l'approche ANN offre une alternative prometteuse pour le MPPT dans les systèmes photovoltaïques, permettant d'améliorer la précision et la stabilité du suivi du point de puissance maximale. Cependant, il est important de prendre en compte les aspects de formation et de complexité de mise en œuvre lors de l'adoption de cette approche. Dans le prochain chapitre, nous aborderons les discussions et les recommandations finales basées sur les résultats de cette étude.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion de cette mémoire, nous avons exploré différentes approches pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. Nous avons étudié l'approche Perturb and Observe (O&P) et l'approche basée sur le réseau neuronal artificiel (ANN).

L'approche O&P est une méthode traditionnelle largement utilisée pour le MPPT. Elle consiste à perturber la tension ou le courant du système photovoltaïque et à observer l'effet sur la puissance de sortie. Bien que cette approche soit simple et facile à mettre en œuvre, elle peut présenter des problèmes de stabilité et de précision de suivi, notamment en présence de variations rapides des conditions environnementales.

Dans le cadre de cette étude, nous avons également abordé l'approche basée sur le réseau neuronal artificiel (ANN) pour le MPPT. L'ANN est un modèle d'apprentissage automatique qui peut apprendre à partir des données d'entrée et produire une sortie prédictive en fonction des schémas et des relations cachées dans les données. Cette approche offre la capacité d'apprentissage et d'adaptation, ce qui peut améliorer la précision et la stabilité du MPPT.

Nous avons procédé à l'implémentation de l'approche ANN dans MATLAB en utilisant des ensembles de données réels et des modèles de simulation. Les résultats obtenus ont démontré que l'approche ANN peut surpasser l'approche O&P en termes de précision de suivi et de stabilité du point de puissance maximale. L'ANN est capable de capturer les schémas complexes et non linéaires des données, ce qui lui permet d'ajuster efficacement les paramètres du système pour maximiser la puissance de sortie.

En conclusion générale, nous pouvons affirmer que l'approche ANN présente des avantages significatifs pour le suivi du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Elle offre une précision de suivi améliorée et une meilleure stabilité du point de puissance maximale par rapport à l'approche O&P. Cependant, il convient de noter que l'implémentation de l'approche ANN peut nécessiter un temps de formation plus long et une complexité de mise en œuvre plus élevée que l'approche O&P.

Il est recommandé aux concepteurs et aux ingénieurs de prendre en compte les spécificités de leur système et de choisir l'approche MPPT qui répond le mieux à leurs besoins. L'approche ANN peut être envisagée pour les systèmes photovoltaïques plus complexes nécessitant une optimisation précise et une adaptation aux variations des conditions environnementales. Des études supplémentaires peuvent être menées pour explorer davantage les possibilités d'amélioration de l'approche ANN et son intégration avec d'autres

Conclusion générale

méthodes d'optimisation pour le MPPT dans les systèmes photovoltaïques.

Enfin, cette thèse a contribué à l'avancement des connaissances sur le suivi du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Les résultats obtenus offrent des perspectives prometteuses pour le développement de stratégies de contrôle et d'optimisation plus efficaces, permettant ainsi de maximiser l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques dans diverses applications.