

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

Université Djilali Bounaama (Khemis Miliana)
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIEL

Présenté par :

✓ BRAHMI MOHAMMED

Thème :

Modélisation et commande du système photovoltaïque par les réseaux de neurones

devant le jury composé de :
Encadreur :

Dr Tidjani Naoual

Année Universitaire : 2021/2022

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

Résumé

L'un des principaux atouts des systèmes de production d'énergie photovoltaïque (PV) est qu'ils produisent de l'énergie électrique sans nuire à l'environnement, en transformant directement en électricité une source d'énergie gratuite et inépuisable, le rayonnement solaire. La bonne exploitation de cette source dépend des conditions météorologiques telles que l'éclairement et la température. Par conséquent, la puissance débitée par le générateur PV subit des fluctuations lors d'un éclairement partiel provoqué parfois par l'orientation, inclinaison etc.

Autrement dit, une bonne installation photovoltaïque est celle où la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque est maximale quelles que soient les conditions d'utilisation.

Dans ce document, nous avons présenté en premier temps des généralités sur le système PV, puis nous avons procédé à la modélisation du panneau PV de (37.24W). Le suivi de point (MPP) est une technique couramment utilisée avec les systèmes solaires photovoltaïques (PV) pour maximiser l'extraction de puissance dans toutes les conditions. Pour cela, nous avons utilisé la technique de contrôle de MPPT P&O et une approche basée sur l'intelligence artificielle, les réseaux de neurones afin de limiter les inconvénients de la méthode P&O.

Mots clés : Système photovoltaïque, MPPT, l'algorithme perturbation et observation (P&O), Les réseaux de neurones (RNA).

ملخص

تتمثل إحدى المزايا الرئيسية لأنظمة إنتاج الطاقة الكهروضوئية (PV) في أنها تنتج طاقة كهربائية دون الإضرار بالبيئة ، عن طريق التحويل المباشر لمصدر طاقة حرارة ، وهو من الإشعاع إلى كهرباء . يعتمد الاستغلال الصحيح لهذا المصدر على ظروف الأرصاد الجوية مثل الضوء ودرجة الحرارة. وبالتالي ، فإن اخرج الطاقة بواسطة المولد الكهروضوئي يخضع لتقلبات أثناء الإضاءة الجزئية التي تحدث أحياناً بسبب الاتجاه والميل وما إلى ذلك.

بمعنى آخر ، إنتاج الكهروضوئي الجيد هو الذي تكون فيه الطاقة التي يوفرها المولد الكهروضوئي هي الحد الأقصى بغض النظر عن ظروف الاستخدام ، قدمنا أولاً معلومات عامة عن نظام الكهروضوئية ، ثم انتقلنا إلى تركيب اللوحة الكهروضوئية (37.24 واط). تتبع النقاط (MPP) بهذه التقنية شائعة الاستخدام مع أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) لتعظيم لاستخراج الطاقة في جميع الظروف. ولهذا الغرض، عملنا بتقنية التحكم MPPT P&O و يعتمد هذا على الذكاء الاصطناعي، الشبكات العصبية من أجل الحد من عيوب طريقة P&O.

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي ، خوارزمية MPPT ، الاضطراب والرصد (P&O) ، الشبكات العصبية (RNA).

Summary

One of the main advantages of photovoltaic (PV) energy production systems is that they produce electrical energy without harming the environment, by direct conversion of a heat energy source, which is from radiation to electricity. Correct exploitation of this source depends on meteorological conditions such as light and temperature. Thus, the power output by the photovoltaic generator is subject to fluctuations during partial illumination which sometimes occur due to direction, tilt, etc.

In other words, a good PV output is one in which the power provided by the PV generator is maximum regardless of the conditions of use, we first provided general information about the PV system, and then proceeded to the installation of the PV panel (37.24W). Point Tracking (MPP) This technology is commonly used with solar photovoltaic (PV) systems to maximize energy extraction under all conditions. For this purpose, we have worked with MPPT P&O control technology and this is based on artificial intelligence, neural networks in order to reduce the defects of the P&O method.

Keywords: Photovoltaic system, MPPT, Perturbation and Observation (P&O) algorithm, Neural networks (ANN).

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------	---

Chapitre I: Les énergies renouvelables

I. Les énergies renouvelables	4
I.1. Introduction	4
I.2. La production de chaleur par les sources renouvelables	4
I.2.1. Thermo solaire	4
I.2.2. Biomasse	5
I.2.3. Géothermie	6
I.3. Production d'électricité par les énergies renouvelables	7
I.4. Modes d'exploitation d'un panneau photovoltaïque	12
I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie Photovoltaïque	14
I.5.1. Avantages de l'énergie Photovoltaïque	14
I.5.2. Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque	15
I.6. Le Potentiel Solaire en Algérie	15
I.7. Conclusion	17

Chapitre II : La modélisation du système photovoltaïque

II. Modélisation du système photovoltaïque	19
II.1. Introduction	19
II.2. Modèles de coordonnées soleil	19
II.2.1. Angle solaire	19
II.3. Modèle de rayonnement solaire	22
II.3.1. Rayonnement solaire sur un plan horizontal	22
II.3.2. Rayonnement solaire sur un plan incliné	23

II.4.	Modélisation du champ photovoltaïque	25
II.4.1.	Modèle de la température	27
II.5.	Caractéristiques électriques des modules photovoltaïques	29
II.5.1.	Influence de l'éclairement et de température	31
II.6.	Effet de l'ombrage	33
II.7.	Modélisation du système de conversion :	35
II.8.	Conclusion :	37

Chapitre III : Analyse de MPPT (P&O) et Les réseaux de neurones

III.	Analyse de MPPT (P&O) et Les réseaux de neurones	39
III.1.	Introduction	39
III.2.	Extraction de la puissance maximale du générateur photovoltaïque	39
III.3.	Principe de MPPT	39
III.3.1.	Principe des techniques "Incrément de conductance" (Inc. CoN)	40
III.3.2.	Principe des techniques "Perturba and Observe" (P&O)	42
III.4.	Les réseaux de neurones	44
III.4.1.	Introduction	44
III.4.2.	Historique	45
III.4.3.	Le modèle neurophysiologique	45
III.4.4.	Le modèle mathématique (neurone artificiel)	46
III.4.4.1.	Structure	46
III.4.5.	Architecture des réseaux de neurones	47
III.4.5.1.	Les réseaux non bouclés	47
III.4.5.2.	Réseaux bouclés	47
III.4.6.	Apprentissage des réseaux de neurones artificiels	48
III.4.6.1.	Types d'apprentissages	48

III.5. Perceptron :	50
III.5.1. Perceptron 49	
III.5.2.Le perceptron multicouche :	50
III.6. Avantages et Inconvénients des réseaux de neurones	51
III.6.1. Avantages des réseaux de neurones	51
III.6.2. Inconvénients des réseaux de neurones	51
III.7. Conclusion	52

Chapitre IV : Résultats de simulation

IV. Résultats de simulation	53
IV.1. Introduction	53
IV.2. Caractérisation du module PV	53
IV.3. Simulation du module PV	53
IV.4. Bloc du système avec MPPT	55
IV.4.1. Simulation de la méthode MPPT	55
IV.5. MPPT à base de réseaux de neurones artificiels	58
IV.5.1. Procédure de construction d'un réseau de neurones	59
IV.5.2. Résultats de simulation	60
IV.6. Conclusion:	61
Conclusion générale :	64

Liste des figures :

Figure (I-1)	Principe du panneau solaire thermique
Figure (I -2)	Le bois source de l'énergie Biomasse
Figure (I-3)	Principe de la géothermie
Figure (1-4)	Principe de fonctionnement d'un barrage
Figure (I-5)	Energie de la mer
Figure (I-6)	Conversion de l'énergie éolienne
Figure (I-7)	Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque
Figure (I-8)	Mode autonome
Figure (I-9)	Le mode connecté aux réseaux
Figure (I-10)	Schéma de branchement Mode Hybride
Figure (I-11)	Potentiel solaire en Algérie
Figure (II-1)	Coordonnées angulaires de soleil
Figure (II-2)	Représentation de l'éclairement d'un capteur plan incliné
Figure (II-3)	Schéma électrique équivalent d'une cellule PV
Figure (II-4)	Configurations des associations série parallèle des modules PV
Figure (II-5)	Caractéristique I/V d'un module PV
Figure (II-6)	Courbe de puissance d'un module PV
Figure (II-7)	Effet de l'éclairement sur la caractéristique I(V)
Figure (II-8)	Effet de l'éclairement sur la caractéristique P(V)
Figure (II-9)	Effet de la température sur la caractéristique I(V)
Figure (II-10)	Effet de la température sur la caractéristique P(V).
Figure (II-11)	Simulation de l'ombrage dans le cas d'une association de modules photovoltaïques en série
Figure (II-12)	Caractéristique I(V) sous ombrage et sans ombrage (association série)
Figure (II-13)	Caractéristique p(v) sous ombrage et sans ombrage
Figure (II-14)	Simulation de l'ombrage dans le cas d'une association de modules photovoltaïques en parallèle
Figure (II-15)	Caractéristique i(v) sous ombrage et sans ombrage
Figure (II-17)	Rendement de l'onduleur

Liste des figures

Figure (III-1)	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT
Figure (III-2)	Signe de dP/dV pour différentes zones de fonctionnement
Figure (III-3)	Organigramme de l'algorithme Cond-Inc.
Figure (III-4)	Algorithme MPPT perturbation and observation (P&O)
Figure (III-5)	Représentation schématique d'un neurone biologique
Figure (III.6)	Mise en correspondance du neurone biologique et du neurone artificiel
Figure (III-7-a)	Réseau non bouclé
Figure (III-7-b)	Réseau bouclé
Figure (III-8)	Apprentissage supervisé
Figure (III-9)	Apprentissage non supervisé
Figure (III-10)	Perceptron à une seule couche
Figure (III-11)	Perceptron multicouche
Figure (IV-1)	Schéma Bloc du module solaire dans SIMULINK
Figure (IV-2)	Résultats de simulation des caractéristiques (Courant – Tension)
Figure (IV-3)	Résultats de simulation des caractéristiques (puissance –tension)
Figure (IV-4)	Modèle de simulation du GPV adapté par la technique MPPT (P&O)
Figure (IV-5)	Schéma de simulation de l'algorithme (P et O)
Figure (IV-6)	Le signal de l'irradiation
Figure (IV-7)	Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque
Figure (IV-8)	Résultats de simulation du courant généré par le générateur photovoltaïque
Figure (IV-9)	Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur Photovoltaïque
Figure (IV-10)	Modèle du neurone choisi
Figure (IV- 11)	Mode d'entraînement de l'architecture neuronale
Figure (IV-12)	Schéma Bloc du réseau de neurones artificiel dans SIMULINK
Figure (IV- 13)	Puissance de sortie

Liste des tableaux :

Tableaux (I-1): Gisement solaire dépassant les 5 milliards de *GWh/an*.

Tableau (IV-1) : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

Nomenclature:

MPPT	Maximum Power Point Tract King
PV	Photovoltaïque.
MPV	Module photovoltaïque.
P&O	Perturbation et Observation.
PPM	Point de Puissance Maximale.
RNA	Réseau de neurone artificiel.
GPV	Générateur Photovoltaïque.
P max	La puissance maximale (W).
V max	Tension à la puissance maximale (V).
I max	Courant à la puissance maximale (A).
DC	Courant Continu.
E/S	Entre/Sorte.
RP	Résistances parallèle shunt. (Ω)
RS	Résistance série (Ω)
T	Température du MGPV ($^{\circ}\text{C}$)
I_{sc}	Le courant de court - circuit (A).
V oc	La tension de circuit ouvert (V).

Introduction générale

Introduction générale :

Ces derniers temps, les systèmes photovoltaïques sont de plus en plus populaires et conviennent parfaitement aux systèmes distribués. En raison de réglementations environnementales strictes, du manque de voies pour la construction de systèmes de transmission à haute tension et de problèmes de sécurité, les grandes centrales électriques sont devenues non rentables dans de nombreuses régions. En outre, les récentes avancées technologiques dans le domaine des petits générateurs, de l'électronique de puissance et des dispositifs de stockage d'énergie ont offert une nouvelle opportunité pour les ressources énergétiques distribuées qui sont situées plus près des charges.

En dépit de leurs coûts relativement élevés, les systèmes photovoltaïques installés ont connu une croissance très remarquable. Des études récentes montrent une augmentation exponentielle de la puissance photovoltaïque installée dans le monde. Des recherches sont en cours pour réduire les coûts et obtenir un meilleur rendement. En outre, de nouvelles lois réglementaires rendant obligatoire l'utilisation des énergies renouvelables ont permis de développer ce marché dans le monde entier.

Actuellement, les systèmes de production photovoltaïques sont activement promus afin d'atténuer les problèmes environnementaux tels que l'effet de serre et la pollution atmosphérique. L'énergie solaire est la principale source d'énergie renouvelable au monde et est disponible partout en différentes quantités. Les panneaux photovoltaïques ne comportent aucune pièce mobile, fonctionnent silencieusement et ne génèrent aucune émission. Autre avantage, la technologie solaire est très modulaire et peut être facilement adaptée pour fournir la puissance nécessaire à différentes charges.

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) joue un rôle essentiel dans le système photovoltaïque (PV) par l'utilisation efficace de l'énergie PV.

Le point de puissance maximale (MPP) du système PV varie en fonction des conditions atmosphériques et pour cela, un système de suivi efficace est nécessaire dont le but est d'extraire le maximum de puissance à la sortie du MPV. Il existe différents algorithmes MPPT disponibles pour suivre la puissance maximale. Parmi les différentes techniques MPPT, P&O est le plus utilisé en raison de sa structure simple et de sa facilité de mise en œuvre.

En considérant les variations des points de fonctionnement du générateur PV, le point de fonctionnement optimal est obtenu par technique réseaux de neurones artificiels.

Les avantages de la méthode P&O comprennent principalement un matériel peu coûteux, une mise en œuvre facile et de bonnes performances sans que l'irradiation solaire et la température ne changent rapidement dans le temps. La technique de commande basée sur l'intelligence artificielle telle que les réseaux de neurones est l'un des principaux objectifs de ce travail pour une meilleure performance du système PV. En effet, ils ont l'avantage de résoudre des problèmes non linéaires les plus compliqués par une façon très rapide du fait qu'ils soient représentés par des fonctions mathématiques non linéaires.

C'est pour cela que dans notre travail, nous nous sommes intéressés essentiellement au développement d'un système de commande à base de Réseaux de neurones artificiels (RNA) qui permet la poursuite du PPM d'un MPV.

Notre mémoire est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les énergies renouvelables.

Dans un second temps, nous présenterons la modélisation des panneaux photovoltaïques, le principe de conversion PV, étude de ses caractéristiques électriques et le principe d'extraction du maximum de puissance dans les conditions climatiques variables.

Enfin, nous nous intéresserons aux deux méthodes de poursuite du point de puissance maximale (perturbation et observation et réseaux de neurones artificiels), et enfin dans le quatrième chapitre les résultats de simulation suivi d'une conclusion générale.

Chapitre I
Les énergies
renouvelables

I. Les énergies renouvelables

I.1. Introduction

Dans le monde, il existe diverses sources d'énergie qui peuvent être utilisées pour répondre aux nombreux besoins de la population mondiale, qui augmentent de jour en jour. Cette consommation d'énergie a amélioré le niveau de vie de la population dans les pays développés.

La question se pose alors sur les conséquences liées à l'utilisation de ces énergies, les avantages ainsi que les inconvénients de la consommation énergétique mondiale.

Tout d'abord, nous présenterons les différentes sources d'énergie utilisées ainsi que les modalités de leurs utilisations. Dans un second temps, nous aborderons les différentes techniques de certaines énergies utilisées et, enfin, nous préciserons leurs avantages et inconvénients.

I.2. La production de chaleur par les sources renouvelables

Les sources d'énergies renouvelables permettent d'abord de produire de l'énergie thermique, ainsi le bois, le biogaz, le soleil et la géothermie.

I.2.1. Thermo solaire

L'énergie solaire thermique est obtenue par la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique, autrement dit en chaleur.

Elle peut être utilisée pour chauffer des bâtiments ou l'eau domestique qui y est utilisée, grâce à des chauffe-eaux (figure (I-1)). Dans ces cas précis, son usage est qualifié de direct, ce qui signifie qu'il peut également être indirect.

En effet, l'énergie solaire thermique peut également être utilisée pour produire de la vapeur d'eau (ou d'un autre liquide) qui peut alors servir, par exemple, lorsqu'elle est sous pression, à faire tourner une turbine qui entraîne un alternateur, et donc à produire de l'énergie électrique. Ce système est notamment utilisé dans les centrales solaires thermiques.

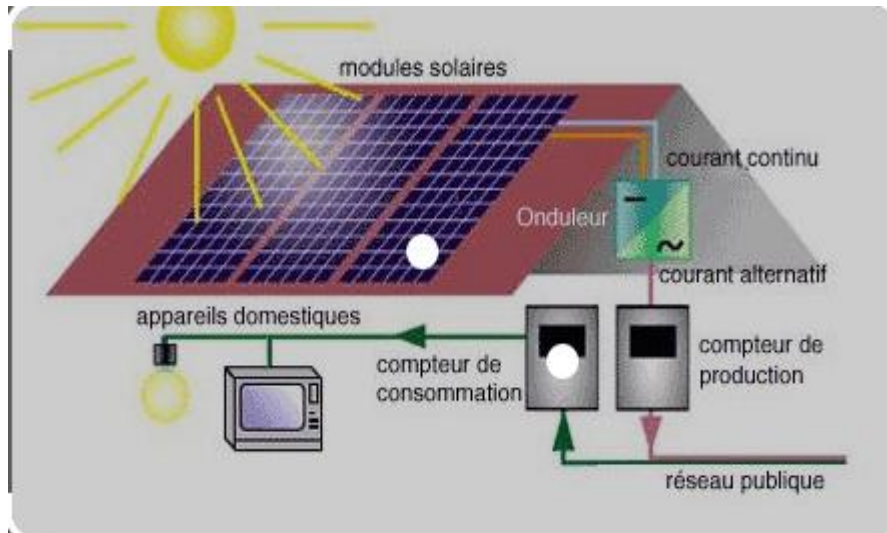


Figure (I-1) : Principe du panneau solaire thermique.

L'énergie solaire thermique se distingue de l'énergie solaire photovoltaïque, qui est obtenue par la conversion du rayonnement solaire directement en électricité [1].

I.2.2. Biomasse

La biomasse est l'ensemble de la matière organique végétale, animale, bois (figure (I - 2)), ainsi que ses produits de transformation (les déchets organiques).

L'avantage de la conversion énergétique de la biomasse, par rapport aux autres sources énergétiques renouvelables, réside dans le fait qu'en plus de la production d'énergie, elle participe activement au traitement des déchets organiques contribuant ainsi à la réduction de l'impact de nos activités sur l'environnement, réduction des émissions de CO₂, et sécurité énergétique avec source de biomasse forestière disponibles localement.

La Biomasse est utilisée dans les technologies de combustion, les chaudières à eau chaude ou encore les systèmes à vapeur basse pression afin de chauffer les plus gros bâtiments, les écoles, les hôpitaux, les bâtiments industriels ou les systèmes de chauffage urbain. Parmi les nouvelles technologies, mentionnons la gazéification et la production d'huile pyrolytique [2].



Figure (I -2) : Le bois source de l'énergie Biomasse.

I.2.3. Géothermie

La géothermie est une énergie renouvelable qui consiste à prélever la chaleur contenue dans le sol. Le but de la géothermie est d'assurer le confort thermique d'une habitation ou d'une construction en absorbant la chaleur inépuisable contenue dans le sol.

La géothermie consiste à récupérer de la chaleur venant du sous-sol, du sol ou de l'air extérieur à un bâtiment.

Leur principe de fonctionnement (figure (I-3)) se caractérise par l'exploitation de la chaleur contenue dans la croûte et les couches superficielles de la terre. Ainsi pour comprendre, il faut distinguer ces deux principes : la géothermie de surface et la géothermie profonde.

Parmi les avantages de la géothermie, économique et rentable, énergie verte et respectant l'environnement, énergie naturelle, renouvelable, inépuisable et son installation est durable et ne nécessite que peu d'entretien [3].

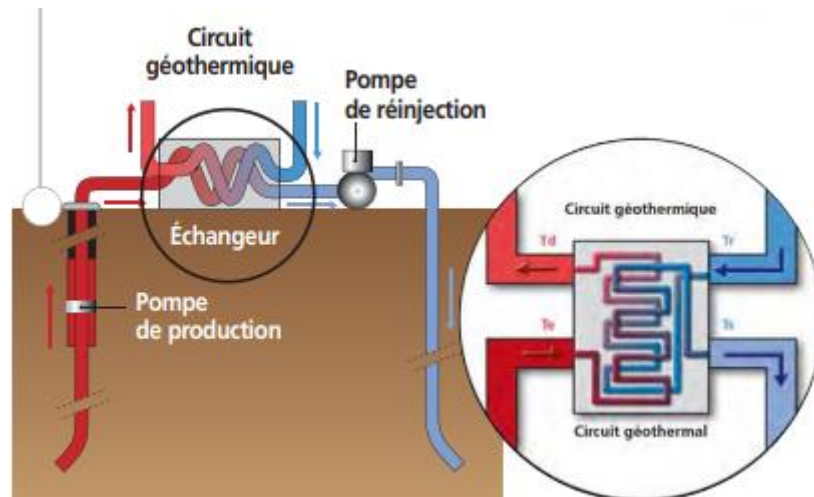


Figure (I-3) : Principe de la géothermie.

I.3. Production d'électricité par les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont en plein développement, parmi celles-ci on retrouve : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, et l'énergie hydraulique. Elles permettent de produire de l'énergie sans produire de gaz à effet de serre.

I.3.1 Hydraulique

L'énergie hydraulique concerne les centrales installées sur les continents - sur les fleuves, les rivières et les lacs. La force de l'eau en mouvement (énergie cinétique) est connue depuis longtemps. Pendant des siècles, cette énergie cinétique était utilisée pour actionner les moulins à eau afin de produire de l'énergie mécanique. L'énergie hydraulique moderne, que l'on a appelé la « houille blanche », est aujourd'hui utilisée dans des centrales pour produire de l'électricité. Une quarantaine de pays l'utilisent pour produire plus du cinquième de leur électricité [1]. La part de l'énergie hydraulique dans l'électricité mondiale est de 16,4 %, derrière le charbon et le gaz, mais devant le nucléaire [4].

Une centrale hydroélectrique est composée de 3 éléments de base :

Un barrage : son rôle est d'une part de créer une chute d'eau, d'autre part de stocker l'eau pour alimenter la centrale en toutes circonstances. En plus de la production ou du stockage d'énergie, un barrage (figure (I-4)) présente aussi un intérêt pour réguler les crues d'un cours d'eau.

Un canal : il prélève l'eau dans son milieu naturel (rivière, lac) pour alimenter le réservoir du barrage. Il peut s'agir d'un canal à ciel ouvert, d'une galerie souterraine ou d'une conduite.

Une usine : elle comprend des turbines qui tournent grâce à la chute d'eau et entraînent le générateur d'électricité, en général un alternateur.

Il y a plusieurs types de centrales hydroélectriques, Le type d'ouvrage hydroélectrique varie selon la configuration du site, du cours d'eau exploité, et aussi de l'usage qui doit en être fait :

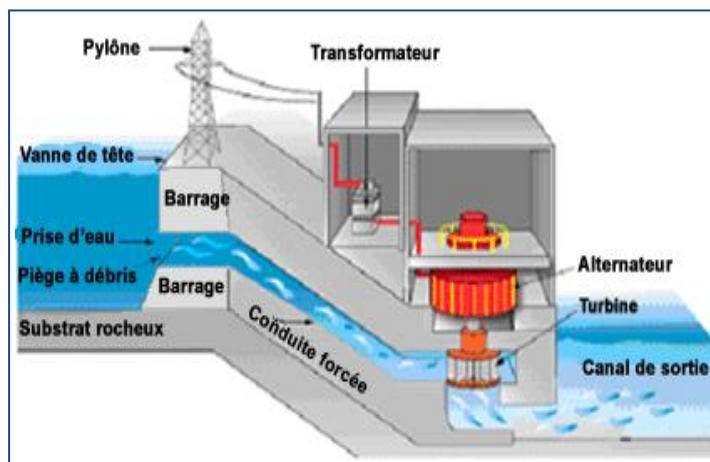


Figure (1-4) : Principe de fonctionnement d'un barrage.

Les centrales au fil de l'eau : construites le long d'un fleuve ou d'une rivière, produisent au gré des débits du cours d'eau. Avec des barrages d'une hauteur inférieure à 25 mètres, ces centrales produisent de l'électricité en continu pour répondre aux besoins quotidiens.

Les usines-écluses : ou les « usines de lac » entrent dans la catégorie de l'hydraulique modulable car elles permettent de produire de l'électricité à la demande, leurs barrages créant des retenues que l'on peut relâcher « turbiner » selon les besoins. Les « usines de lac » désignent des chutes importantes (plus de 300 mètres de haut), les « usines-écluses » se placent quant à elles entre 25 et 300 mètres.

Les STEP : (Station de transfert d'énergie par pompage) sont spécialement adaptées à cette fonction de modulation. Elles sont constituées de deux retenues d'eau

situées à des hauteurs différentes. Lorsque la demande l'exige, on « turbine » l'eau du bassin supérieur. Lorsqu'il y a un excès de production – provenant par exemple de sources éoliennes ou solaires – on utilise l'électricité en surplus pour « pomper » l'eau du bassin inférieur et la remonter dans le bassin supérieur [4].

I.3.2 Energie de la mer

La mer est un milieu riche en ressources énergétiques qui peuvent être exploitées sous différentes formes. On se focalise sur la production d'électricité via les filières suivantes :

- Énergie marémotrice.
- Énergie des vagues (holométrique).
- Énergie des courants (courants de marée et courants océaniques).
- Énergie hydrolienne.
- Énergie Thermique des Mers (ETM).

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques, entraînant des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues).

Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles rencontrent un obstacle, elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique. Les marées, qui varient en fonction de l'action de la lune sur les eaux, peuvent également produire de l'énergie (figure (I-5)).

Les barrages ou des hydroliennes installées dans les endroits fortement touchés par ce phénomène peuvent être une source de l'énergie substantielle.

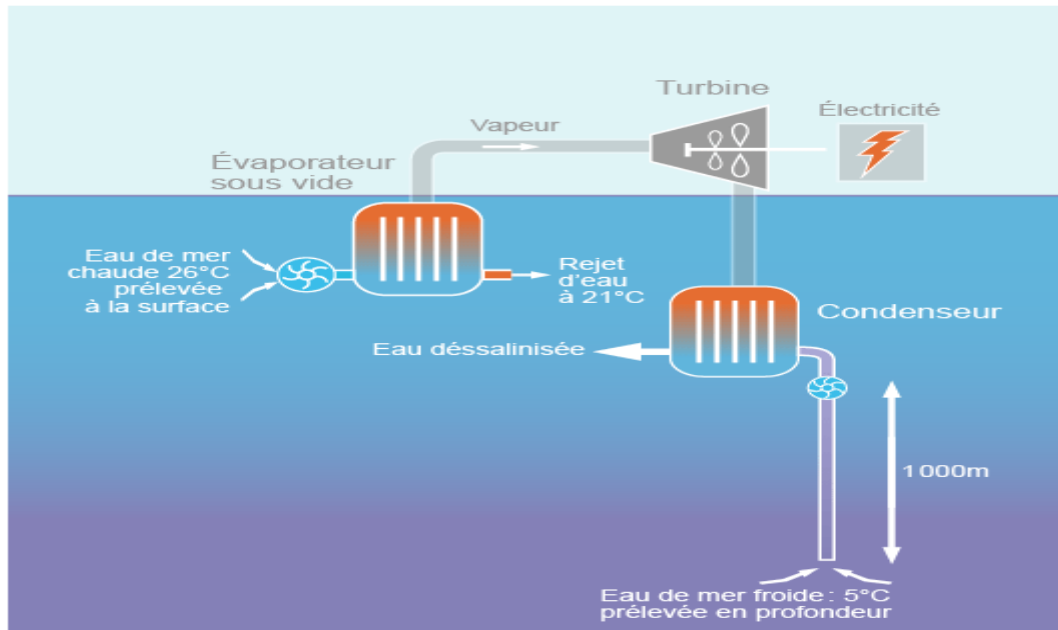


Figure (I-5) : Energie de la mer.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible.

Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées [5].

I.3.3 Éolienne

L'énergie éolienne est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies. Premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à moudre le grain ou à pomper l'eau (il s'agit du principe des moulins à vent). Il est aussi possible de rattacher l'hélice à un générateur transformant l'énergie mécanique en une énergie électrique (Figure (I-6)).

La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevé au carré, puis de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air.

Pour une production à pleine puissance, l'éolienne nécessite un apport minimal du vent d'environ 12-14 km/h et des vents de 50-60 km/h. Afin d'éviter d'abîmer l'équipement, la production doit être interrompue si les vents dépassent les 90 km/h.

Éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en:

- Énergie électrique, dans le cas d'un aérogénérateur.
- Énergie mécanique, dans le cas d'une éolienne de pompage [6].

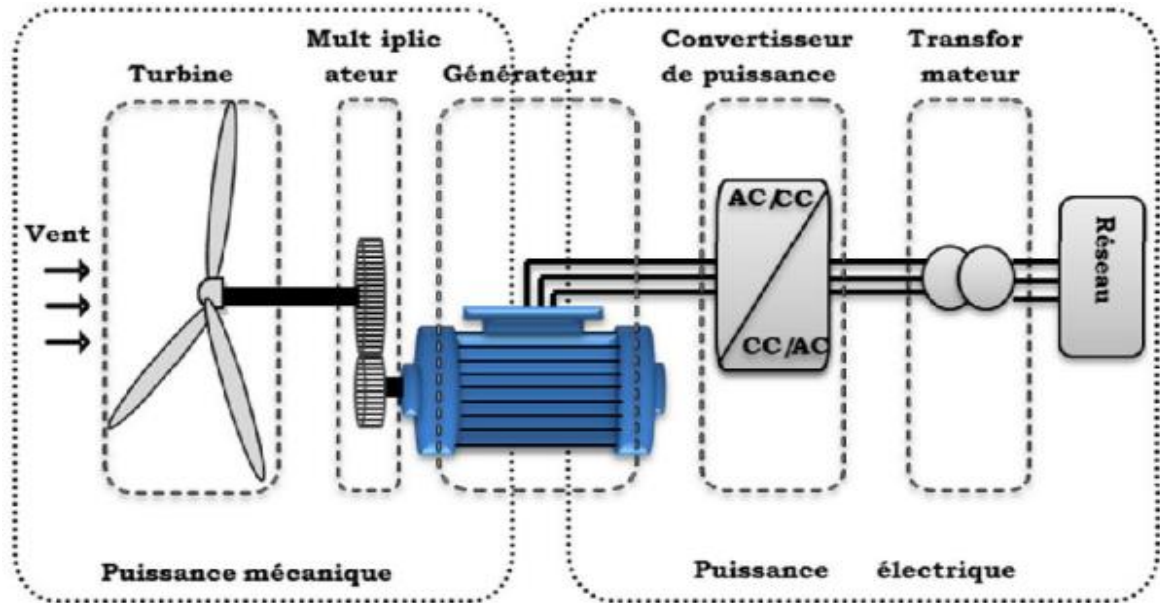


Figure (I-6) : Conversion de l'énergie éolienne.

I.3.4 Photovoltaïque

L'énergie solaire est transmise à la terre à travers l'espace sous forme de photons et de rayonnement électromagnétique. Cette énergie peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés. Comparée aux différentes formes d'énergies classiques existantes, l'énergie solaire possède les avantages suivants :

- Après avoir rentabilisé les coûts initiaux de l'installation, l'énergie solaire est pratiquement gratuite :
 - L'utilisation de l'énergie solaire remplace l'énergie fossile non propre.
 - L'utilisation de l'énergie solaire permet de diminuer de façon significative les émissions des gaz à effet de serre.
- L'énergie du soleil peut être utilisée de différentes façons en employant trois grandes Technologies soient, l'énergie solaire passive, l'énergie solaire active et l'énergie Photovoltaïque (figure (I-7)) [7].

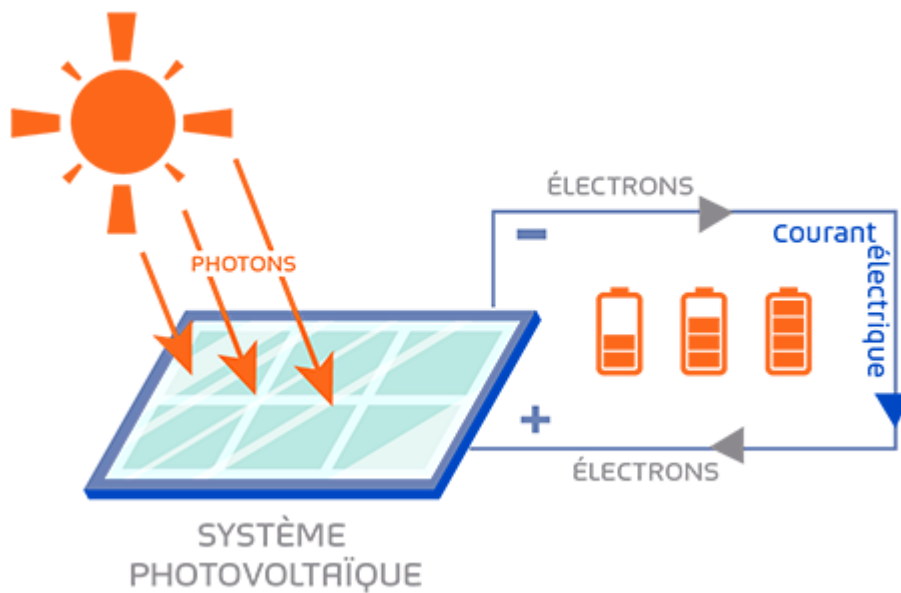


Figure (I-7) : Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque.

I.4. Modes d'exploitation d'un panneau photovoltaïque

On distingue trois modes d'exploitation d'un panneau PV : autonome, connecté au réseau et hybride [8].

Le mode autonome :

En mode autonome (figure (I-8)), le générateur photovoltaïque représente la seule source d'énergie électrique pour alimenter des récepteurs.

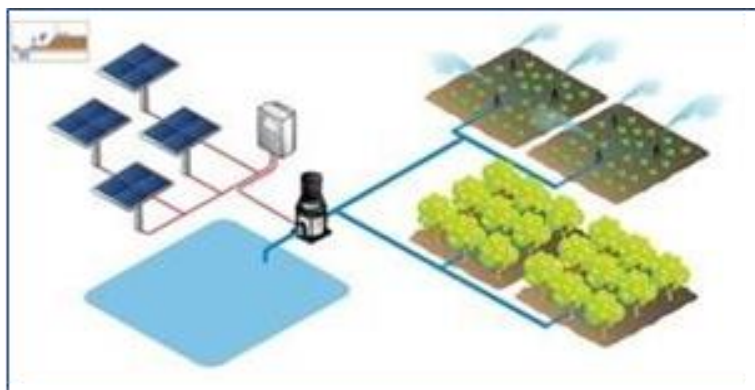


Figure (I-8) : Mode Autonome.

Ce mode adopté lorsque le réseau n'est pas disponible ou lorsque le fonctionnement des récepteurs dépend uniquement du fil de soleil (Pompage, éclairage, climatisation, chauffage...) [8].

Le mode connecté au réseau :

Dans ce mode, le panneau PV est connecté au réseau électrique (figure (I-9)). Le système photovoltaïque est muni de convertisseurs de puissance pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV. Ces convertisseurs sont composés d'un hacheur muni d'un MPPT, d'un filtre, d'un onduleur et d'une électronique appropriée pour assurer l'adaptation en amplitude et fréquence avec le réseau (accrochage au réseau) [8].

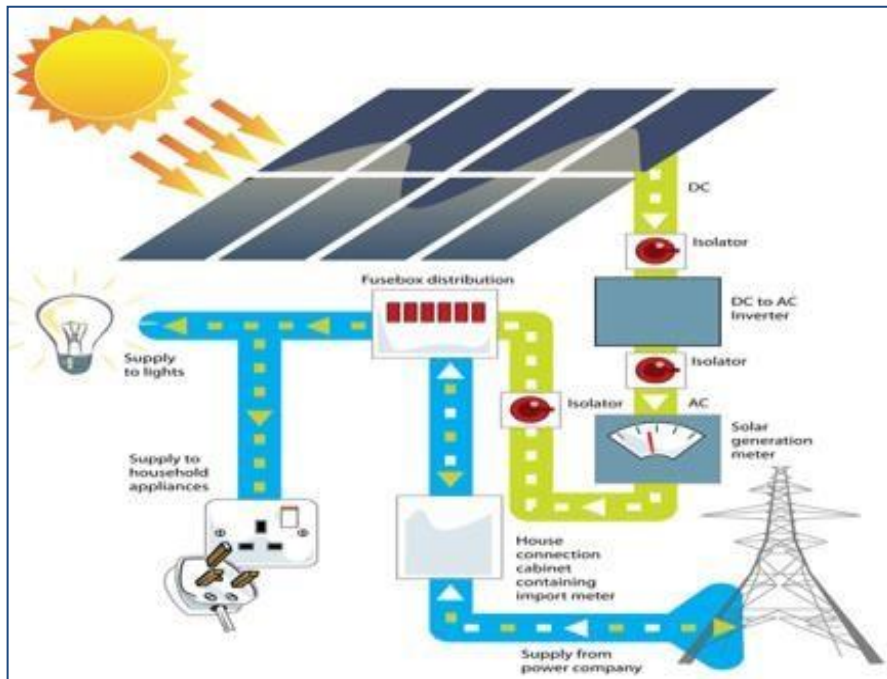


Figure (I-9) : Le mode connecté aux réseaux.

Mode hybride :

Un système d'énergie hybride comporte plus d'une source d'électricité telle que les panneaux photovoltaïques, les cellules à combustible, les générateurs éoliens, les batteries de stockage, les groupes électrogènes, etc... (figure (I-10)).

Ce type d'installation est utilisé pour l'électrification des régions loin du réseau.

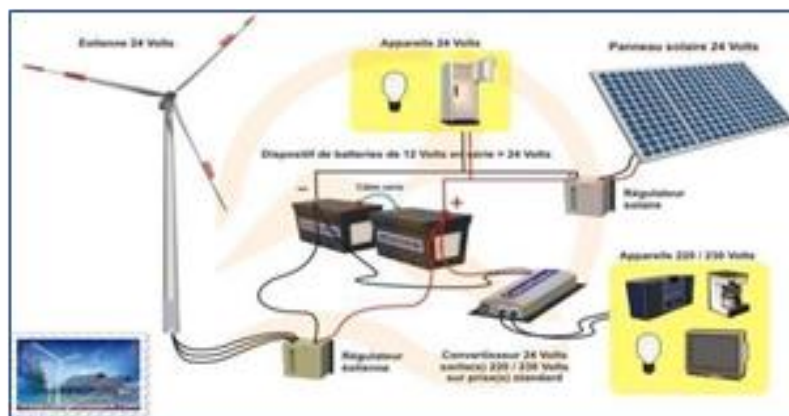


Figure (I-10) : Schéma de Branchement Mode Hybride.

Il existe plusieurs configurations de ces systèmes :

PV/thermiques, PV/batterie, PV/cellules à combustible, PV/éolienne/batterie, PV/éolienne, PV/groupe électrogène. Le choix se base essentiellement selon les caractéristiques météorologiques du site d'implantation. Les systèmes hybrides connectés au réseau ont pour but de renforcer la source principale d'électricité alimentant le réseau (le fuel).

Ils sont généralement à base de sources d'énergie renouvelables tel que les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les piles à combustibles, les batteries de stockage, les groupes électrogènes [8].

I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie

Photovoltaïque

Tout système de production d'énergie photovoltaïque à ses avantages et ses inconvénients [9].

I.5.1. Avantages de l'énergie Photovoltaïque

D'abord une haute fiabilité l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.5.2. Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

I.6. Le Potentiel Solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuelles et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de $1m^2$ est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700KWh/m^2/an$ au nord et $2263kwh/m^2/an$ au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique.

La figure suivante indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [10] [11] [12].

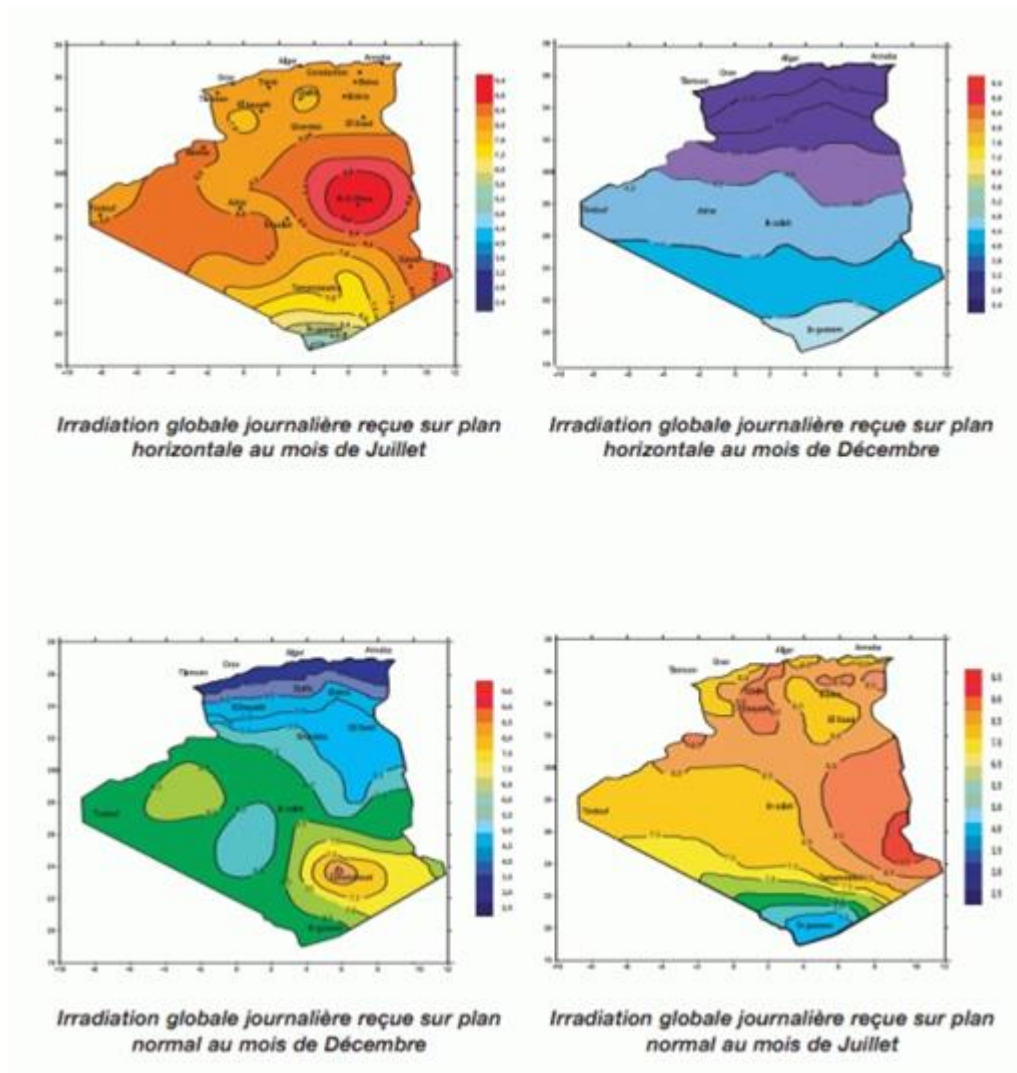


Figure (I-11) : Potentiel solaire en Algérie.

Régions	Regions cottières	Haut plateau	Sahar a
Superficies	4%	10%	86%
dire Moyne de l'enseillement (Hears /an)	2650	3000	3500
Energies Moyne recue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableaux (I-1) : Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards deGWhan.

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le panneau photovoltaïque, les autres volets solaire, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental. Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, une description générale des différentes sources d'énergie utilisées a été présentée en précisant leurs utilisations. En particulier, tous les éléments ont été introduits pour permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV. Afin de faciliter la conception, les avantages et les inconvénients des systèmes PV et le potentiel solaire en Algérie ont été également mis en évidence.

Dans la suite de notre travail, on s'intéressera de près sur l'étude du système de conversion photovoltaïque, l'effet et la modélisation des panneaux solaires.

Chapitre II

La modélisation du
système
photovoltaïque

II. Modélisation du système photovoltaïque

II.1. Introduction

Après avoir montré les différentes sources d'énergie et la production PV avec leurs avantages et leurs inconvénients, on retrouve dans ce chapitre l'étude et la modélisation du système PV.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations qui caractérisent tous les éléments du système. A ce niveau, la condition nécessaire est la connaissance des critères d'entrée (données de base), c'est-à-dire les données météorologiques sur le site, les données liées aux usages, les données liées aux équipements.

Résultats publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chaque composant du système [13] [14] [15].

Le modèle du rayonnement solaire sur un plan horizontal et un plan incliné ; Champ photoélectrique, ainsi que le modèle de la conversion (onduleur) seront présentés dans ce chapitre.

II.2. Modèles de coordonnées soleil

II.2.1. Angle solaire

Les angles solaires sont des facteurs intéressants pour le calcul de rayonnement solaire

La latitude (φ) : est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif. Nous prenons celle de Bechar [13] : $\varphi=31.63^{\circ}$ N

La longitude (λ) : représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour $56+ 0^{\circ}$. Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives. Nous prenons celle de Bechar [16] : $\lambda =2.40^{\circ}$ W

La déclinaison (ω) : est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Sa valeur varie entre $-23^{\circ}7'$ (Au solstice d'hiver) et $+23^{\circ}7'$ (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps. Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le

mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur, de demi angle au sommet = 90° . L'angle sera donc fonction du jour de l'année.

$$\omega = +23.45^\circ \cdot \sin \left(\frac{360}{365} \cdot N - 80 \right) \quad (II\ 1)$$

N est le nombre de jours de l'année compté à partir du 1er janvier, il varie de 1 à 365 ou 366 Selon l'année :

Année civile : 365 jours Année bissextile : 366 jours.

L'angle horaire du soleil (δ) : repère la position du soleil dans sa rotation journalière sur le cône d'ouverture δ . C'est l'angle entre le plan méridien passant par l'observateur et le plan méridien contenant le soleil. En principe, un jour solaire (δ variant de -180° à $+180^\circ$) correspond à 24h :

$$\delta = 15 \left(\text{heuresUTC} - 12 + \frac{\lambda}{15} \right) \quad (II\ 2)$$

La position apparente du soleil est déterminée par ses coordonnées angulaires par rapport à au plan horizontal, l'azimut et la hauteur angulaire.

L'azimut Ψ : qui est l'angle formé par projection de la direction du soleil et la direction du Sud. Il est compté positif à l'Ouest (le matin) et négatif à l'Est (le soir).

Sa valeur est obtenue lorsque le soleil se couche (suivant la hauteur angulaire du solaire, et l'inclinaison du panneau). Dans notre cas, nous écrêtons Ψ lorsque \sin passe en négatif si le panneau est horizontal (la soleil se couche), ou lorsque $|\Psi| > 45^\circ$ dans le cas où le panneau est incliné à 45° (le soleil passe derrière le panneau) :

$$\tan(\Psi) = \frac{\sin(\delta)}{\sin(\varphi) \cos(\delta) - \cos(\varphi) \sin(\omega)} \quad (II\ 3)$$

La hauteur angulaire (γ) : Qui détermine la longueur de la traversée de la l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 0° (au lever et au coucher) et maximum au zénith (midi en temps solaire vrai). Quand le sinus est négatif, c'est que le soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie dans l'année). Il faut donc écrêter cette variable

$$\sin(\gamma) = \sin(\varphi) \sin(\omega) + \cos(\varphi) \cos(\omega) \cos(\delta) \quad (II\ 4)$$

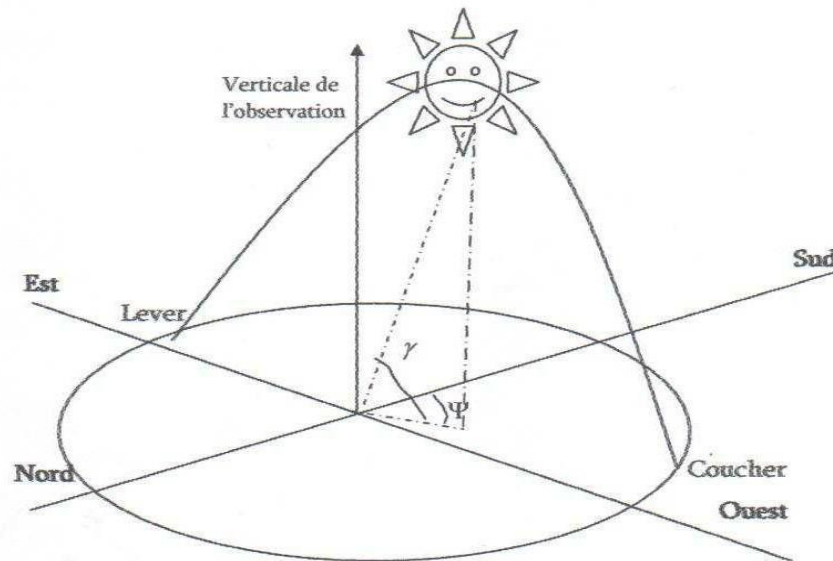


Figure (II-1): Coordonnées angulaires de soleil.

Afin d'obtenir l'angle d'incidence des rayons sur le capteur, une représentation schématique nous permet de visualiser clairement les différents angles pris en compte dans l'étude du rayonnement arrivant dans le plan d'un capteur. L'angle (γ , hauteur dans l'étude) et (Ψ , azimut) que nous venons de définir dans le positionnement horaire et spatial de soleil, sont liés directement relative du soleil par rapport à l'emplacement géographique du capteur

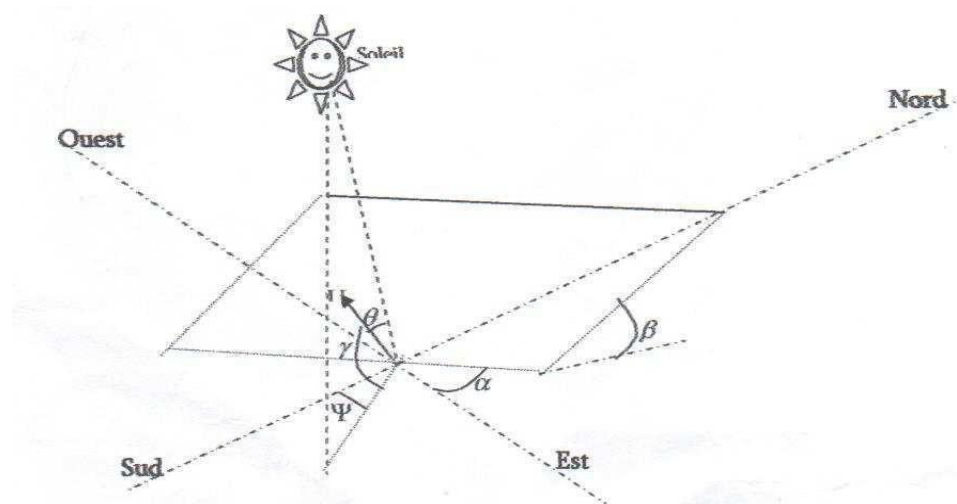


Figure (II-2): Représentation de l'éclairement d'un capteur plan incliné.

Les autres angles sont directement liés au positionnement du capteur, et permettent de corriger les pertes liées au trajet optique des rayons lors de la traversée de l'atmosphère, ils correspondent à :

L'orientation (α) : du capteur par rapport au sud, (0° au sud, 180° au nord, $+90^\circ$ à l'ouest et -90° à l'est. Dans notre cas, cette variation est mise à zéro.

L'inclinaison (β) : du capteur par rapport au sol ($0^\circ < \beta < 90^\circ$). Elle est nulle pour ce qui est du plan horizontal dans le calcul du premier angle d'incidence puis de 45° pour le second.

L'angle d'incidence (θ) : des rayons solaires par rapport à la normal au capteur.

Une relation trigonométrique permet de déterminer sa valeur en fonction des autres angles :

$$\cos(\theta) = \cos(\gamma) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\Psi - \alpha) + \sin(\gamma) \cdot \cos(\beta) \quad (II\ 5)$$

II.3. Modèle de rayonnement solaire

II.3.1. Rayonnement solaire sur un plan horizontal

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

Rayonnement direct : Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. Après des mesures pour des heures (i) nous avons l'équation statique pour le rayonnement direct [17].

$$S_H(i) = 1367 \cdot C(j) \cdot \sin\left(h(i) \cdot \exp\left(\frac{-T_L}{0,9 \times 9,41 \times M(i)}\right)\right) \quad (II\ 6)$$

Avec :

S_H : Flux direct horizontal.

$C(j)$: La correction de la distance terre soleil.

$h(i)$: Hauteur du soleil.

T_L : Facteur de trouble.

$M(i)$: Nombre d'aire masse.

Rayonnement diffus : C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersion), dans l'atmosphère. Pour un observateur le rayonnement diffus (D) par heure i est statistiquement donné par [17].

$$D_H(i) = \frac{1367}{3} \cdot C(j) - \text{Sin}[h(i) - 2] \cdot \exp\left[-0.5 \cdot \log^2\left(\frac{T_c}{22 \cdot M(i)^{-0.65}}\right)\right] \quad (II\ 7)$$

Rayonnement réfléchi : C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo (ξ)

$$0 \leq \xi \leq 1$$

Rayonnement global (ϕ_G) : un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi :

$$\phi_G = S + D + R \quad (II\ 8)$$

II.3.2. Rayonnement solaire sur un plan incliné

Une surface inclinée par rapport à l'horizontale avec l'angle B reçoit une puissance énergétique répartie entre le direct, le diffus, et le réfléchi [17].

Rayonnement direct :

Soit un lieu de latitude, le flux est défini par :

$$R_b = \frac{S_B}{S_H} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)} \quad (II\ 9)$$

R_b : Rapport de flux direct

S_B : Flux direct pour un plan d'inclinaison

S_H : Flux direct horizontale

ω : Déclinaison du soleil.

δ : Angle horaire du soleil.

Alors le flux direct pour le plan incliné B

$$S_B = R_b \cdot S_H$$

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)} \cdot S_H \quad (II\ 10)$$

Rayonnement diffus : Le flux à une inclinaison B et l'aptitude φ capté par une surface orientée face au Sud-Est donné par le modèle suivant :

Pour l'heure i : utilisons le modèle « WILLMOTT »

$$D_b = D_H \cdot \left[F(i) \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} + (1 - F(i)) \cdot \frac{\cos\theta(i)}{\sinh \sinh(i)} \right] \quad (II\ 11)$$

Avec

$$F(i) = 1 - K_T(i) \left[1 - \frac{S_H}{G_H} \right] \quad (II\ 12)$$

$$K_T(i) = \frac{[\theta_{GH}]}{\theta(i)}$$

$K_T(i)$: Coefficient de sérénité

$\theta(i)$ Angle d'incidence du rayon direct par rapport au incliné.

Rayonnement réfléchi : la fraction du flux réfléchi par le sol sur la surface inclinée est proportionnelle au flux global horizontal.

$$R_B = \phi_{GH} \cdot \left[\xi \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2} \right] \quad (II\ 13)$$

Avec

ϕ_{GH} : Flux global horizontal.

ξ : Albédo du sol

Rayonnement global incliné : il est la superposition des flux direct, réfléchi et refus dont il est la somme des trois composantes :

$$\phi_{GH} = S_B + D_\beta + R_B$$

On peut calculer le flux solaire global par la relation suivante pour un plan incliné d'angle B

$$\phi_{GH} = R \cdot \phi_{GH}$$

R : Rapport du flux global.

D'où

$$R = \frac{\phi_{GH}}{\phi_{Gh}} = \left(1 - \frac{D_H}{\phi_{GH}}\right) \cdot R_b + \frac{D_H}{\phi_{GH}} \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \xi \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (II \ 14)$$

Avec :

R_b : Rapport du flux direct

En connaissant le flux global et les composantes du flux pour un plan horizontal on peut déterminer le flux global incliné reçu par un plan :

$$\phi_G = R \cdot \phi_{GH}$$

II.4. Modélisation du champ photovoltaïque

Nous avons utilisé le modèle électrique de littérature de Kaiser et Reiser [18]. La figure suivante (figure II-3) représente le modèle électrique d'une cellule solaire qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une ou deux diodes en parallèle et une résistance série R_s . La première diode D1 décrit les propriétés de semi-conducteur de la cellule et la seconde D2 modélise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge.

Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante) [19].

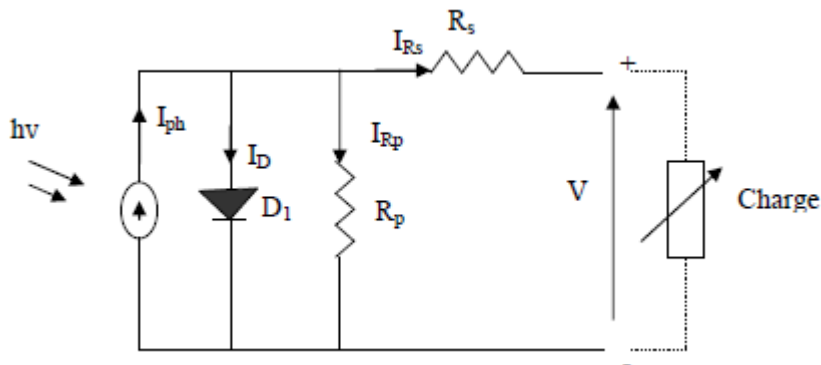


Figure (II-3): Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

L'intensité I en fonction de la tension V aux bornes d'une cellule est [20]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \exp (C_1 (V + R_s I) - 1) \right] - \frac{V + R_s I}{R_s} \quad (II \ 15)$$

$$\text{Avec : } C1 = \frac{q}{A.K.T_c}$$

A : le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$).

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I_0 : courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction p - n de la cellule.

R_{sh} : Résistances shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

q: la charge de l'électron ($1,6.10^{-19}$ C)

K : constant de Boltzmann ($1,38.10^{-23}$ J/K).

T_c : température de jonction (K).

Un bilan électrique sur le schéma (II-1) permet de calculer l'intensité I en fonction de la tension V aux bornes d'un module PV [20] :

$$I_{module} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{NAKT_j} (V + R_{se}I) - 1 \right) \right] - \frac{V + R_{se}I}{R_{pe}} \quad (II - 16)$$

$$R_{se} = N . R_s \quad \text{et} \quad R_{pe} = N . R_p$$

Le calcul de la géométrie optimale du champ photovoltaïque consiste à modifier les configurations des associations de série des modules PV de façon à faire fonctionner la charge dans la zone de puissance maximale. Un calcul de la géométrie optimale du champ photovoltaïque doit effectuer à chaque changement du point de fonctionnement dû aux variations des conditions météorologiques. Pour atteindre les valeurs nominales requises pour un fonctionnement optimal, il faut brancher les modules PV selon la relative à un groupement mixte formé de la mise en série de N modules et M en parallèle [21] figure (II-4). On obtient dans ce cas :

$$I_g = M . I_{module} \quad \text{et} \quad V_g = N . V_{module}$$

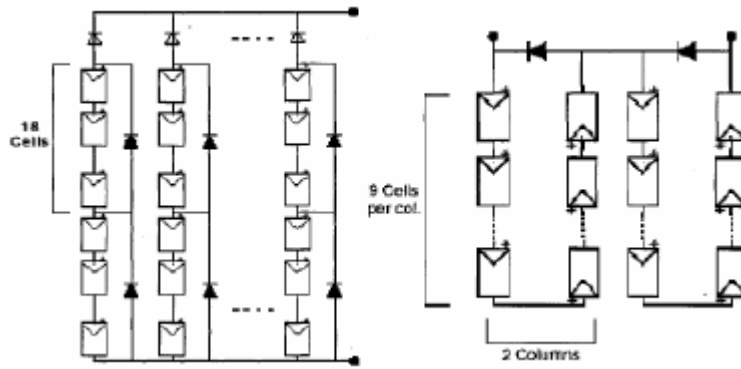


Figure (II-4): Configurations des associations série parallèle des modules PV.

En pratique la résistance shunt (parallèle) est très grande, à partir de ça le terme

$$\frac{V+R_s}{R_{sh}} \rightarrow 0$$

La relation du courant lié à une tension

$$I = M \cdot I_{ph} - M \cdot I_0 [\exp(C_2 \cdot (V \cdot M + N \cdot R_{se} I) - 1)] - \frac{V + R_{se} I}{R_{pe}} \quad (II - 17)$$

$$C_2 = \frac{C_1}{M \cdot N}$$

Cette relation est vraie si toutes les cellules solaires constituant le générateur sont identiques.

Tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert est déterminée pour un courant de sortie nul (I=0) on peut déduire :

$$V_{co} = \frac{I}{M \cdot C_2} \cdot \text{Log} \left[\frac{I_{cc} + I_0}{I_0} \right] \quad (II - 18)$$

Courant de court-circuit :

Lorsque le générateur PV est en court-circuit, la tension de sortie devient nulle (V=0) et le courant du court-circuit est considéré égale à la photo courant I_{ph}

$$I_{ph} = I_0 \cdot \exp(C_2 M \cdot R_s \cdot I_{cc}) + \frac{I_{cc}}{M} - I_0 \quad (II - 19)$$

II.4.1. Modèle de la température

Température de jonction :

La température de la jonction T_c de la cellule est donnée par la relation suivant [22]

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} E_G \quad (II - 20)$$

Avec NOCT : la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature).

Variation du courant de saturation :

Le courant de saturation I_0 dépend de la température de jonction et peut être exprimé par la relation suivante [23].

$$I_0 = A_0 \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{K \cdot T_c}\right) \quad (II - 22)$$

Pour le silicium monocristallin $A = 2.110.10^3$

Variation du courant court-circuit :

La variation de courant de court-circuit I_{cc} dépend de la température de jonction, de ce fait elle est représentée par la relation empirique suivante [23]

$$I_{cc} = K_1 \cdot G \cdot [1 + K_2 (G - G_0) + K_3 (T_c - T_0)] \quad (II - 23)$$

Avec :

G_0 : L'éclairement de référence (1000 w/m²)

T_0 : La température de référence (298 K)

K_1 , K_2 et K_3 sont des constantes dépendant de la nature de matériau de la cellule et déterminées expérimentalement par le constructeur.

Variation de la tension à circuit ouvert :

La variation de la tension de circuit ouvert dépend de la température du module et de L'éclairement, elle donnée par l'équation suivant [23] :

$$V_{co} = V_{coo} + \beta \cdot \Delta T + \alpha (G - G_0) \quad (II - 24)$$

Avec :

V_{coo} : La tension à circuit ouvert de référence (V).

α : Coefficient de variation de courant à circuit ouvert en fonction de la température (A/°C).

β : Coefficient de variation de la tension de court circuit en fonction de la température (V/°C).

ΔT : la variation de la température (°C).

II.5. Caractéristiques électriques des modules photovoltaïques

Il existe plusieurs indicateurs permettant de mesurer les performances des modules PV. La puissance crête (W_c) est un des indicateurs les plus significatifs, elle représente la puissance électrique maximale que le panneau peut fournir dans les conditions de mesures normalisées, c'est-à-dire lorsqu'il est connecté à une charge, lorsque la température à la jonction des cellules est de 25 °C et lorsqu'il reçoit du soleil à une puissance de 1000W/m² (ceci correspond approximativement à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil le midi par temps clair).

La caractéristique courant-tension ($I=f(V)$) illustre la variation du courant de sortie en fonction de la tension de sortie. Elle représente aussi un indicateur important permettant de mesurer les performances des modules PV. A partir de cette caractéristique on peut tracer la caractéristique puissance-tension ($P=f(V)$).

Les conditions idéales conventionnelles sont très rarement remplies dans la pratique, et la variation de ces conditions est aléatoire et imprévisible.

Le changement de l'ensoleillement et de la température influe directement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension [24].

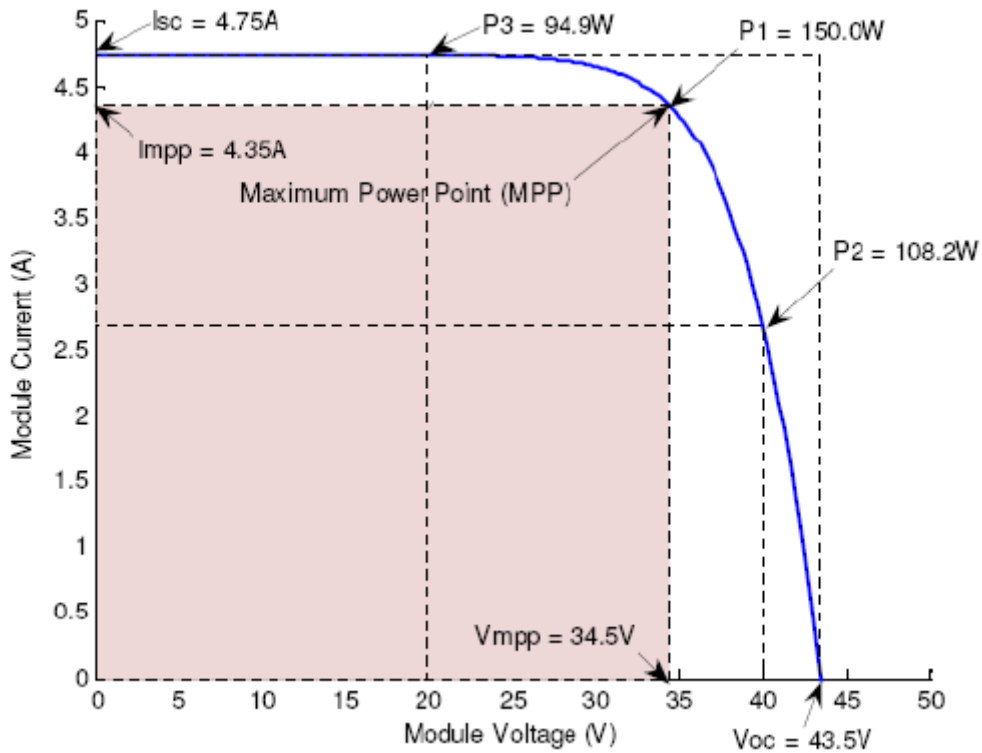


Figure (II-5): Caractéristique I/V d'un module PV.

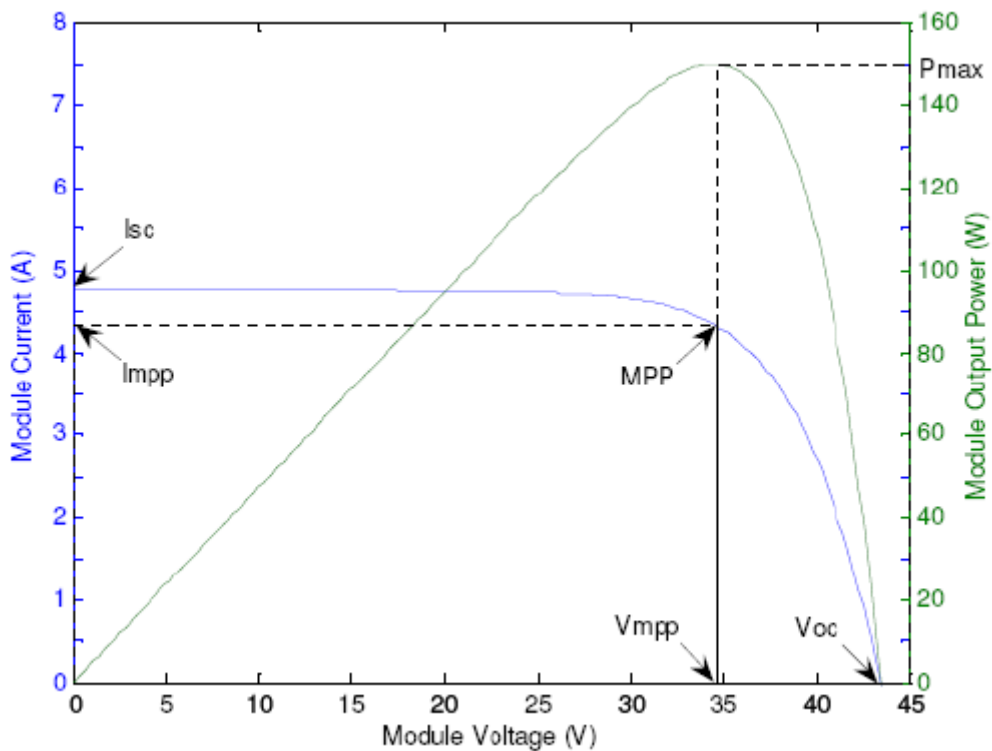


Figure (II-6): Courbe de puissance d'un module PV.

II.5.1. Influence de l'éclairement et de température

➤ Influence de l'éclairement

Les figures II-7 et II-8 représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante.

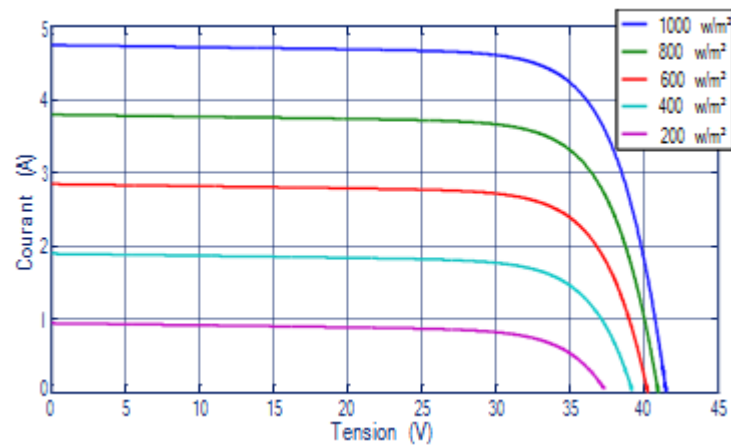


Figure (II-7): Effet de l'éclairement sur la caractéristique I(V).

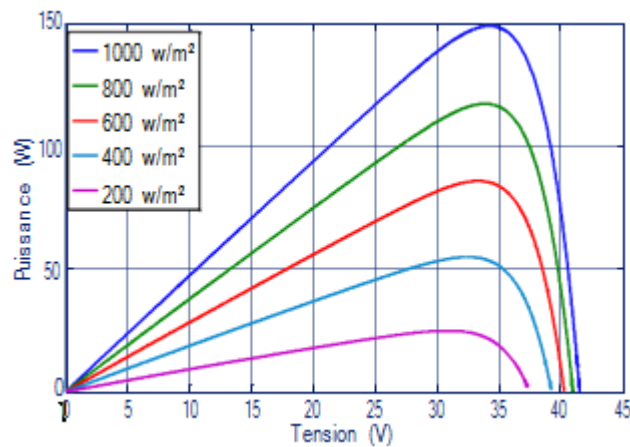


Figure (II-8) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

On constate que les fortes variations du niveau d'éclairement provoquent des variations relativement importantes du courant optimal. Contrairement à la tension, qui varie très peu en fonction de l'éclairement (figure II-7), par conséquent la variation du point de puissance maximale (PPM) est proportionnelle à l'éclairement (figure II-8).

➤ Influence de la température

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Les figures II-9 et II-10 donnent l'allure générale des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de températures et un éclairement constant.

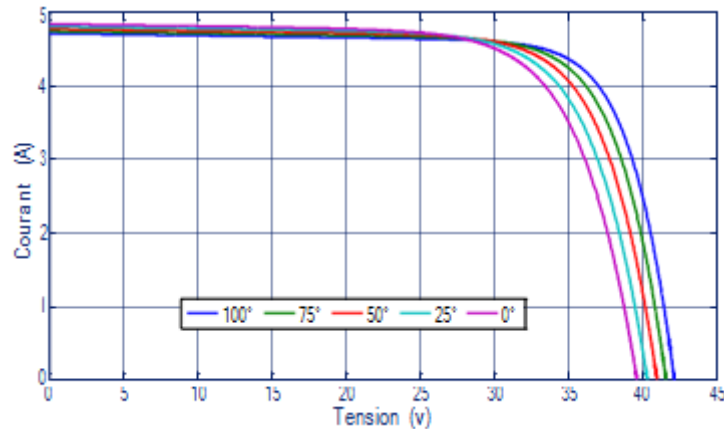


Figure (II-9) Effet de la température sur la caractéristique I(V).

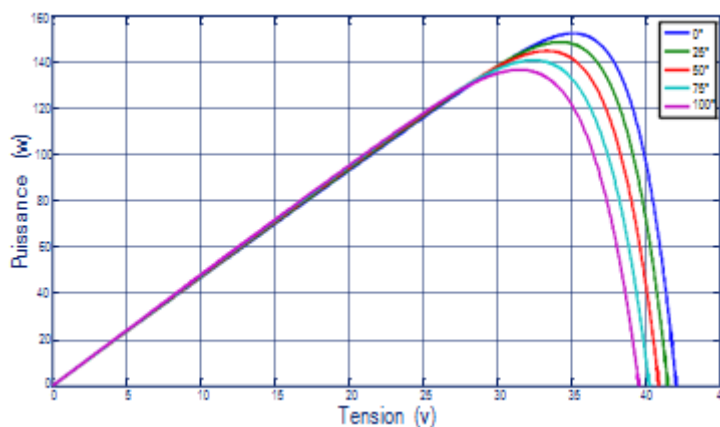


Figure (II-10) : Effet de la température sur la caractéristique P(V).

On remarque, que lorsque la température augmente, la courante photo générée augmente alors que la tension de circuit ouvert diminue considérablement.

II.6. Effet de l'ombrage

Dans cette partie, nous tenterons de simuler l'effet de l'ombrage partiel sur les deux types d'association série et parallèle.

Les figures II-11, II-12, II-13, représentent les résultats obtenus dans le cas d'une association en série.

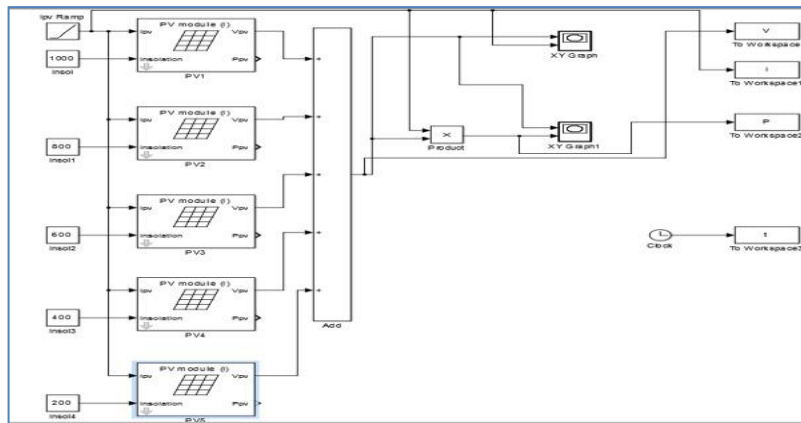


Figure (II-11) : Simulation de l’ombrage dans le cas d’une association de modules photovoltaïques en série.

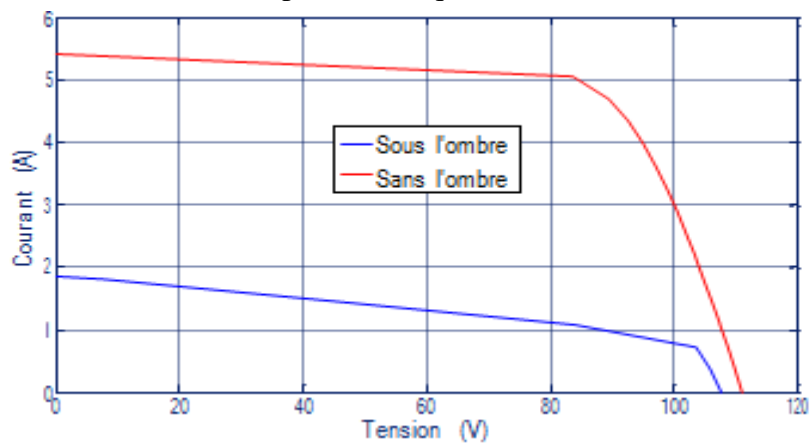


Figure (II-12) : Caractéristique $i(v)$ sous ombrage et sans ombrage (association série).

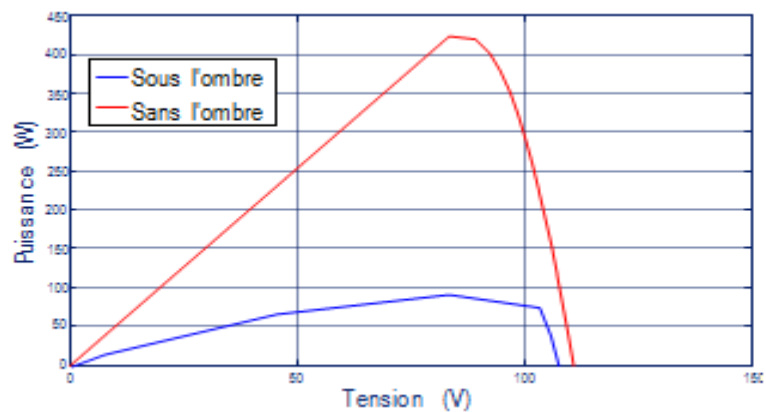


Figure (II-13) : Caractéristique $p(v)$ sous ombrage et sans ombrage.

Tandis que les figures II-14, II-15, II-16, représentent les résultats dans le cas d’une association en parallèle.

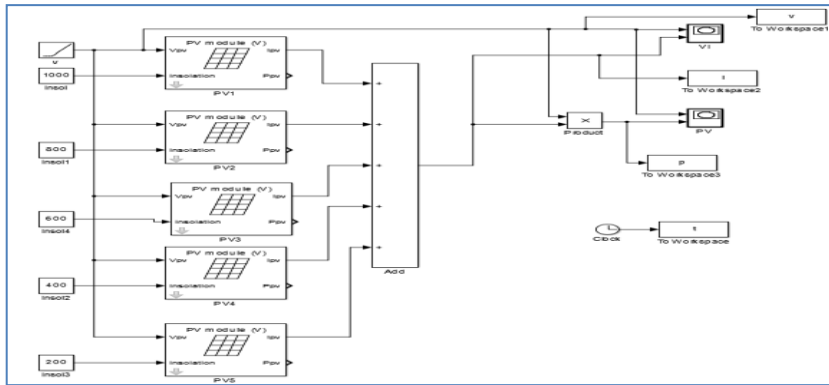


Figure (II-14) : Simulation de l’ombrage dans le cas d’une association de modules photovoltaïques en parallèle.

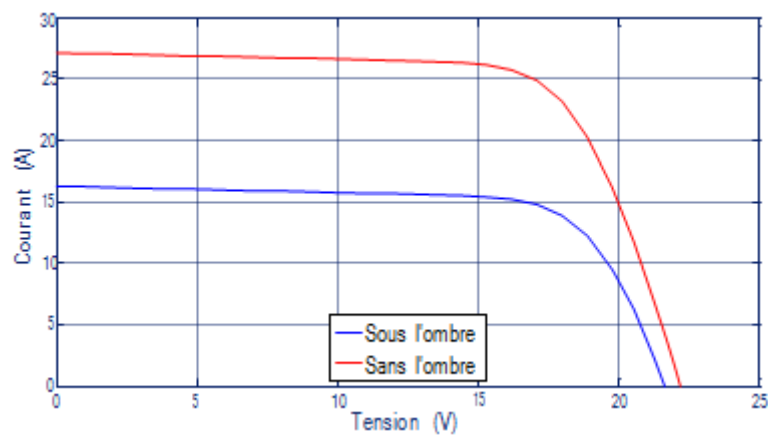


Figure (II-15) : Caractéristique $i(v)$ sous ombrage et sans ombrage.

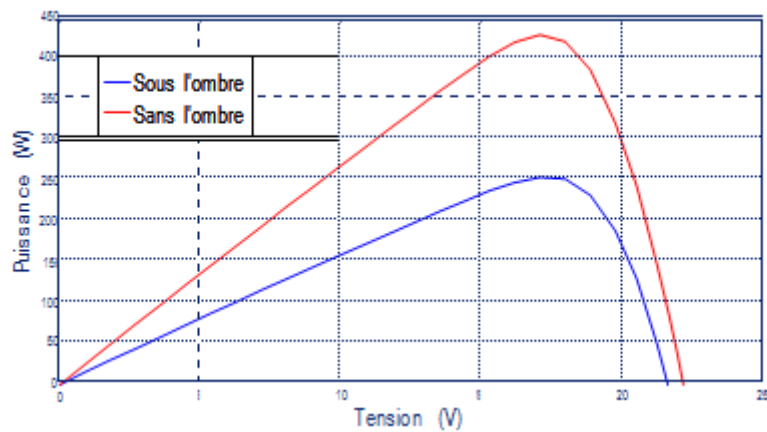


Figure (II-16) : Caractéristique $p(v)$ sous ombrage et sans ombrage.

II.7. Modélisation du système de conversion

L’onduleur est un dispositif de conversion, il est important de connaître la relation liant la puissance à la l’onduleur à celle entrante.

Cette caractéristique est représentée par la fonction [25] :

$$\eta_0 = f(P_{ch}) \quad \text{ou encore} \quad \eta_0 = f(\text{taux de charge})$$

La charge étant alimentée en courant alternatif, un onduleur est donc présent entre le bus continu et la charge. Il existe diverses équations pour définir le rendement d'un onduleur en fonction de la puissance délivrée.

L'onduleur est considéré comme un dispositif de transformation en énergie alternative, d'une énergie de type continu provenant soit du système de stockage, soit directement de champ PV. De tels dispositifs devraient délivrer une tension alternative à fréquence déterminée c'est-à-dire le signal généré par ce dernier doit être le plus sinusoïdal possible. Ces onduleurs sont largement utilisés, mais les appareils existant ont l'inconvénient majeur de présenter des pertes, à vide ou à faible charge, très élevées, leur rendement n'est donc acceptable qu'à pleine charge.

L'onduleur monophasé est caractérisé par son rendement en fonction de la puissance fournie à l'utilisation. Le modèle de rendement se traduit par la relation empirique suivante [26] :

$$\eta_{Ond} = a \cdot (1 - \exp(b \cdot \tau)) \quad (II - 34)$$

Où :

a et b sont des constantes (a = 0,9559 ; b = -609164)

τ : Taux de charge, donnée par : $\tau = \frac{P_{ch}}{P_n}$

P_n : Puissance nominale de l'onduleur.

P_{ch} : Puissance à la sortie de l'onduleur.

La variation du rendement de l'onduleur en fonction de taux de charge est représentée sur la figure suivante:

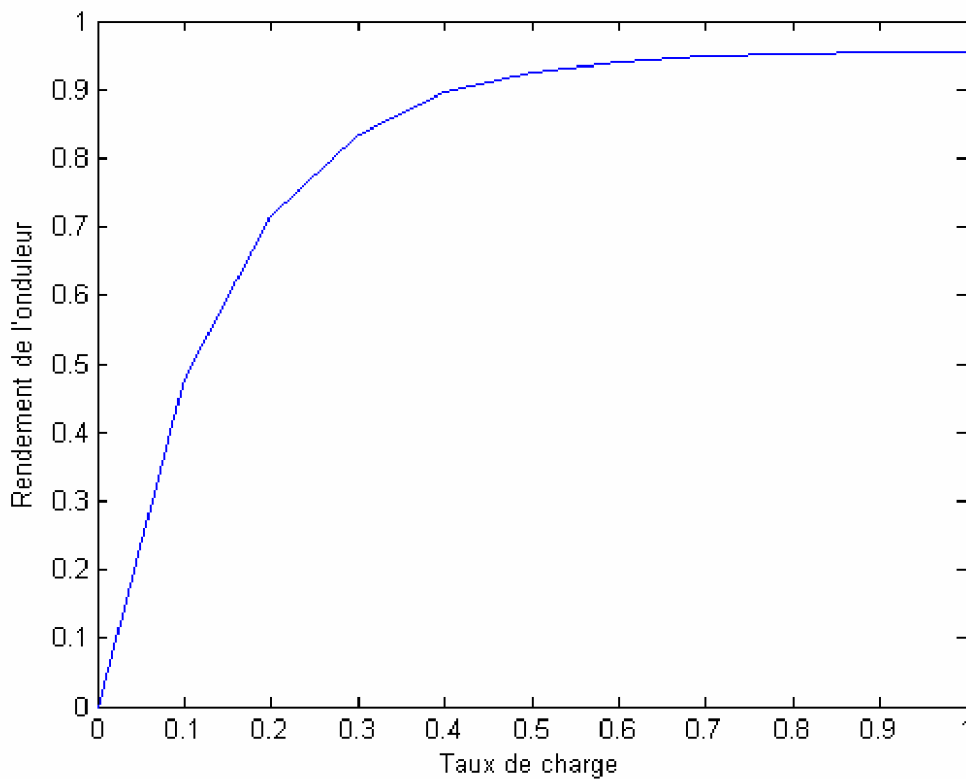


Figure (II-17) : Rendement de l'onduleur.

Nous verrons par la suite que le choix de la puissance nominale de l'onduleur en fonction de son application est primordial si l'on veut éviter des pertes énergétiques importantes.

II.8. Conclusion

La modélisation de chaque composant du système PV complet a été développée à partir de modèles de la littérature (champ PV, transformateur,) ; Cette modélisation est une étape essentielle et permet de saisir un certain nombre de modèles puis d'évaluer les propriétés du module PV.

La mise en œuvre du modèle dans un environnement simulé adapté permet d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

Dans la continuité du travail, la méthode d'extraction de puissance maximale (MPPT) sera détaillée dans le prochain chapitre en utilisant la méthode P&O et les réseaux de neurones.

Chapitre III

Analyse de MPPT
(P&O) et Les réseaux
de neurones

Analyse de MPPT (P&O) et Les réseaux de neurones

0.1.Introduction

À l'heure actuelle, le photovoltaïque (PV) a suscité beaucoup d'intérêt en tant que source d'énergie secondaire. En raison des caractéristiques non linéaires et de la faible efficacité des réseaux photovoltaïques, le suivi du point de puissance maximale (MPP) d'un réseau photovoltaïque est une partie essentielle d'un système photovoltaïque. La Perturbation et observation est l'une des méthodes MPPT les plus couramment utilisées pour sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre [27, 28-29].

0.2. Extraction de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïque. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 dates de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient par leur complexité, le nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, le coût, le rendement et le domaine d'application.

0.3.Principe de MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). [6]

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (III-1).

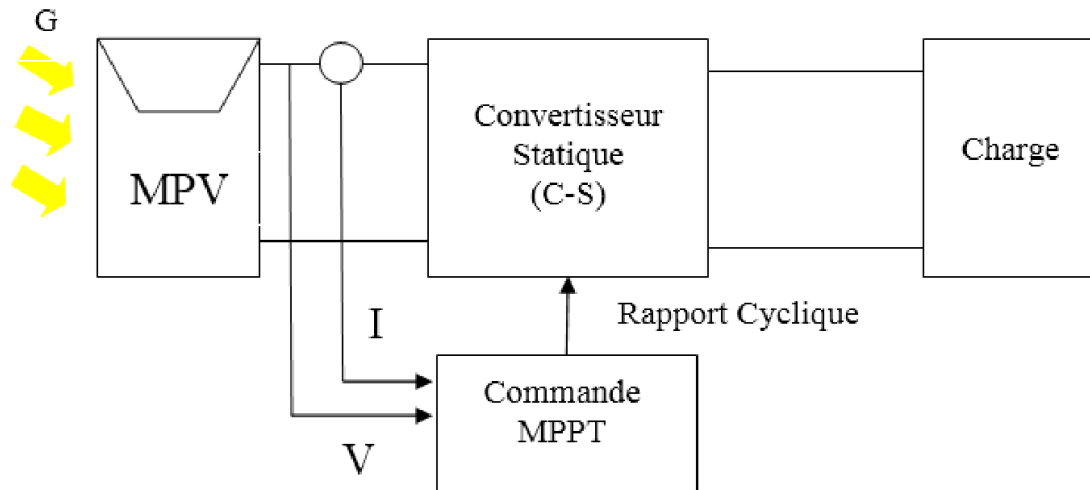


Figure (III-1) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

0.3.1. Principe des techniques "Incrément de conductance" (Inc.CoN)

Dans cette partie, pour alléger les notations, on note V , I , P les grandeurs relatives au générateur photovoltaïque

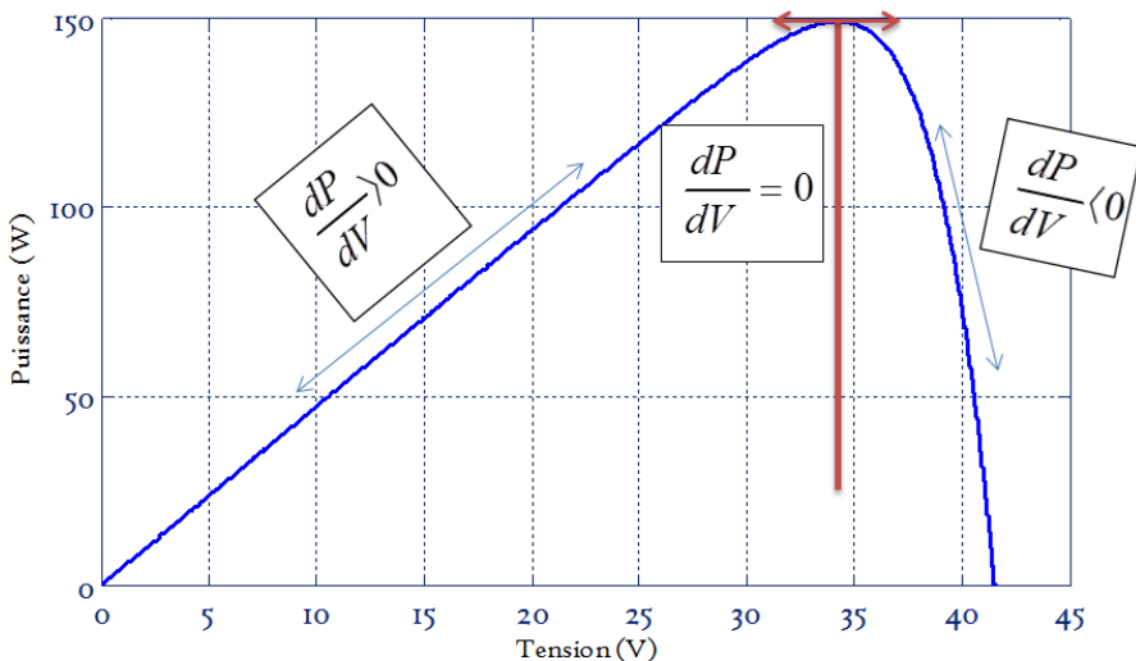


Figure (III-2) : Signe de $\frac{dP}{dV}$ pour différentes zones de fonctionnement.

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = VI$$

Sa dérivée partielle $\frac{dP}{dV}$ est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV}$$

$$\frac{1dP}{VdV} = I + \frac{dI}{dV}$$

Si le point opérationnel est au PPM :

$$I + V \frac{dI}{dV} = 0$$

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{I}{V}$$

Si le point opérationnel est au côté gauche du PPM :

$$I + V \frac{dI}{dV} > 0$$

$$\frac{dI}{dV} > - \frac{I}{V}$$

Si le point opérationnel est au côté droit du PPM :

$$I + V \frac{dI}{dV} < 0$$

$$\frac{dI}{dV} < - \frac{I}{V}$$

On remarque que la partie gauche des équations représente la conductance incrémentale du module PV, et la partie droite des équations représente la conductance instantanée. Pour éviter que la différentielle dV de la tension du panneau ne devienne nulle, lorsque le MPP. Est atteint dans les précédents cycles ou par une stabilisation du point de fonctionnement, ce qui conduirait à une division par zéro, l'algorithme fait un test sur dV . S'il est nul il teste si le $dI = 0$ Si c'est le cas alors le PPM est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme teste le signe de dI pour déterminer la position du PPM et ajuster la tension de référence correspondante. La figure (III-2) donne l'organigramme de cet algorithme.

L'avantage de cet algorithme est qu'il n'oscille pas autour du MPP, à cause du test de $dI = 0$. L'algorithme se stabilise une fois le PPM atteint et le signe de dI donne la vraie direction à emprunter pour la poursuite du PPM une fois le système stable, ce qui conduit à une réponse rapide du système pour des changements brusques des conditions atmosphériques.

Mais à cause de l'approximation des dérivées dV et dI et l'utilisation d'un pas d'action constant, la condition $I/V = -dI/dV$ est rarement vraie ce qui conduit à des oscillations autour du PPM.

Pour remédier à ce problème une erreur marginale ε est ajoutée aux conditions du MPP, c'est à dire que le MPP est atteint si $\left| \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \right| \leq \varepsilon$ la valeur de ε est limitée entre le problème non fonctionnement dans le MPP, exact et le problème de l'amplitude des oscillations. [30]

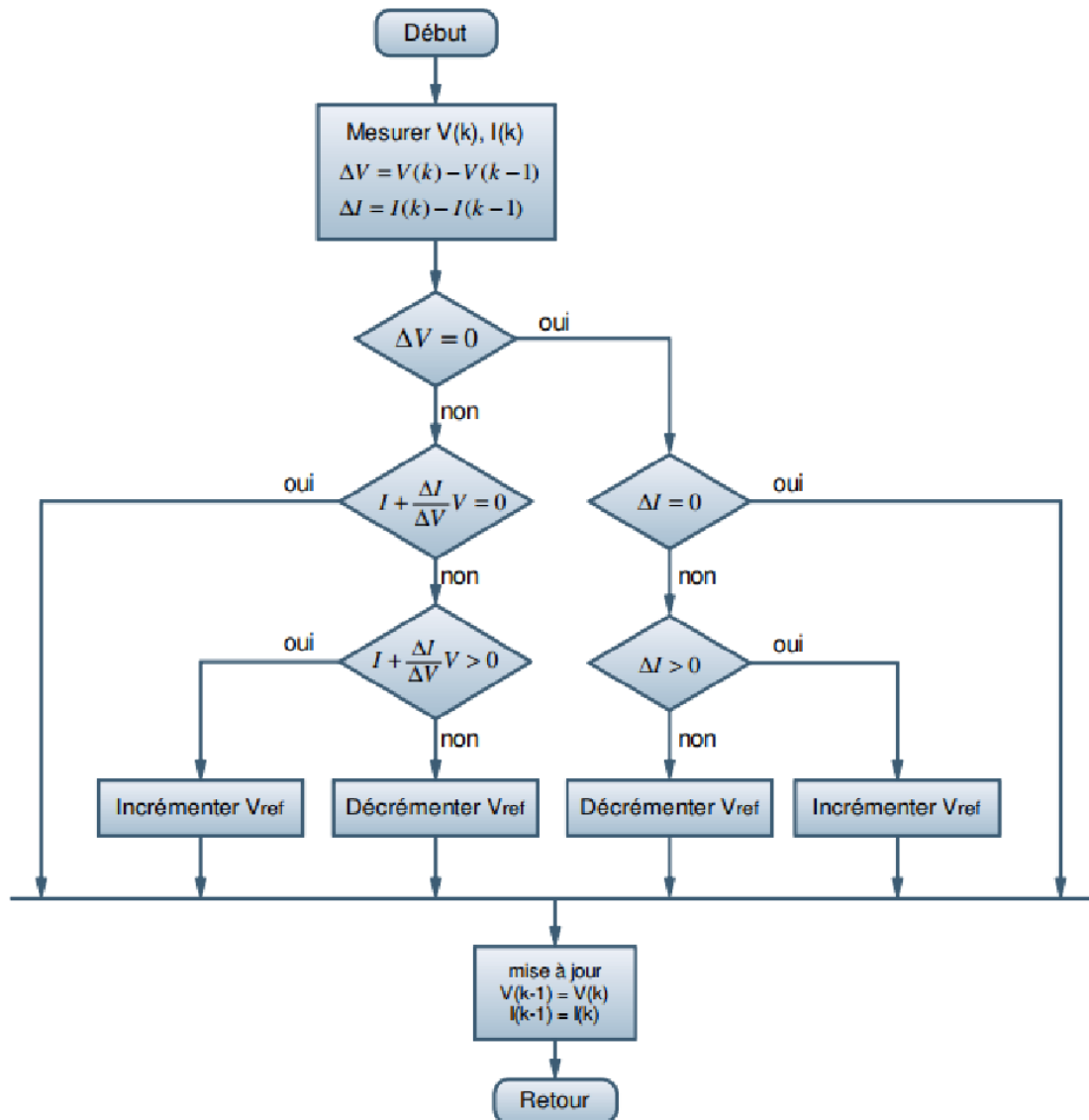


Figure (III-3) : organigramme de l'algorithme Cond-Inc.

0.3.2. Principe des techniques "Perturba and Observe" (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension VPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte ainsi, on peut déduire que si une incrémentation positive de la

tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV (VPV), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PPV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

La figure (III-4) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension [31]. Dans cette méthode, la tension du réseau est légèrement perturbée (augmentation ou diminution), puis la valeur réelle de la puissance $P(k)$ est comparée à la valeur $P(k)$ obtenue précédemment.

À la valeur obtenue précédemment $P(k-1)$. Si la puissance du panneau est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante sera faite dans la même direction.

Si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est faite dans la direction opposée. Le site L'organigramme de la méthode de perturbation.

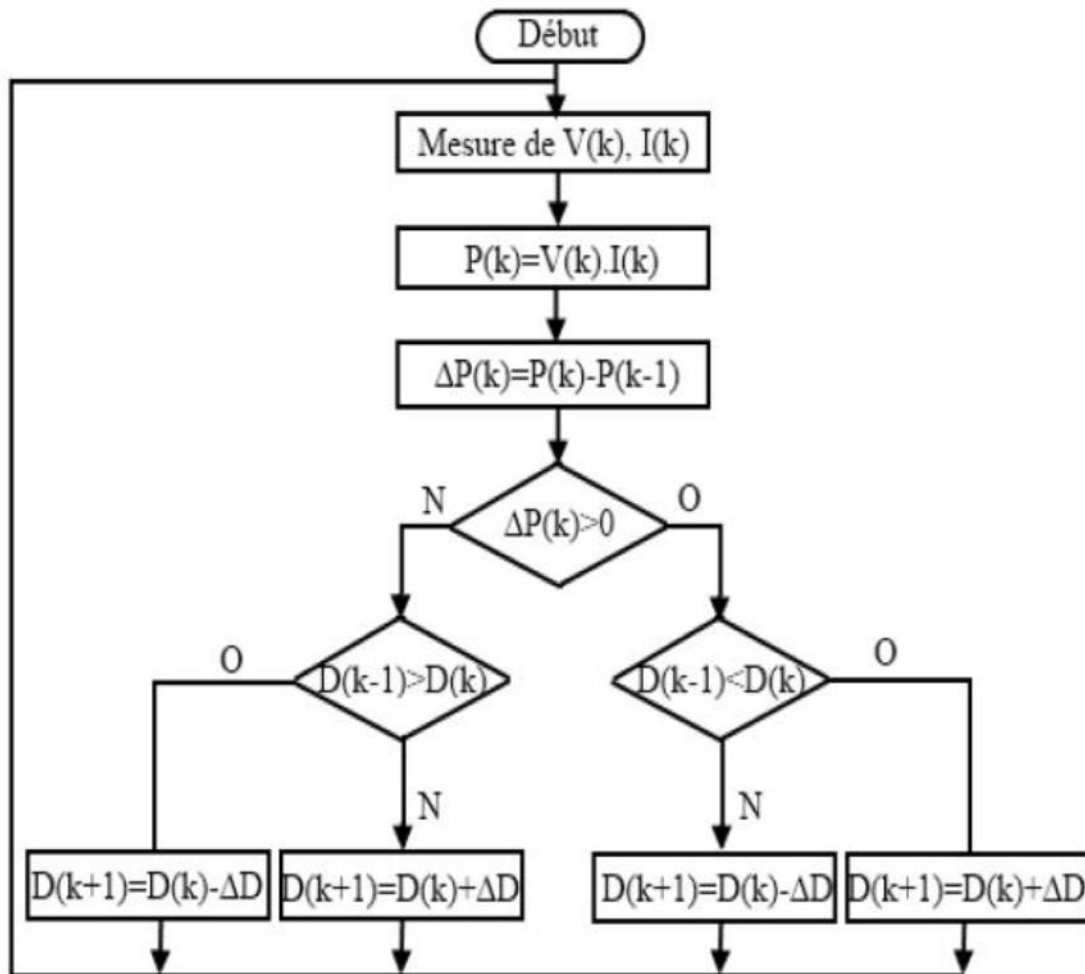


Figure (III-4) : Algorithme MPPT perturbation and observation (P&O).

0.4. Les réseaux de neurones artificiels

0.4.1. Introduction

Sous le terme des réseaux de neurones, on regroupe aujourd'hui un certain nombre de modèles dont l'intention est de réaliser quelques fonctionnalités du cerveau humain, en reproduisant certaines de ces structures de base. Depuis une dizaine d'années, l'utilisation des réseaux de neurones artificiels s'est développée dans de nombreuses disciplines (sciences économiques, écologie et environnement, biologie et médecine...).

Ils sont notamment appliqués pour résoudre des problèmes de classification, de prédiction, de catégorisation, de reconnaissance des formes et de mémoire associative. Dans le cadre du traitement des données, les réseaux de neurones constituent une méthode d'approximation de systèmes complexes, particulièrement utile lorsque ces systèmes sont difficiles à modéliser à l'aide des méthodes statistiques classiques.

Les réseaux de neurones sont également applicables dans toutes les situations où il existe une relation non linéaire entre une variable prédictive et une variable prédite. Par leur nature et leur fonctionnement, les réseaux de neurones peuvent détecter les interactions multiples non linéaires parmi une série de variables d'entrée, ils peuvent donc gérer des relations complexes entre les variables indépendantes et les variables dépendantes [32] [33].

0.4.2. Historique

Historiquement, les origines de cette discipline sont très diversifiées. En 1943, *McCulloch* et *Pitts* étudièrent un ensemble de neurones formels interconnectés et montrèrent leurs capacités à calculer certaines fonctions logiques. En 1949, *Webb*, dans une perspective psychophysique, souligna l'importance du couplage synaptique dans les processus d'apprentissage. C'est en 1958, que *ressemblât* décrivit le premier modèle opérationnel de réseaux de neurones mettant en œuvre les idées de *Webb, McCulloch et Pitts*: le perceptron inspiré du système visuel, capable d'apprendre à calculer certaines fonctions logiques en modifiant ses connexions synaptiques.

Ces modèles suscitèrent l'intérêt de plusieurs chercheurs avant que *Minsky* et *Papert* en 1969 démontrèrent leurs limites théoriques. Le renouveau actuel des réseaux de neurones est dû à des contributions originales comme celle de *Hopfield* en 1982, qui en montrant l'analogie des réseaux de neurones avec certains systèmes physiques, a permis de leur appliquer un formalisme riche et bien maîtrisé. Plus récemment, en 1985, de nouveaux modèles mathématiques ont permis de dépasser les limites du perceptron. [34] [35].

0.4.3. Le modèle neurophysiologique

Le cerveau humain est le meilleur modèle de machine polyvalente incroyablement rapide et surtout douée d'une parfaite capacité d'auto-organisation. Son comportement est beaucoup plus mystérieux que le comportement de ses cellules de base. Il est constitué d'unités biologiques élémentaires (environ 10¹² neurones), chacune reçoit et envoie des informations (1000 à 1000 synapses par neurone).

Les cellules nerveuses appelées "neurones" qui sont des éléments de base du système nerveux central. Elles sont constituées de trois parties essentielles, le corps cellulaire, les dendrites et l'axone [36].

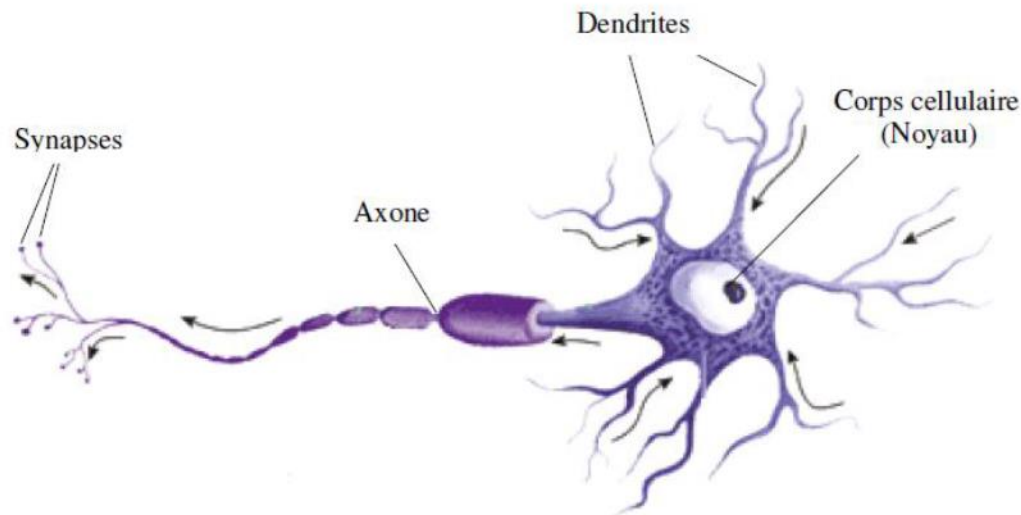


Figure (III-5) : Représentation schématique d'un neurone biologique.

L'architecture biologique du neurone est présentée sur la figure (III-5). Les dendrites sont considérées comme les portes d'entrées des neurones. Elles sont les réceptrices principales du neurone permettant de capter les signaux lui parvenant. Ensuite, un traitement de toutes ces informations a lieu au niveau du corps cellulaire. Les principales lignes de transmission du système nerveux sont les axones. Ils servent de moyen de transport pour les signaux émis par le neurone, vers d'autres neurones. L'information va transiter de neurone en neurone le long de l'axone jusqu'aux muscles via un potentiel d'action (un signal électrique).

La synapse désigne les zones de contact entre neurones, zones spécialisées dans la transmission de l'information. Elles peuvent être inhibitrices ou inhibitrices de signal pondérant l'information arrivant au corps cellulaire par les dendrites. [37]

0.4.4. Le modèle mathématique (neurone artificiel)

0.4.4.1. Structure

La figure (III-6) montre la structure d'un neurone artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones "amont". A chacune de ces entrées est associé un poids abréviation de Wight (poids en anglais) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones "avals". A chaque connexion est associé un poids [37].

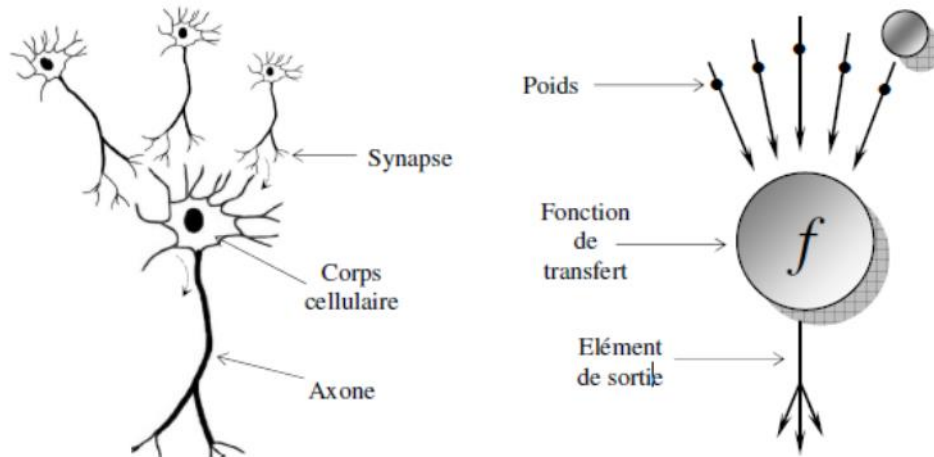


Figure (III.6) : Mise en correspondance du neurone biologique /et du neurone artificiel.

0.4.5. Architecture des réseaux de neurones

0.4.5.1. Les réseaux non bouclés

Ce sont des réseaux unidirectionnels sans retour arrière (*feed – forward*). Le signal de sortie est directement obtenu après l'application du signal d'entrée. Si tous les neurones ne sont pas des organes de sortie, on parle de neurones cachés [38].

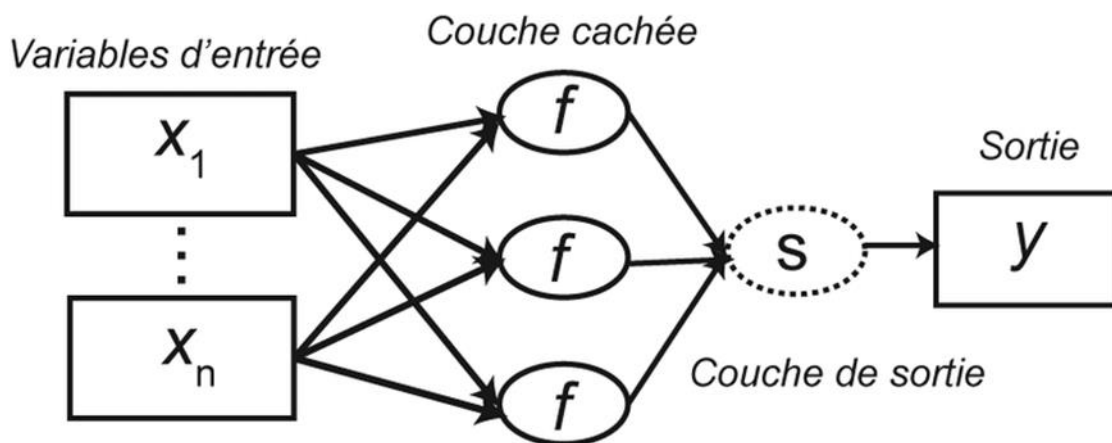


Figure (III-7-a) : Réseau non bouclé.

0.4.5.2. Réseaux bouclés

Il s'agit de réseaux de neurones avec retour en arrière (feedback network ou récurrent Network) [39].

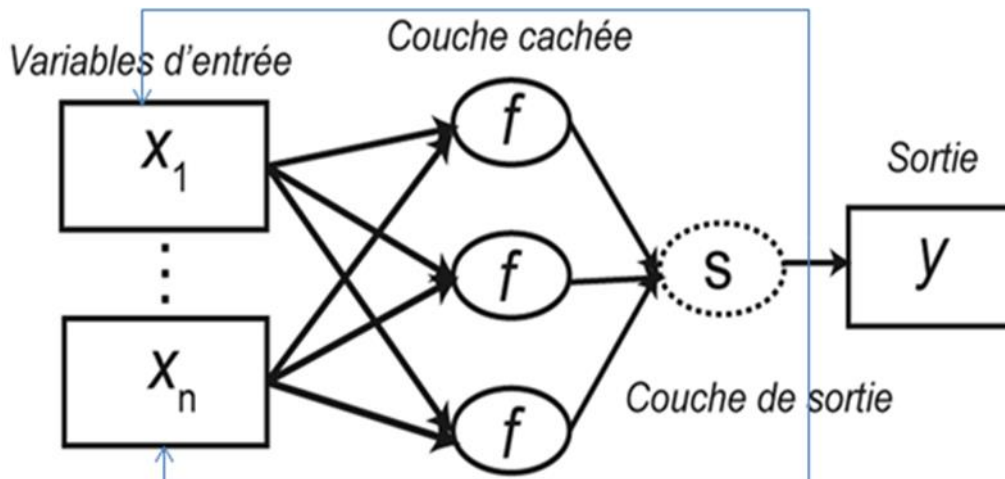


Figure (III-7-b) : Réseau bouclé.

0.4.6. Apprentissage des réseaux de neurones artificiels

0.4.6.1. Types d'apprentissages

L'apprentissage et l'adaptation constituent deux caractéristiques essentielles des réseaux de neurones. Le rôle de l'apprentissage est d'optimiser les poids de chaque connexion.

De nombreuses règles existent pour modifier les poids des connexions et donc pour arriver à un apprentissage correct lorsque celle-ci est achevée.

Le réseau doit être capable de faire les bonnes associations pour les vecteurs d'entrées qu'il n'aura pas appris.

C'est l'une des propriétés importantes dans les réseaux de neurones, car il permet de donner la capacité de reconnaître des formes ressemblantes, c'est la phase de reconnaissance.

Les techniques d'apprentissage peuvent être classées en trois catégories. [40] [30].

A. Apprentissage supervisé :

Dans cette sorte d'apprentissage, le réseau s'adapte par comparaison entre le résultat qu'il a calculé, en fonction des entrées fournies, et la réponse attendue en sortie. Ainsi, le réseau va se modifier jusqu'à ce qu'il trouve la bonne sortie, c'est-à-dire celle attendue, correspondant à une entrée donnée [09].

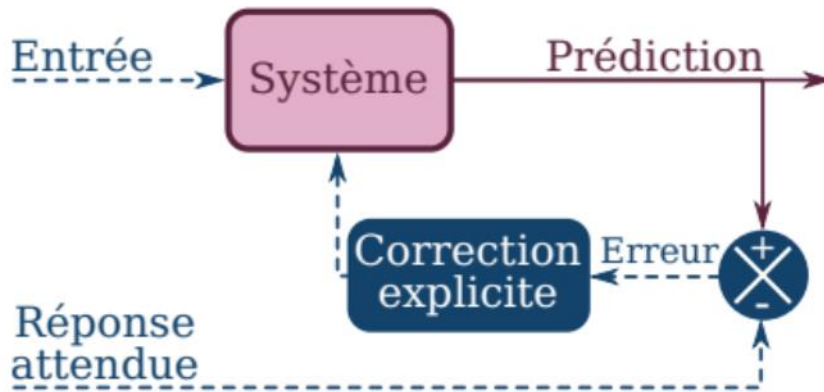


Figure (III-8) : Apprentissage supervisé.

B. Apprentissage non supervisé

Cet apprentissage consiste à détecter automatiquement des régularités qui figurent dans les exemples présentés et à modifier les poids des connexions pour que les exemples ayant les mêmes caractéristiques de régularité provoquent la même sortie.

Les réseaux auto-organiseurs de Kohner sont les réseaux à apprentissage non supervisé les plus connus [40].

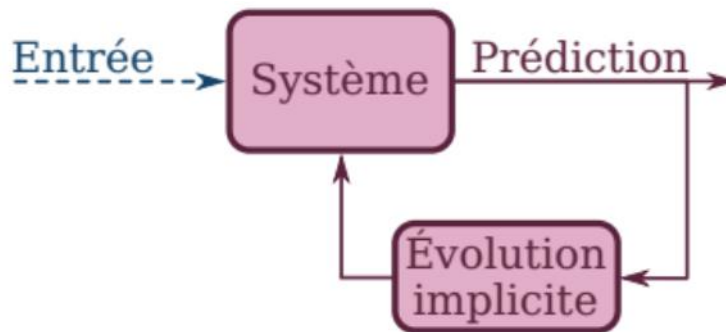


Figure (III-9) : Apprentissage non supervisé.

C. Apprentissage auto-supervisé

Le réseau de neurones évalue lui-même ses performances, sans l'aide d'un « professeur ».

Un objet est présenté à l'entrée du réseau de neurones, on a indiqué la classe à laquelle appartient cet objet. Si le réseau ne le classe pas correctement, il mesure lui-même l'erreur qui le faîte, et propage cette erreur vers l'entrée.

Le réseau procède à autant d'itérations qu'il est nécessaire jusqu'à obtenir la réponse correcte [30].

0.5.Perceptron

0.5.1. Perceptron a une seule couche

La perception à une seule couche est le premier de trois réseaux d'après la taxonomie de la Figure (III-10) pouvant être employés avec des entrées binaires ou continues. Ce réseau simple a suscité beaucoup d'intérêt, quand initialement, a été développé en raison de sa capacité d'apprendre à identifier des modèles simples.

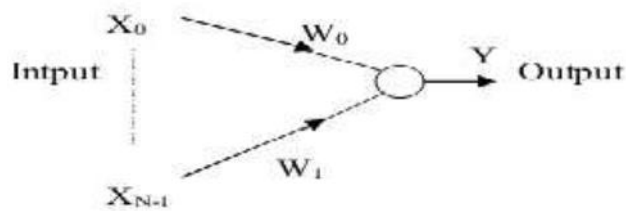


Figure (III-10) : Perceptron à une seule couche.

Les poids de connexion ainsi que le seuil dans un perceptron à une seule couche peuvent être fixés ou adaptés en utilisant un certain nombre d'algorithmes.

0.5.2. Le perceptron multicouche

Les perceptrons multicouches sont des réseaux non-récurrents avec une ou plusieurs couches de neurones entre les couches d'entrée et de sortie.

Ces couches additionnelles contiennent des unités cachées ou des neurones qui ne sont pas directement reliés aux neurones des couches d'entrée et de sortie.

Un perceptron avec trois couches dont deux couches cachées est montré dans la Figure (III-11). Ils sont de plus en plus employés avec le développement de nouveaux algorithmes d'apprentissage.

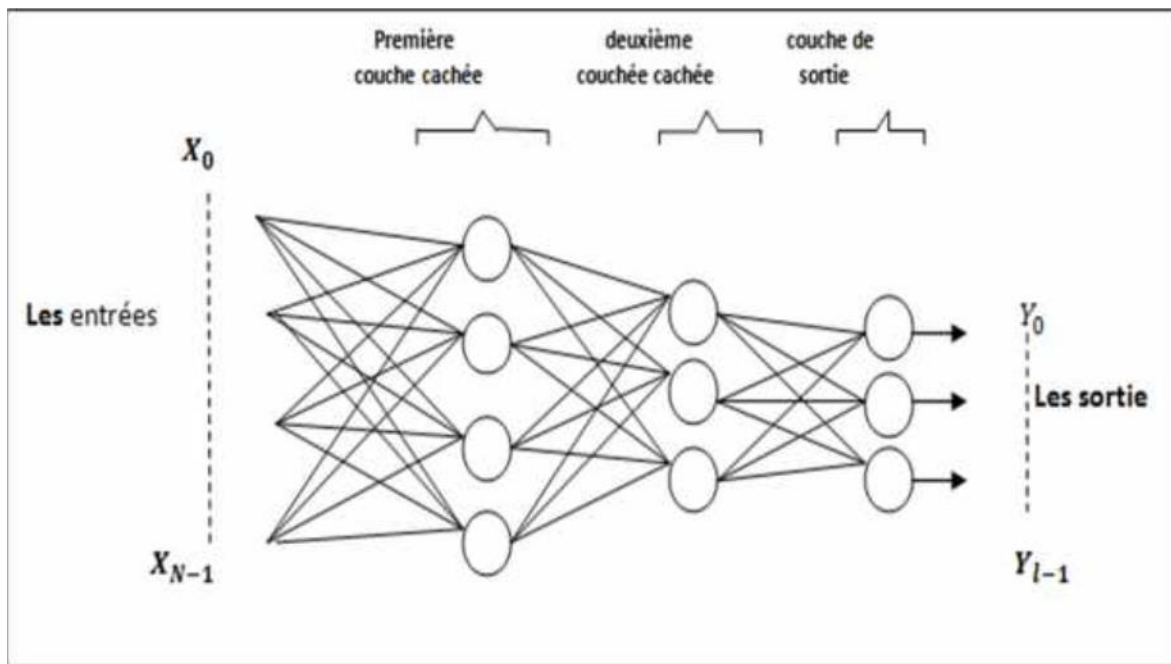


Figure (III-11) : Perceptron Multicouche.

0.6. Avantages et Inconvénients des réseaux de neurones

0.6.1. Avantages des réseaux de neurones

- Capacité de représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe.
- Faculté d'apprentissage à partir d'exemples représentatifs, par « rétro propagation des Erreurs ». L'apprentissage (ou construction du modèle) est automatique.
- Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données.
- Simple à manier, beaucoup moins de travail personnel à fournir que dans l'analyse statistique classique. Aucune compétence en mathématiques, informatique statistique n'est requise.
- Comportement moins mauvais en cas de faible quantité de données.
- Pour l'utilisateur novice, l'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multi variables.

0.6.2. Inconvénients des réseaux de neurones

- L'absence de méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer dans la (ou les) couche(s) cachée(s).
- Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage, qui jouent un rôle important dans la vitesse de convergence.
- Le problème du sur-apprentissage (apprentissage au détriment de la généralisation).

-Basés sur les données.

- La connaissance acquise par un réseau de neurones est codée par les valeurs des poids synaptiques. Les réseaux de neurones sont donc des boîtes noires où les connaissances sont floues pour l'utilisateur.

0.7.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons opté pour l'étude de MPPT du générateur PV en utilisant la technique P & O. Dans ce contexte, nous avons proposé une technique de commande basée sur l'intelligence artificielle à savoir les réseaux de neurones dont l'objectif est d'améliorer la performance des résultats obtenus par la technique P&O.

Le choix de l'architecture neuronale est basé sur le type de perceptron multicouche avec un algorithme de la rétropropagation du gradient. Les résultats obtenus seront présentés dans le prochain chapitre.

Chapitre IV
Résultats de
simulation

IV. Résultats de simulation

IV.1. Introduction

La conception du modèle de panneau photovoltaïque suscite un intérêt considérable sur le concept du point de puissance maximale. Cependant, le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est assuré par différentes techniques de calcul. En raison de leur flexibilité et de leur capacité à traiter des problèmes non linéaires, les techniques proposées pour développer des schémas MPPT sont la méthode classique « perturbation et observation » et la méthode basée sur l'intelligence artificielle « réseau de neurones » afin d'améliorer les performances souhaitées. Les résultats des deux techniques proposées sont simulés par le logiciel MATLAB.

IV.2. Caractérisation du module PV

Pour réaliser cette simulation, nous avons choisi un générateur photovoltaïque de puissance de 37.26 W. Les caractéristiques électriques de module photovoltaïque sont données dans le tableau (IV-1):

Puissance maximale (P_{max})	37.26 W
Cellules par module	32 N cellule
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	21.24 V
Courant de court-circuit (I_{sc})	2.55 A
Tension au point de puissance maximale (V_{mp})	16.56 V
Courant au point de puissance maximale (I_{mp})	2.27 A
Coefficient de température de (V_{oc})	-0.229 % / °C
Coefficient de température de (I_{sc})	0.030706 % / °C

Tableau (IV-1) : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

IV.3. Simulation du module PV

Sur la base du modèle mathématique de la cellule solaire développé dans le graphe (II-3) du chapitre II, on obtient le bloc schématique de SIMULINK comme indiqué sur la Figure (IV-1).

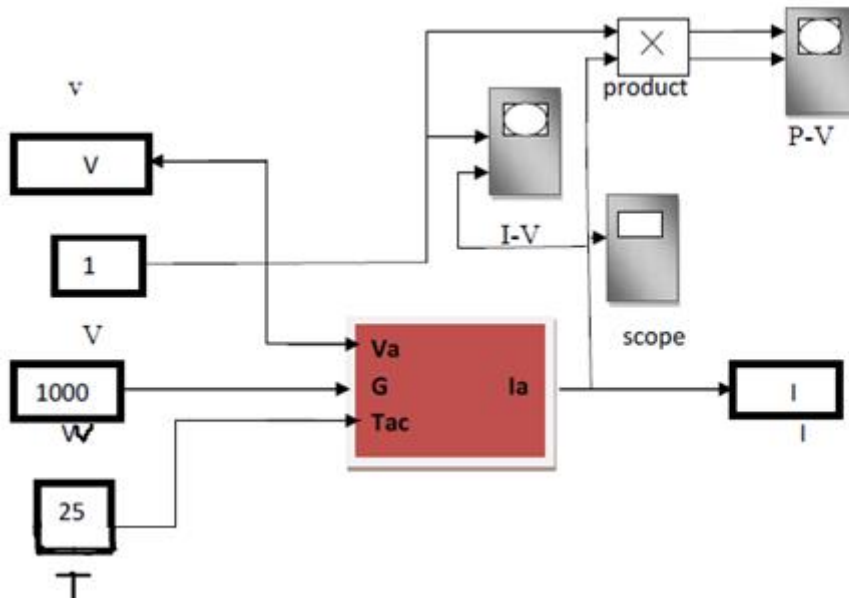


Figure (IV-1) : schéma Bloc du module solaire dans SIMULINK.

La figure (IV-2) représente la caractéristique courant – tension ($I_{pv} = f(V_{pv})$) à température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC) ($E = (200 \text{ à } 1000) \text{ w/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$).

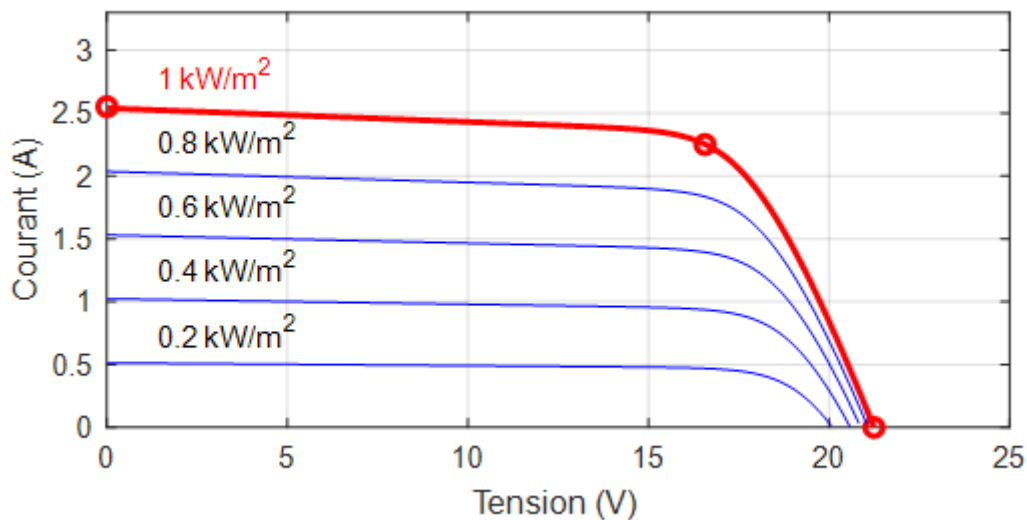


Figure (IV-2) : Résultats de simulation des caractéristiques (Courant –Tension).

La figure (IV-3) représente la caractéristique puissance – tension $p_{pv} = f(V_{pv})$ à température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC) ($E = (200 \text{ à } 1000) \text{ w/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$).

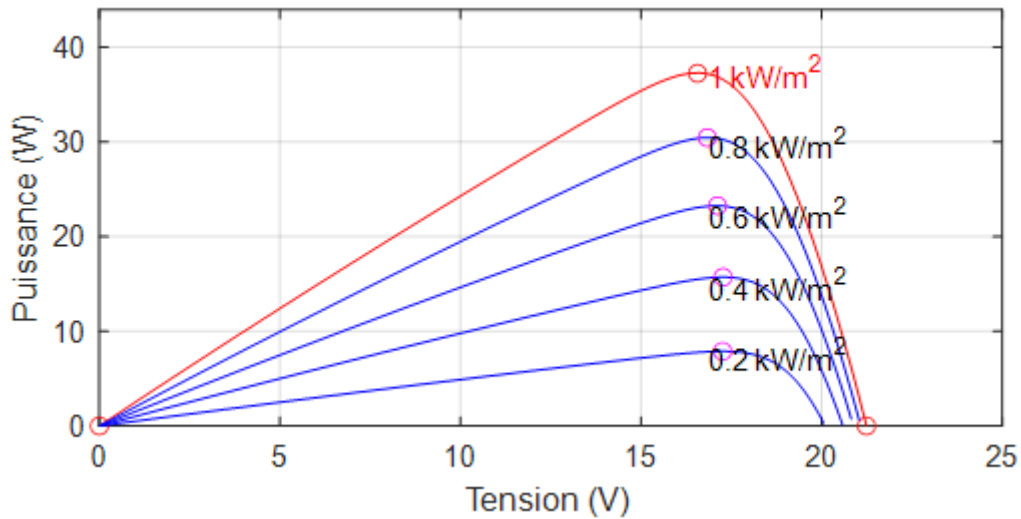


Figure (IV-3) : Résultats de simulation des caractéristiques (Puissance –Tension).

IV.4. Bloc du système avec MPPT

IV.4.1. Simulation de la méthode MPPT

La figure (IV-4) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque par la commande MPPT « perturbation et observation »

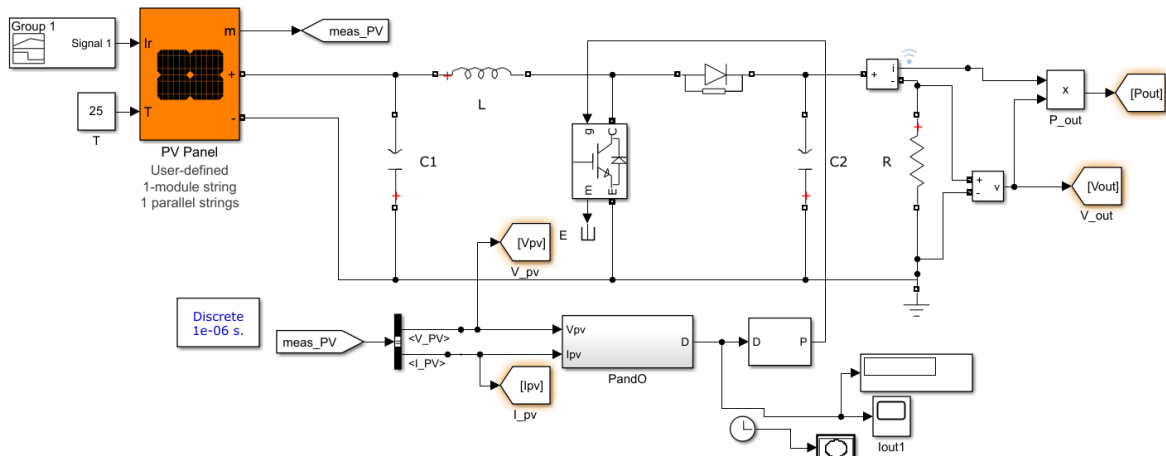


Figure (IV-4) : Modèle de simulation du GPV adapte par la technique MPPT (P&O).

Nous avons réalisé le modèle de simulation d'un PV à ombrage partiel utilisant l'algorithme P&O.

La figure (IV-5) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT :

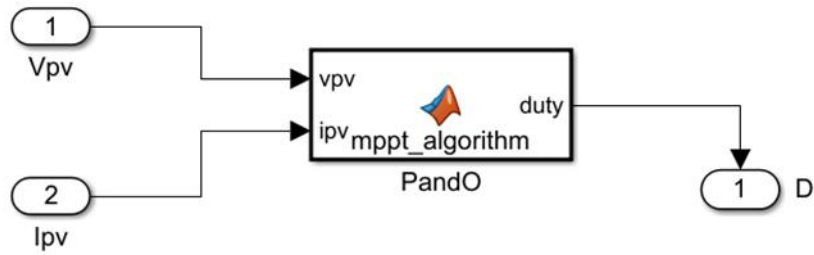


Figure (IV-5) : Schéma de simulation de l'algorithme (P et O).

Les résultats de simulation du système photovoltaïque accordé par la commande MPPT « Perturbation et observation » sont illustrées par les figures (IV-6) à (IV-9).

Ces illustrations définissent le signal de l'irradiation, la tension, le courant, ainsi que la puissance générée par le générateur photovoltaïque. Ces résultats montrent que le hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

Le hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : Transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

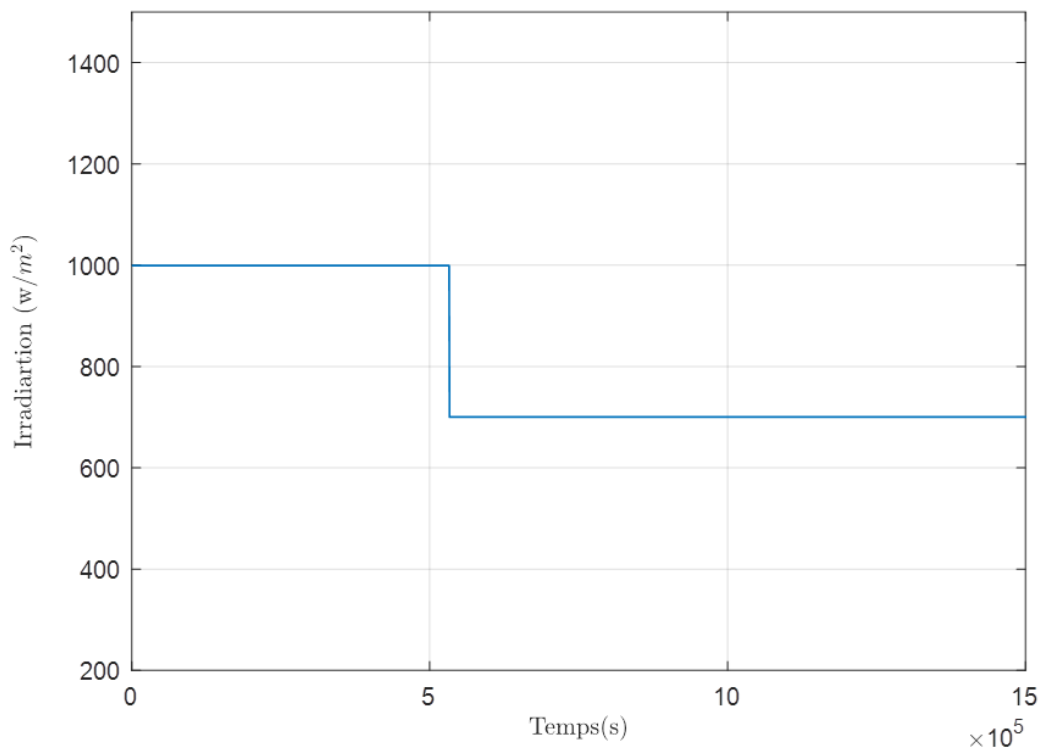


Figure (IV-6) : Le signal de l'irradiation.

Lorsque le générateur PV subit des variations de l'éclairement et température.

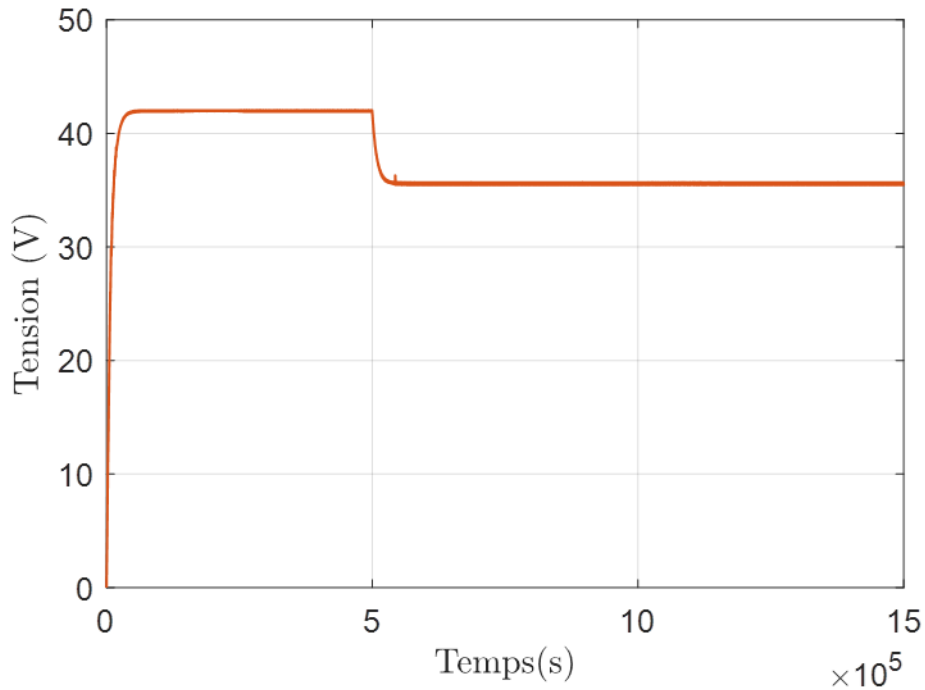


Figure (IV-7) : Résultats de simulation de la tension générée par le générateur Photovoltaïque.

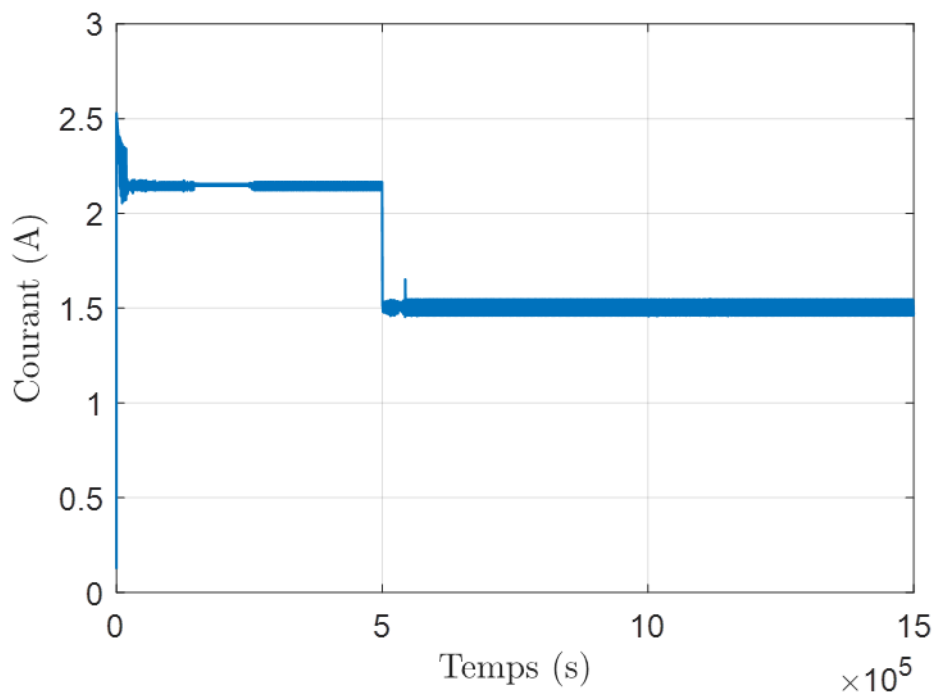


Figure (IV-8) : Résultats de simulation du courant généré par le générateur Photovoltaïque.

Après un régime transitoire de durée 50 ms, dans les deux cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que : Pendant le premier changement d'éclairement (qui dure 15 ms), le système converge vers une nouvelle tension qui correspond au PPM. Pendant le

deuxième changement d'éclairement (qui dure 50ms), le système converge vers une nouvelle tension qui correspond au PPM de départ.

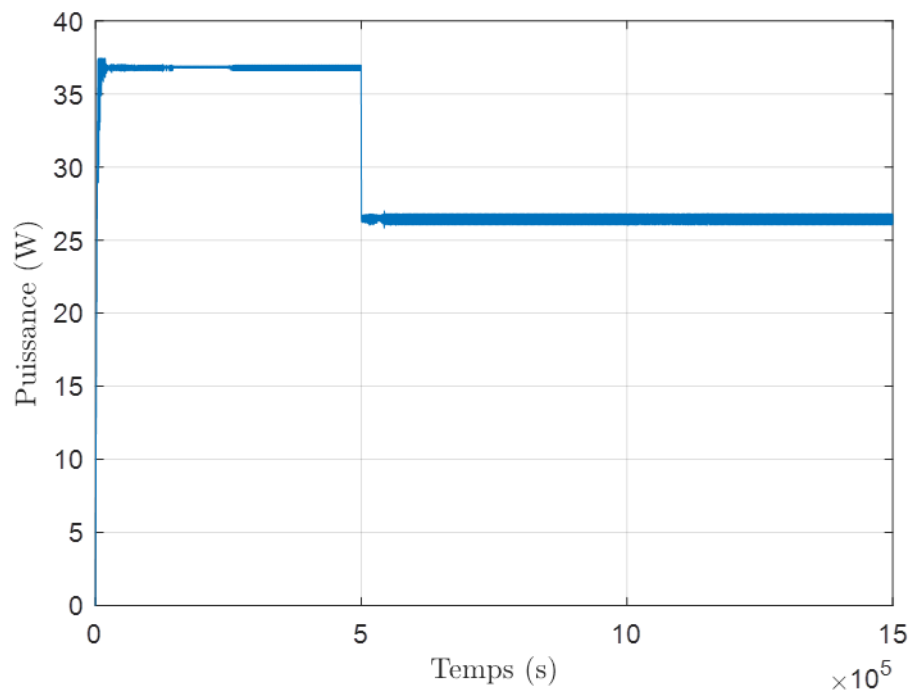


Figure (IV-9) : Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur Photovoltaïque.

Après un régime transitoire de durée 50 ms, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point PPM. Dans les deux cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que :

Pendant le premier changement d'éclairement (qui dure 50 ms). Pendant le deuxième changement d'éclairement (qui dure 15ms), le système converge vers le PPM trouver avant le changement d'éclairement.

IV.5. MPPT à base de réseaux de neurones artificiels

Dans cette partie, la nouvelle technique basée sur l'intelligence artificielle est choisi pour la poursuite du point de puissance maximale basée sur la méthode neuronale :

Dans un premier temps, une approximation des résultats est effectuée concernant la puissance maximale (P_{max}), le courant et la tension qui correspondent à cette puissance, en fonction des changements d'irradiation et de la température appliqués, c'est le suivi de la

variation du point de puissance maximale. Où notre système doit pouvoir évoluer, rapidement et efficacement. Alors, pour estimer le MPPT, nous allons utiliser deux réseaux de neurones à la fois; le premier réseau dont le rôle est d'estimer le courant de sortie qui correspond à la puissance maximale, et le deuxième pour estimer la tension qui correspond à la puissance maximale aussi.

IV.5.1. Procédure de construction d'un réseau de neurones

La procédure de conception d'un réseau de neurone peut être résumée en six étapes :

- La collecte d'une base de données.
- La séparation de la base de données en trois sous-ensembles (base d'apprentissage, base de validation et base de test).
- Le choix de l'architecture du réseau de neurones (nombre de couches cachées, nombre de neurones dans ces couches,...).
- Prétraitement des données.
- Entraînement du réseau de neurones sur les bases d'apprentissage et de validation.
- Mesure des performances du réseau de neurones sur la base de test.

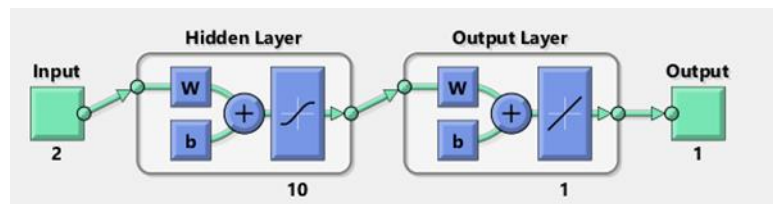


Figure (IV-10) : Modèle du neurone choisi.

La figure (IV- 11) montre le mode d'entrainement du modèle neuronal.

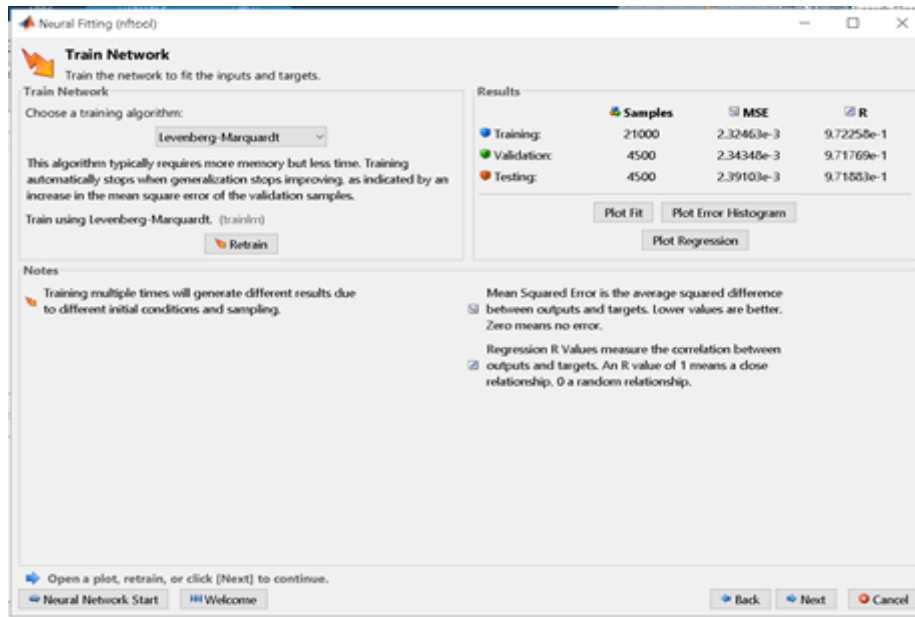


Figure (IV- 11) : Mode d'entraînement de l'architecture neuronale.

Après l'étape d'entraînement, vient la création d'un bloc du réseau de neurone artificielle dans SIMULINK appliqué à la commande MPPT:

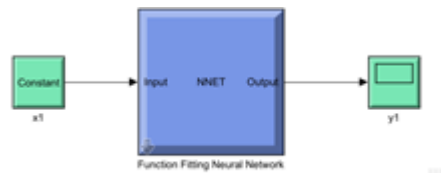


Figure (IV-12): schéma Bloc du réseau de neurones artificiel dans SIMULIN.

IV.5.2. Résultats de simulation

Lorsque le générateur PV subit des variations de l'éclairement à des valeurs de 1000W/m² et 700W/m². La puissance de sortie générée atteint la puissance maximale pour une irradiation de 1000W/m². Ce qui permet d'adopter le modèle de la commande appliqué par les réseaux de neurones. La (Figure (IV- 13) montre la puissance générée en utilisant le modèle neuronal comparée à celle obtenue par la technique P&O.

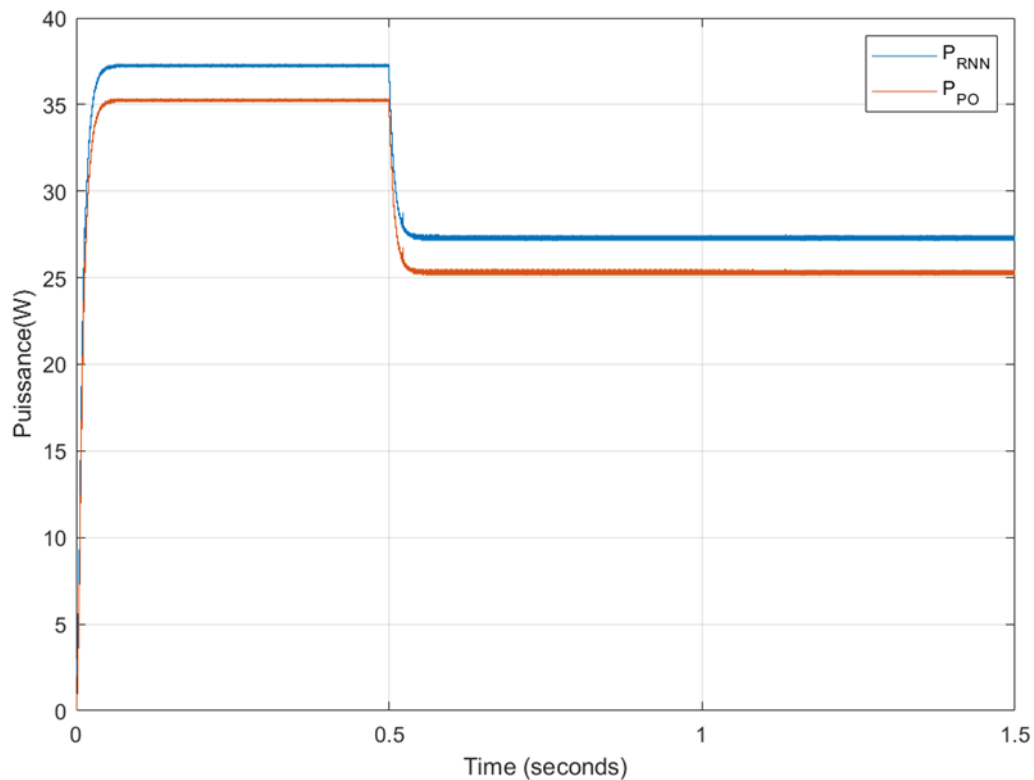


Figure (IV- 13) : Puissance de sortie.

Après un régime transitoire de durée 20 ms, la commande MPPT par (RNA) fait osciller le point de fonctionnement autour du point PPM. Dans les deux cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que :

Pendant le premier changement d'éclairement (qui dure 50 ms), le système converge vers un nouveau PPM qui correspond à l'éclairement imposé. Pendant le deuxième changement d'éclairement (qui dure 15ms), le système converge vers le PPM trouver avant le changement d'éclairement.

Donc, la commande MPPT par (RNA) utilisée contrôle bien le fonctionnement du générateur PV autour des conditions optimales.

IV.6. Conclusion

Nous avons analysé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK le fonctionnement électrique d'un système PV, adapté par convertisseur DC-DC (hacheur booste), régulé par une commande MPPT.

Pour commander le point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque nous avons présenté l'architecture des réseaux de neurones appliqué au système photovoltaïque. Les résultats de simulation prouvent que ce système peut adapter le point maximal de fonctionnement pour des variations de perturbations externes.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire considère l'étude de la modélisation et la commande d'un système de poursuite du point de puissance maximale en utilisant deux méthodes : la perturbation et l'observation et celle basée sur les réseaux de neurones artificiels.

Aujourd'hui, les ressources naturelles diminuent à cause du développement démographique et du développement de l'industrie. Cela a mené les chercheurs à s'intéresser à l'exploitation des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, on trouve l'énergie solaire, qui se trouve dans la plupart des régions du monde. Cependant, cette énergie souffre encore du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de la puissance intermittente à cause de la variation des conditions météorologiques dans certaines régions. Ces problèmes doivent être pris en considération lors de la conception d'un système photovoltaïque.

Dans ce contexte, nous avons commencé tout d'abord par un état de l'art sur les différentes sources d'énergies, puis en particulier on s'est intéressé à l'énergie solaire. Pour cela, des généralités sur les modules photovoltaïques ont été présentées, avec la modélisation d'un panneau photovoltaïque. Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) qui présente le rôle essentiel dans le système photovoltaïque (PV) pour utiliser efficacement l'énergie PV a été l'intérêt principal de notre étude.

Pour cela nous avons détaillé dans le chapitre 3 certaines méthodes MPPT présentées dans la littérature telles que l'incrémentation de conductance, et opté pour l'étude des deux techniques P&O et RNA. Les résultats des simulations ont montré que les performances de la commande intelligente sont meilleures, ce qui montre l'efficacité par rapport à celles de la commande P&O classique.

Le travail étudié dans ce mémoire nous motive davantage à continuer dans ce même axe de recherche. Comme perspectives, on propose quelques tâches à traiter ultérieurement, telle que :

- L'amélioration de l'algorithme Perturbation et Observation par d'autres approches comme la technique neurone-floue.
- La modélisation et la commande par la logique floue de type Taka gi-Segno en se basant sur les données expérimentales.
- Application dans les domaines de pompage et de production de l'énergie électrique.

Références Bibliographiques

- [1] « PLANÈTE Énergies solaire », <http://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-solaire-6679/>.
- [2] Mancini.F, « Traitement des déchets issus de la biomasse pour la génération d'énergie », thèse de doctorat université bordeaux I, 2006.
- [3] Belloufi.Y, « Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraîchissement des locaux », mémoire de master, Université de Biskra, 2012.
- [4] « L'énergie hydraulique en domaine terrestre », <http://www.planete-energies.com/fr/medias/l-energie-hydraulique-continentale-la-premiere-des-energies-renouvelables>.
- [5] «Les énergies marines renouvelables » 2012,https://enautia.com/clubargon/disk/Partage/ERMs_ETM/eneaconsulting.pdf.
- [6] BENCHARIF.S, «Variation des paramètres mécaniques pour l'optimisation du rendement d'une éolienne», mémoire de master, Université de Biskra, 2013.
- [7] Hadj Belkecemi.M « Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2011.
- [8] Amara.K, «Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyen tension », Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, 2015.
- [9] Slama.F, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.
- [10] [http : //www.sonelgaz.dz](http://www.sonelgaz.dz).
- [11] Ministère de l'énergie et des Mines, "Guide des Énergies Renouvelables", Édition 2007.
- [12] Brahim (MEM), "Situation des énergies renouvelables en Algérie". Conférence sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie de marche, 2001, Hôtel Sheraton, Alger, Algérie.
- [13] Mahmoud, M.E.M.M., El Moubarrack, J.Y., Ehssein, C., Yahya, A.M.,

- Mahmoud, A.K. and Youm, I., 2019. Performance Optimization and Modelization of a Photovoltaic Pumping System. American Journal of Energy Engineering, 7(1), pp.1-7.
- [14] Touhami, G., Sliman, L., Zohra, A.F., Abdelkader, H. and Khalil, D., 2022. Extraction of Maximum Power of Organic Photovoltaic Generator Using MPPT Technique. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 905, pp. 1-6). Trans Tech Publications Ltd.
- [15] Kumar, R. and Singh, S.K., 2018. Solar photovoltaic modeling and simulation: As a renewable energy solution. Energy Reports, 4, pp.701-712.
- [16] M.Chegaar, A Lamir, A Chibani « Estimation global Solar rasiation Using Sunshine Hours» 4éme séminaire international Physique Énergétique, Bechar 2000.
- [17] M. Gapderou, « Atlas Solaire de L'algérié », Tomel,2, OPU 1983.
- [18] I. Tsuda, K . Kurokawa ,K.Nozaki, «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35,pp 503 – 508,1994.
- [19] A. Bentaillah, « étude expérimental et de simulation des performance d'une installation PV de faible puissance », mémoire de Magister en physique énergétique, Tlemcen, 1994.
- [20] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems »,Ph.D,P.e U.S merchant Marine Academy,Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [21] Tahar Taeticht ,Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien- décembre 2006.
- [22] Chedid, R., Saliba, Y., 1996. «Optimization and control of autonomous renewable energy systems ». International Journal of Energy Research 20, 609–624.
- [23] F.Benyarou, « Conception Assistée Par Ordinateur des Système PV Modélisation, dimensionnement et simulation », thèse de doctorat en physique énergétique, Tlemcen, 2004.
- [24] Saidani.A, « Amélioration de la technique d'extraction de maximum de puissance de système photovoltaïque basé sur la méthode (P&O) », mémoire de master, Université de M'sila 2015.

- [25] M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », mémoire de magister, option physique énergétique 2007.
- [26] A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef « Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin » Rev. Energ. Ren : physique Energétique (1998pp.95-100).
- [27] D. Rekioua , E. Matagne, Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, simulation and control , Springer Verlag London 2012.
- [28] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 11, pp. 4473–4482, Nov. 2009
- [29] G N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 4, pp. 963–973, Jul. 2005
- [30] CHEKIRED.F, "Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA", Mémoire de Magister de l'Ecole Nationale Polytechnique 2008.
- [31] Ali.C, "Etude de la Poursuite du Point de Fonctionnement Optimal du Générateur Photovoltaïque (G. PV) ", SETIT 2005 3rd International Conférence: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Télécommunications March 27-31, tunisia 2005.
- [32] Schmitt. A, "Les réseaux de neurones artificiels un outil de traitement de données prometteur pour l'anthropologie", Bull. et Mém. de la société d'anthropologie de Paris, 2001.
- [33] Mezache.A, "Optimisation de la détection décentralise CFAR dans un clutterweibull utilisant les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones flous", thèse de doctorat, université de Constantine, 2009.
- [34] Kaddour .B, "cours de réseaux de neurones", Département INFRES ENST, Paris, Brique MOD T2, 2004-2005.
- [35] DUPONT.R, "Emissions biogéniques de NO par les sols Impact sur la chimie atmosphérique", Thèse de doctorat, université Toulouse III – Paul Sabatier, 2007.
- [36] A. Mezache, "optimisation de la détection décentralise CFAR dans un

clutterweibull Utilisant les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones flous", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2009.

- [37] Hadjab.M, "développement des performances d'un système photovoltaïque", Université de midi bel abbes, Mémoire de magister, 2011.
- [38] Mrabti. T, El Ouariachi.M, Kassmi.K et Tidhaf .B, " Characterization and Modeling of the Optimal Performances of the Marketed Photovoltaic Panels ", Moroccan Journal of Condensed Matter MJCM, Vol. 12, Issue 1, pp. 7 – 13, 2010.
- [39] Loukriz. A, "Optimisation de la modélisation et de la commande d'un système PV par la technique d'intelligence artificielle", mémoire de magister, Université de M'sila, 2014.
- [40] Belhadj.M, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome », Mémoire de magister, université de Bechar, 2008.