

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



Centre universitaire SALHI AHMED –Naâma-
Institut des Sciences et Technologies
Département de Technologie



PROJET DE FIN D'ETUDE
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER

Filière : Energies renouvelables
Spécialité : Energies renouvelables en Electrotechnique

Présenté par :

- **BELHADJ MEDJDOUB**
- **BENTADJ MEDJDOUB**
- **LARABI HICHAM**

Intitulé

L'optimisation de MPPT du système photovoltaïque

Soutenu devant le jury :

- | | | |
|------------------------------|------------|------------------|
| ➤ M. HABCHI YACINE | MCB | Président |
| ➤ M. BRAHIMI MOHAMMED | MCB | Examineur |
| ➤ Dr. TAIBI IBRAHIM | MCB | Encadreur |

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciement

Le plus grand merci revient tout d'abord à « Dieu » qui, lui seul, nous a guidé dans le bon chemin durant notre vie et qui nous a donné le courage, la volonté, et la force pour élaborer ce travail d'initiation à la recherche.

Nous tenons à remercier. Dr TAIBI IBRAHIM, directeur de ce mémoire. Pour la qualité de l'encadrement et du soutien qu'il nous accorde durant notre formation. Ses qualités humaines ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions l'ensemble des enseignants du département des Sciences et Technologies.

Nous remercions aussi tous ceux qui m'ont aidé aussi bien dans mes recherches et documentations que dans mon encadrement et suivi.

Enfin, nous tenons à remercier notre famille pour leurs encouragements et leur soutien inconditionnel, et à tous notre amis qui nous apporté un grand soutien le long de ce travail.

Dédicaces

Avant tout, nous tenons à remercier 'ALLAH', l'unique qui nous offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les difficultés de la vie.

Nous dédions ce modeste travail :

À nos parents qui ont su nous donner les ailes nécessaires pour réussir notre envol dans la vie, tout en sachant la peine qu'ils auraient le jour de nos voir partir au loin.

En remerciement de ce beau geste, ce mémoire leur est dédié.

A nos frères,

A nos sœurs,

A toute nos familles,

Et A tous nos amies,

A tous les gens qui nous connaissent.

Résumé

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie, mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet, la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. À cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont, connus sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) associée au hacheur, lequel assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale

Dans ce travail, on a étudié la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque, et vaguement son adaptation par une commande MPPT « perturbation et observation et RNA » et assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV..

Abstract

A photovoltaic generator can operate in a wide range of output voltage and current, but it can only deliver maximum power for particular values of current and voltage. Indeed, the characteristic $I(V)$ of the generator depends on the solar illumination and the temperature. These climatic variations cause the maximum power point to fluctuate. Because of this fluctuation, there is often interposed between the generator and the receiver one or more controlled static converters making it possible to pursue the point of maximum power. These commands are known as MPPT (Maximum Power Point Tracking) associated with the chopper, which ensures the coupling between the PV generator and the receiver by forcing the first to deliver its maximum power In this work, we studied the modeling and simulation of the electrical functioning of a photovoltaic system, and vaguely its adaptation by an MPPT command "disturbance and observation and RNA" and ensuring the pursuit of the maximum power supplied by the PV generator. .

ملخص

يمكن أن يعمل المولد الكهروضوئي في نطاق واسع من جهد الخرج والتيار ، ولكن يمكنه فقط توفير الطاقة القصوى لقيم معينة من التيار والجهد. في الواقع ، تعتمد الخاصية $I(V)$ للمولد على الإضاءة الشمسية ودرجة الحرارة. هذه الاختلافات المناخية تتسبب في تقلب أقصى نقطة للطاقة. بسبب هذا التذبذب ، غالبًا ما يتم التداخل بين المولد والمستقبل واحد أو أكثر من المحولات الثابتة المتحكم فيها مما يجعل من الممكن متابعة نقطة الطاقة القصوى. تُعرف هذه الأوامر باسم MPPT (تتبع الحد الأقصى لنقطة الطاقة) المرتبط بالفراصة ، والذي يضمن الاقتران بين المولد الكهروضوئي وجهاز الاستقبال من خلال إجبار الأول على توصيل أقصى طاقته.

في هذا العمل ، درسنا نمذجة ومحاكاة الأداء الكهربائي لنظام كهروضوئي ، وتكيفه بشكل غامض بواسطة أمر MPPT "الاضطراب والملاحظة والشبكة العصبية الاصطناعية" والتأكد من السعي لتحقيق أقصى قدر من الطاقة التي يوفرها المولد الكهروضوئي..

SOMMAIRE

Remerciement.....	I
Dédicaces.....	II
Résumé.....	III
Listes du figures	IX
Listes du tableaux	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I	
I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2. ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE.....	3
I.2.1. LES CAPTEURS SOLAIRE THERMIQUES	3
I.2.2. PROCESSUS DE CONVERSION THERMOMECHANIQUE	4
I.2.3. LE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE	5
I.2.4. LES ASPECTS TECHNIQUES	5
I.2.5. LA CONCENTRATION	5
I.2.6. LA RECEPTION DU RAYONNEMENT.....	6
I.2.7. LE TRANSPORT ET LE STOCKAGE DE LA CHALEUR	6
I.3. BIOMASSE	6
I.4. ENERGIE HYDRAULIQUE.....	7
I.4.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	8
I.4.2. UTILISATION DE LA MICRO HYDRAULIQUE	8
I.5. GEOTHERMIE	8
I.6. LES CENTRALES SOLAIRES OU PHOTOVOLTAIQUE	9
Avantage	10
Inconvénients	10
I.7. L'ENERGIE EOLIENNE	10
a) CLASSIFICATION DES TURBINES EOLIENNES	11
a-1) Les machines à axe horizontal	11

a-2) Les machines à axe vertical	11
I.8.L'ENERGIE RENOUVLABLE	12
I.9.CONCLUSION	13
Avantage	13
Inconvénients	14

CHAPITRE II

II.1 INTRODUCTION	16
II.2 PRINCIPE D'EFFET PHOTOVOLTAIQUE	16
II.3 TECHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES.....	17
II.4 MODELISATION ELECTRIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE	19
II.4.1.MODEL ELECTRIQUE DE BASE	19
II.4.2.MODELE A UNE DIODE (SIMPLE EXPONENTIELLE)	20
II.4.3. MODELE A DEUX DIODES (DOUBLE EXPENETIELLE)	23
II.5. CARACTERISTIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES	24
II.5.1 COURANT DE COURT CURCUIT (I_{cc})	25
II.5.2.TENSION A CURCUIT OUVERT(V_{OC}).....	25
II.5.3.FACTEUR DE FORME (ff).....	26
II.5.4.RENDEMENT DE CONVERSION (η).....	27
II.6.CONCLUSION	27

CHAPITRE III

III.1 INTRODUCTION :	29
III.2. PARTIE 1 :	30
III.2.1. ETUDE DU FONCTIONNEMENT DU CONVERTISSEUR STATIQUE(CS) :.....	30
III.2.2. TYPE DE CONVERTISSEUR DC-DC :	30
III.2.3. CONVERTISSEUR BUCK :.....	30
III.2.4. CONVERTISSEUR BOOST :.....	32
III.2.5. CONVERTISSEUR BUCK-BOOST :	36
III.3. RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE(MPPT)	37
PRINCIPE :.....	37

III.3.1. LES TECHNIQUES DE COMMANDES MPPT	38
III.3.2. LES COMMANDES MPPT CLASSIQUES	39
LA METHODE PERTURBE & OBSERVE (P&O)	39
METHODE D'INCREMENTATION DE LA CONDUCTANCE (INC) :	41
III.4. PARTIE 2	44
III.4.1. LES RESEAUX DE NEURONES	44
III.4.2. Présentation	44
III.4.3. Définition	45
III.4.4. LE MODELE NEUROPHYSIOLOGIQUE	45
III.4.5. STRUCTURE DES NEURONES	46
Le corps cellulaire	46
Les dendrites	46
L'axone	46
III.4.6. MODELISATION	47
Le neurone artificiel	47
III.4.7. PRINCIPE D'UN NEURONE ARTIFICIEL	48
III.4.8. FONCTIONS D'ACTIVATION	49
III.4.9. ARCHITECTURE DES RESEAUX DE NEURONES	50
Réseaux non boucles	50
Réseaux boucles	51
III.4.10. L'APPRENTISSAGE DES RESEAUX DE NEURONES	51
Apprentissage supervisé	51
Apprentissage non supervisé	52
L'apprentissage renforcé	53
III.4.11. REGLES D'APPRENTISSAGE	53
III.4.12. STRUCTURE D'INTERCONEXION	54
Réseau multicouche	54
Réseau à connexions locales	55
Réseaux à connexion récurrentes (dynamique)	56
Réseaux à connexion complexe	56
Réseaux de neurone à architecture évolutive	57
III.4.13. PERCEPTRON	57

Perceptron à une seule couche.....	57
Perceptron multicouche.....	57
III.4.14. PROPRIÉTÉ ET LIMITE DES RESEAUX DE NEURONES.....	58
La capacité d'adaptation.....	58
La capacité de généralisation.....	59
Le parallélisme	59
III.4.15. PROCÉDURE DE CONSTRUCTION D'UN RESEAU DE NEURONE	59
III.4.16. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES RESEAUX DE NEURONES.....	59
Les Avantages	59
Les Inconvénients	60
III.4.17. CONCLUSION :	60

CHAPITRE IV

IV.1. Introduction.....	62
IV.2. Les caractéristiques des panneaux.....	62
IV.3. Schéma bloc d'un générateur PV	63
IV.4. Influence de l'éclairage	63
IV.5. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE	65
IV.6. Schéma bloc d'un MPPT de P&O.....	66
IV.7. Bloc du système avec MPPT.....	66
IV.7.1. Simulation de la méthode MPPT	67
IV.8. PROCÉDURE DE CONSTRUCTION D'UN RESEAU DE NEURONES.....	69
IV.8.1. CRÉATION DU BLOC SIMULINK	70
IV.8.2. Résultat de la simulation	71
IV.9. Conclusion.....	73

Figure I.1 : <i>capteur thermique solaire</i>	4
Figure I.2 : <i>Le bois source de l'énergie Biomasse</i>	7
Figure I.3 : <i>Energie hydraulique</i>	7
Figure I.4 : <i>Principe de la géothermie</i>	9
Figure I.5 : <i>Photo d'une centrale solaire</i>	10
Figure I.6 : <i>Une ferme d'éoliens</i>	11
Figure I.7 : <i>Eolienne à axe horizontal (A) ; Eolienne à axe vertical (B)</i>	12
Figure I.8 : <i>La part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale</i>	13
Figure II.1 : <i>Schéma simplifié d'un système PV</i>	16
Figure II.2 : <i>Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque</i>	17
Figure II.3 : <i>Différents types de la cellule photovoltaïque</i>	19
Figure II.4 : <i>Approximation de la caractéristique courant-tension du panneau photovoltaïque</i>	20
Figure II.5 : <i>Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à une diode</i>	20
Figure II.6 : <i>Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à deux diodes</i>	23
Figure II.7 : <i>Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque idéal et réelle</i>	24
Figure II.8 : <i>schéma d'une cellule élémentaire</i>	26
Figure III.1 : <i>Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT sur charge DC</i>	30
Figure III.2 : <i>Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck</i>	31
Figure III.3 : <i>Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost</i>	33
Figure III.4 : <i>Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé</i>	33
Figure III.5 : <i>Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert</i>	34
Figure III.6 : <i>Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost</i>	37
Figure III.7 : <i>Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT</i>	38

Figure III.8 : Schéma de converge vers le PPM par P&O.....	39
Figure III.9 : Algorithme de la méthode P&O.....	40
Figure III.10 : Principe de la commande MPPT de type (INC).....	42
Figure III.11 : Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance.....	44
Figure III .12 : Neurone biologique.....	46
Figure.III.13 : Modèle d'un neurone artificiel.....	47
Figure.III.14 : Principe d'un neurone artificiel.....	49
Figure.III.15 : Fonction d'activation.....	50
Figure.III.16 : Réseaux non bouclé.....	50
Figure.III.17 : Réseaux bouclé.....	51
Figure III.18 : Schéma d'apprentissage supervisé.....	52
Figure III.19 : schéma d'apprentissage non supervisé.....	52
Figure III.20 : Modèle d'apprentissage de la connexion W_{ij} entre deux neurones.....	53
Figure III.21 : Réseaux multicouche.....	55
Figure.III.22 :Réseaux à connection loctales	55
Figure III.23 :Réseaux à connexions récurrentes	56
Figure III.24 :Réseaux à connexion complexe	56
Figure III.25 : Perceptron à une seule couche	57
Figure III.26 :Perceptron multicouche	58
Figure IV.1. Schéma de module photovoltaïque.....	63
Figure IV.2 Caractéristique I(V) d'un module pour éclairement solaires variable.....	64
Figure IV.3. Caractéristique P-V d'un module pour température constante ($T=25^{\circ}$) et éclairement solaire variable	64
Figure IV.4. Caractéristique I(V) d'un module pour Température variable.....	65

Figure IV.5. Caractéristique P(V) d'un module pour Température variable.....	65
Figure IV.6. Schéma bloc de l'algorithme P&O.....	66
Figure IV.7. Modèle de simulation du GPV adapte par la commande MPPT (P&O).....	67
Figure IV.8. Allure de la puissance en fonction de temps pour (T=25°C, G=600W/m ²).....	68
Figure IV.9. Allure de la puissance en fonction de temps pour (T=25°C, G=800W/m ²).....	68
Figure IV.10. Allure de la puissance en fonction de temps pour (T=25°C, G=1000W/m ²).....	69
Figure IV.11. : <i>Modèle de simulation du GPV adapte par la technique MPPT [RNA]</i>	70
Figure IV.12. <i>Formation du RNA avec MATLAB</i>	71
Figure IV.13. <i>Allure de la puissance à la sortie de l'hacheur par la technique RNA (T=25°, E= 1000, 800, 600 W/M²)</i>	72
Figure IV.14. <i>Allure de la puissance à la sortie de GPV (T=25°, E= 1000, 800, 600 W/M²)</i>	72

Liste des tableaux

Tableau II.1: <i>Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques.....</i>	18
Tableau IV.1. <i>les caractéristique électrique de la cellule étudié.....</i>	62

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles.

La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique etc...

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Energies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Dans ce mémoire, on a fait la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par des commandes numériques (commande MPPT : perturbation et observation / RNA) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. L'objectif de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC adapté par la commande numérique lors qu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et déterminer sa puissance de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peut utiliser comme un générateur d'électricité.

Pour décrire cela, ce mémoire structuré comme suit :

- Le premier chapitre expose en générale les énergies renouvelables.
- Dans deuxième chapitre, on fait une généralité sur les générateurs photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on fait un rappel sur les générateurs PV et leurs performances.
- Dans le chapitre trois, on étudie quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC basée sur contre réaction de puissance, par suit en représente les commandes MPPT (P&O, InC, RNA).
- Dans Le quatrième chapitre, on étudie une modélisation et une simulation par MATLAB- SIMULINK de chaque élément du système PV réalisé (générateur photovoltaïque, convertisseur survolteur et commande MPPT [« perturbation et observation », et Réseau de neurone artificielle]).
- A la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

Généralité sur l'énergie renouvelable

I.1 INTRODUCTION :

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie.

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre, de la biomasse humide ou sèche à une échelle de temps compatible avec l'histoire de l'humanité. Ce n'est pas le cas des combustibles fossiles et nucléaires [1].

I.2 ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE:

Le flux solaire peut être également converti directement en énergie calorifique (chaleur) par l'intermédiaire de capteurs solaires thermiques. Cette technique est applicable au chauffage des habitations, des piscines, à la production d'eau chaude sanitaire, ou encore au séchage des récoltes (fourrage, céréales, fruits). Le problème de conversion se pose pour l'électricité solaire en d'autres termes que pour le chauffage solaire. [2]. [3].

I.2.1 LES CAPTEURS SOLAIRE THERMIQUES :

La chaleur est récupérée grâce à un fluide (eau + antigel ou air) caloporteur, qui s'échauffe en circulant dans un absorbeur placé sous un vitrage. Celui-ci laisse pénétrer la lumière solaire et minimise les pertes par rayonnement infrarouge de l'absorbeur en utilisant l'effet de serre. Ce vitrage permet en outre de limiter les échanges de chaleur avec l'atmosphère (Figure 1.1).

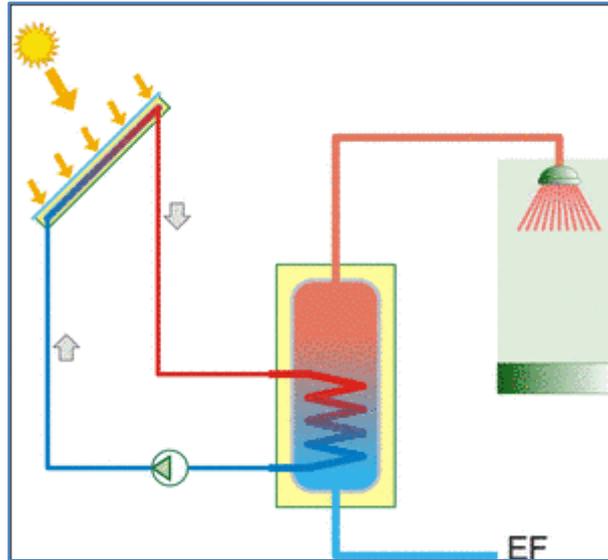


Figure I.1 : capteur thermique solaire

I.2.2 PROCESSUS DE CONVERSION THERMOMECHANIQUE :

Comme les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire, la chaleur peut être transformée en électricité par le processus thermodynamique et plus particulièrement thermomécanique. Il y a plusieurs façons de réaliser cette transformation : par utilisation du moteur à pistons, ou de la turbine à gaz.

Il reste à résoudre le problème de conversion, nécessitant de la chaleur, la limite supérieure du rendement de conversion de la chaleur solaire en électricité est donnée par le rendement de Carnot [2].

$$\frac{T_{chaud} - T_{froid}}{T_{chaud}} \quad \text{I.1}$$

T: étant mesuré en Kelvin à partir de zéro absolu.

On peut voir à partir de cette formule ci-dessus, que le rendement augmente avec la température de la source chaude. Plus précisément, c'est la différence de température entre les sources chaude et froide qui régissent le rendement, mais en pratique la température de la source froide reste inchangée et dépend de l'agent réfrigérant, en général l'eau.

En conséquence, une centrale électrique solaire thermomécanique nécessite généralement une alimentation en eau : ceci peut s'avérer être un facteur restrictif pour l'implantation d'installations dans les zones arides.

En conclusion, nous pouvons dire que le rendement d'un générateur thermomécanique dépend directement de la température de sortie des capteurs solaires qui, de ce point de vue doit être la plus élevée possible. Cette température est directement liée au facteur de concentration. Sachant qu'un générateur avec un facteur de concentration élevé aura une surface de captation plus faible qu'un générateur de même puissance dont le facteur de concentration est moindre.

I.2.3 LE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE :

On désigne par 'solaire thermodynamique', l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique (et électrique) à travers un cycle thermodynamique.

Ces techniques sont encore, pour l'essentiel, dans un état expérimental. Une revue des principales techniques exploitées est donnée ci-après :

I.2.4 LES ASPECTS TECHNIQUES :

Toute installation thermodynamique solaire doit remplir les mêmes fonctions pour transformer l'énergie du rayonnement incident en énergie électrique avec la meilleure efficacité possible.

On les examine ci-après dans l'ordre suivant :

- la concentration du rayonnement sur l'entrée du récepteur,
- son absorption sur les parois du récepteur et la transformation de son énergie en chaleur,
- le transport et, éventuellement, le stockage de cette chaleur,
- sa délivrance à un cycle thermodynamique associé à un alternateur pour la production d'électricité.

I.2.5 LA CONCENTRATION :

Pour transformer le rayonnement solaire en chaleur, il suffit en principe de le réceptionner sur une plaque noire. Pour travailler à température élevée, ce qui est nécessaire ici pour alimenter un cycle thermodynamique performant, il faut diminuer fortement la surface de réception pour maintenir, en proportion, ces pertes à un niveau raisonnable.

C'est ce que l'on fait en disposant devant le récepteur une optique qui concentre sur celui-ci le rayonnement capté sur une surface bien supérieure. On caractérise la performance

du système par le chiffre de sa 'concentration' qui est le rapport de la surface de collecte sur la surface du capteur.

Dans la pratique cette optique est systématiquement constituée de miroirs.

I.2.6 LA RECEPTION DU RAYONNEMENT :

Il faut maintenant absorber le rayonnement concentré sur une surface noire (ou dans un volume semi transparent, noir dans son épaisseur), et de ce seul fait absorbante pour le spectre visible (et donc pour le spectre solaire qui en est énergétiquement très proche), et transférer la chaleur ainsi générée à un fluide caloporteur.

I.2.7 LE TRANSPORT ET LE STOCKAGE DE LA CHALEUR :

LA TRANSFORMATION THERMOELECTRIQUE DE L'ENERGIE RECOLTEE :

Cette transformation se fait le plus souvent de manière tout à fait conventionnelle grâce à une turbine à vapeur d'eau couplée à un alternateur [4].

I.3 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 utilise les technologies de combustion et les chaudières à eau chaude ou les systèmes à vapeur basse pression pour 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 [6].



Figure I.2 : *Le bois source de l'énergie Biomasse [6].*

I.4 ENERGIE HYDRAULIQUE:

Utilisée depuis environ 3 000 ans, la force de l'eau fournit aujourd'hui, en plus de l'énergie mécanique, de l'énergie électrique. Cette électricité, dite " houille blanche ", participe grandement au développement énergétique propre. C'est une énergie solaire et renouvelable, car le soleil est à l'origine du cycle de l'eau, dont est issue l'énergie hydraulique. [4]



Figure I.3 : *Energie hydraulique.*

I.4.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

L'énergie d'un cours d'eau ou d'une chute d'eau fait tourner une petite turbine (une hélice) qui crée de l'énergie mécanique, convertie par un alternateur en électricité.

La puissance et l'énergie produite dépendent du débit et de la hauteur de chute. Le cours d'eau doit donc garder un débit minimum quelle que soit la saison pour assurer une production d'électricité même en période d'étiage.

Dans la majorité des cas, une partie du cours d'eau est dérivée par un canal d'amenée pour obliger l'eau à passer dans la turbine. Si le débit est trop faible, il est possible de stocker l'eau dans un réservoir tampon et d'ouvrir les vannes du canal d'amenée quelques heures par jour. La production d'électricité peut être donc continue ou discontinue en fonction des ressources hydrauliques.

I.4.2 UTILISATION DE LA MICRO HYDRAULIQUE :

Pour un usage domestique, tout appareil électrique à petite consommation peut fonctionner sur une installation micro hydraulique (microcentrale) : réfrigérateurs, ampoules, petit électroménager, Hi-fi et vidéo, appareils de télécommunication, etc.

Une vigilance particulière est à apporter à l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (URE), afin d'éviter les dépenses inutiles d'énergie. L'électricité produite peut éventuellement être stockée dans des batteries, si des besoins importants sont concentrés sur une courte durée [4].

I.5 GEOTHERMIE :

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 ses 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 L'installation est

du rable et ne nécessite que peu d'entretien [7].

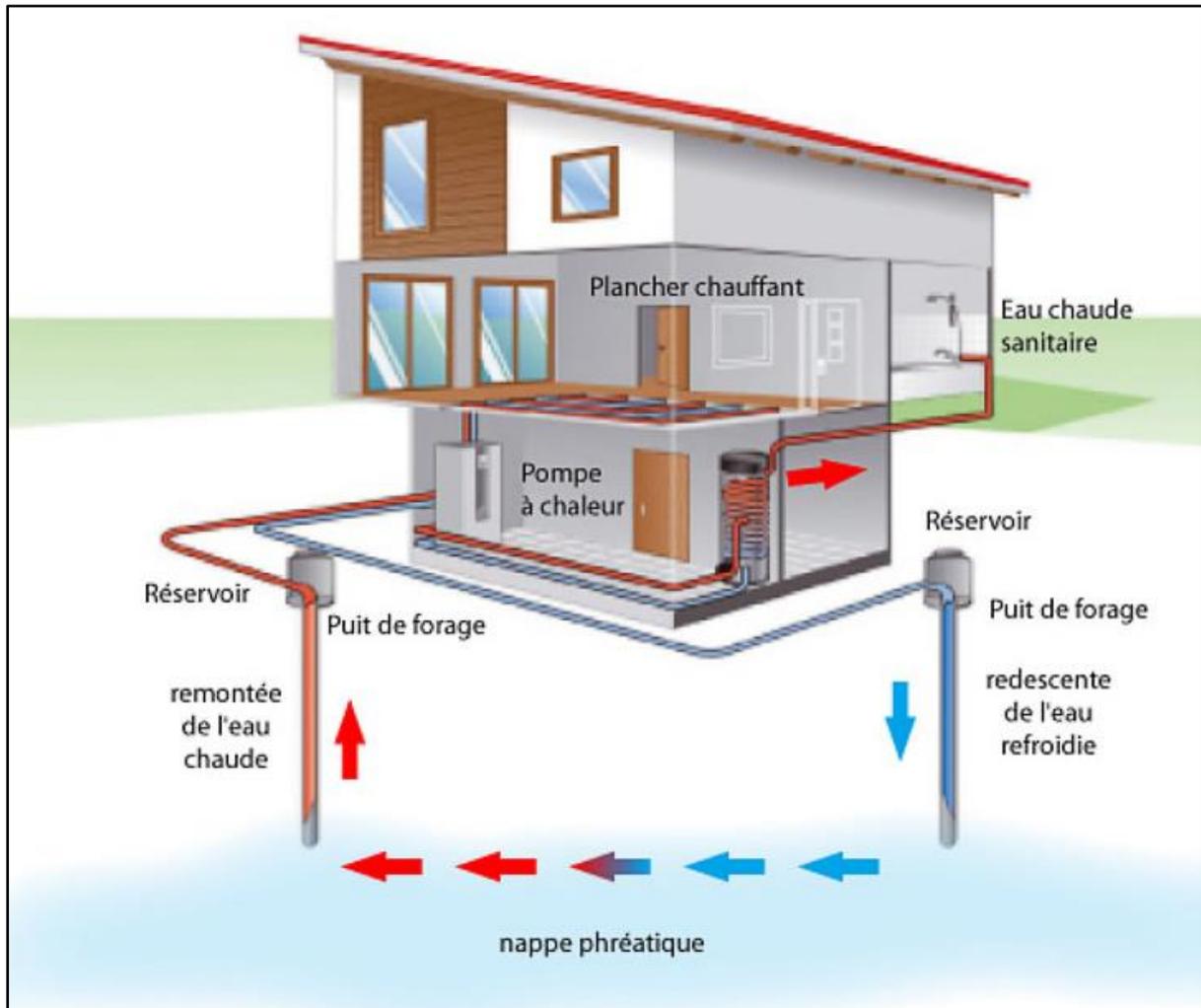


Figure I.4 : Principe de la géothermie [7].

I.6 LES CENTRALES SOLAIRES OU PHOTOVOLTAÏQUE :

Ces centrales produisent de l'électricité avec l'énergie solaire en utilisant les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux. [1]



Figure I.5 : *Photo d'une centrale solaire [1].*

Avantage :

- Acceptation du public
- Adapté aux pays chauds et aux sites isolés
- L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- Frais de maintenance relativement faibles.

Inconvénients :

- Coût encore élevé Puissance assez faible
Disponibilité [1]

I.7 L'ENERGIE EOLIENNE :

Cette énergie est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Cette hélice est montée sur un arbre qui est relié à des systèmes mécaniques qui servent à moulinet le grain ou à pomper de l'eau, soit à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [9].

Les éoliennes sont une forme très ancienne d'exploitation du vent. Une importante évolution 1970-2000. Une éolienne qui est un dispositif pour extraire de l'énergie cinétique du vent en la transformant en énergie mécanique ou en énergie électrique. En enlevant une certaine partie de son énergie cinétique le vent doit ralentir mais seulement cette masse d'air qui traverse le disque du rotor sera affectée [10].



Figure I.6 : *Une ferme d'éoliens [8].*

A) CLASSIFICATION DES TURBINES EOLIENNES :

Les moteurs éoliens utilisés pour capter l'énergie du vent peuvent être classés en deux catégories distinctes [11].

A -1) Les machines à axe horizontal :

- Rotor avec pâles.
- Transmission mécanique avec arbre plus boîte de vitesse.
- Génératrice.
- Nacelle qui supporte le rotor.
- Système d'orientation.
- Mât qui rapporte la nacelle.
- L'axe du générateur.
- Les machines à vent classiques.
- Les éoliennes lentes.
- Les éoliennes rapides.

A -2) Les machines à axe vertical :

- Les machines à traînées différentielles.
- Les machines à écran.
- Les machines à clapets battants.
- Les machines à pales tournantes.
- Les machines à variations cycliques d'incidences, à aubes fixes et aubes mobile

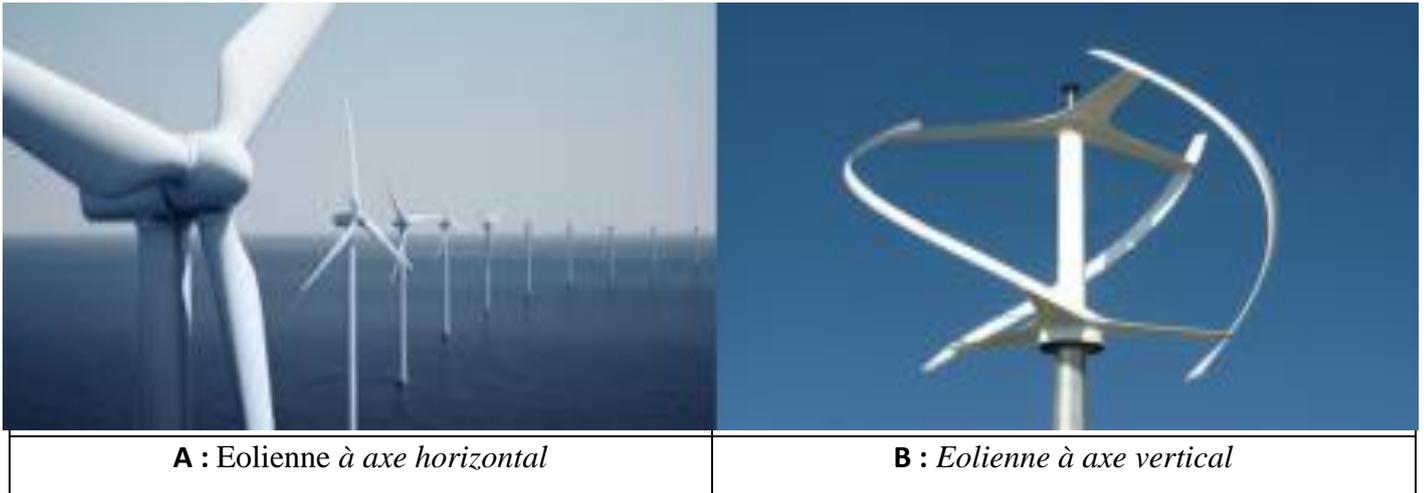


Figure I.7 : Eolienne à *axe horizontal* (A) ; Eolienne à *axe vertical* (B) [8]

I.8 L'ENERGIE RENOUVLABLE :

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité.

Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées. La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche. Aussi est-il important que chacun de nous surveille au plus près sa propre consommation d'énergie.

Globalement, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité reste encore faible. Selon le dernier " Inventaire sur la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde ", 20% du courant produit sur la planète est d'origine renouvelable. L'essentiel étant toujours issu des combustibles fossiles, tels que le pétrole ou le charbon (62,7%) et par l'énergie nucléaire (17,1%) figure(I.6).

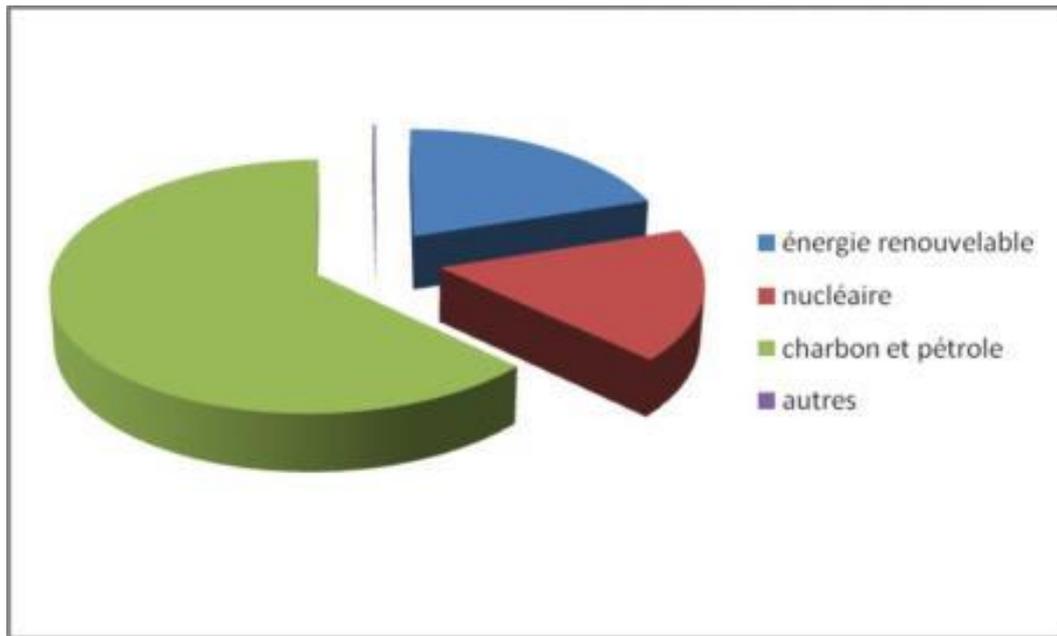


Figure I.8 : La part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale [1].

Qu'un électron sur cinq soit " propre ", cela n'est déjà pas si mal. Mais ce chiffre encourageant masque une grande disparité entre les sources d'énergies renouvelables. À elle seule, l'hydroélectricité génère 92,5% de l'électricité issue des énergies électriques. Les utilisations de la biomasse produisent 5,5% du courant mondial " vert ", la géothermie 1,5%, l'éolien 0,5% et les techniques solaires y contribuent seulement pour 0,05%.

Toutefois, ces grandes masses sont extrêmement variables d'un pays à l'autre. [1]

I.9 CONCLUSION :

Les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie. Elles donnent aussi plusieurs :

Avantage :

- Plus les sources sont variées, plus l'indépendance énergétique est assurée ;
- Facilité d'installer, d'utiliser et de combiner plusieurs sources en même temps ;
- Pas d'émission de CO₂ ;
- Pour la plupart des méthodes.
- Coût au kWh fixe, faible et stable ;
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.

Inconvénients :

- Investissement important.
- L'installation doit s'intégrer dans l'environnement.
- Variabilité de la production de l'éolien qui dépend d'un vent aléatoire .
- Projets de longue durée.

Le stockage de l'électricité.

Il ne faut pas oublier qu'il faut commencer par l'optimisation des consommations, ceci se réalise par une conception architecturale bioclimatique accompagnée par des équipements ménagers économes.

Une fois les consommations diminuées (mais pas le confort), nous pouvons envisager d'investir dans des systèmes de production d'énergie.

Le chapitre qui suit on avoir donné une étude d'énergie photovoltaïque. [8]

CHAPITRE II :

Systeme photovoltaïque

II.1 INTRODUCTION :

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations :

- non autonomes ou «gridconnected», rattachées au réseau de distribution électrique. Dans Les systèmes reliés aux réseaux, les consommateurs standards AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur). Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public et les demandes de puissance qui existent la capacité de production du générateur sont attachées sur le réseau.

Autonomes ou « stand-alone », qui sont le propose de cette étude, ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est-elle assurée par un système de stockage d'énergie [12].

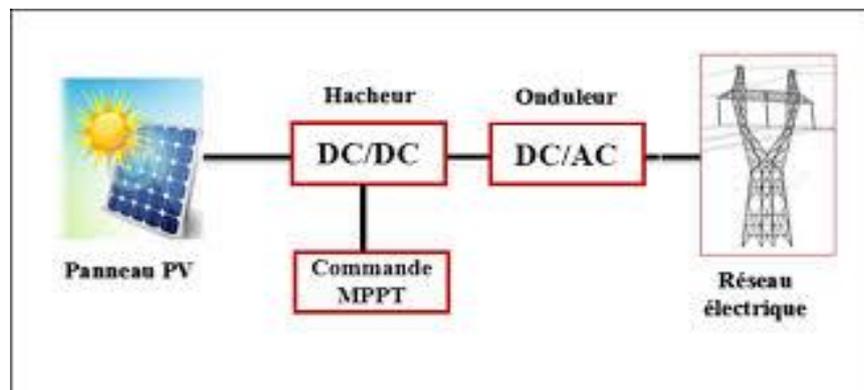


Figure II.1 : Schéma simplifié d'un système PV.

II.2 PRINCIPE D'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule [22].

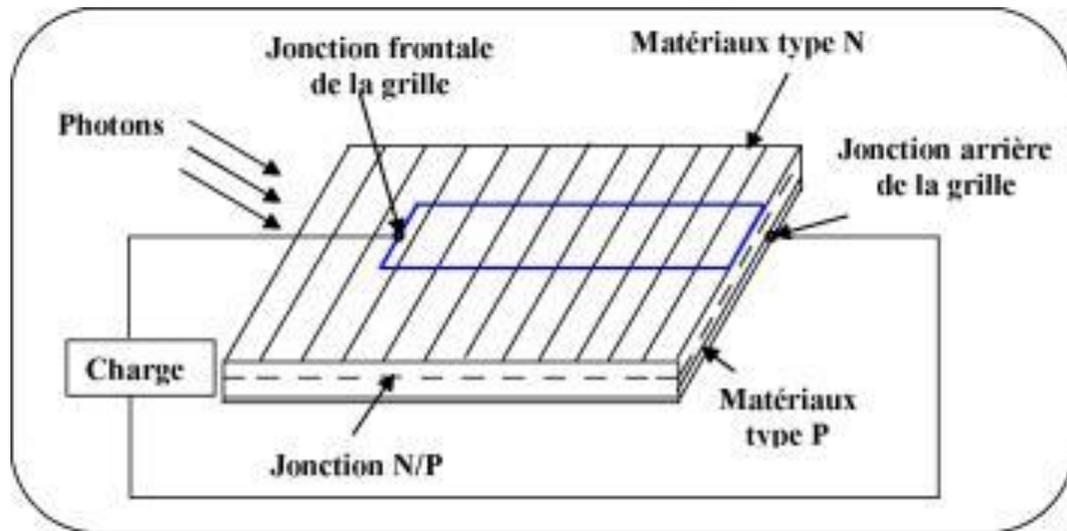


Figure II.2 : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque [13].

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{OC} . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit I_{SC} et dépend fortement du niveau d'éclairement. [14].

II.3 TECHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes:

- la première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 17 %.
- Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le poly cristallin l'efficacité et de 11 à 15 %.
- La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe est la deuxième

technologie utilisée. L'efficacité est moindre, variant de 5 à 9 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.

- la troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi-conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium (CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs), cette technologies des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant (D'après Total énergie revue du 9 juillet 2006) [14].

Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaines d'application
	Théorique	en labo.	disponible	
Silicium monocristallin	27	24.7	14-16	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium Amorphe	25	13	6-8	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de Gallium GaAs	29	27.5	18-20	systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIS	27.5	18.2	10-12	appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellurure de Gadmuim CdTe	28.5	16	9-11	modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

Tableau II.1: Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques [14].

La Figure (II.3) est représentée les trois types principaux des cellules photovoltaïques

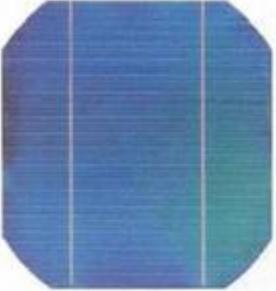
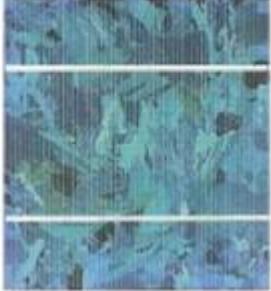
Le Monocristallin	Le Polycristallin	L'Amorphe
		
Rendement = 13 à 17 %	Rendement = 11 à 15 %	Rendement = 5 à 9 %

Figure II.3 : Différents types de la cellule photovoltaïque.

II.4 MODELISATION ELECTRIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE :

L'association en série ou en parallèle des cellules solaires encapsulées sous verre formant ainsi un module photovoltaïque pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu [23].

II.4.1.MODEL ELECTRIQUE DE BASE :

Le principe de l'effet photovoltaïque n'est autre que celui d'une diode, ainsi lorsque l'on éclaire la jonction PN, la cellule étant chargée par une résistance, on observe l'apparition d'un courant inverse I sous une tension en sens direct V . Une cellule photovoltaïque dans l'obscurité se comporte donc comme une diode classique et elle obéit à la loi Shockley

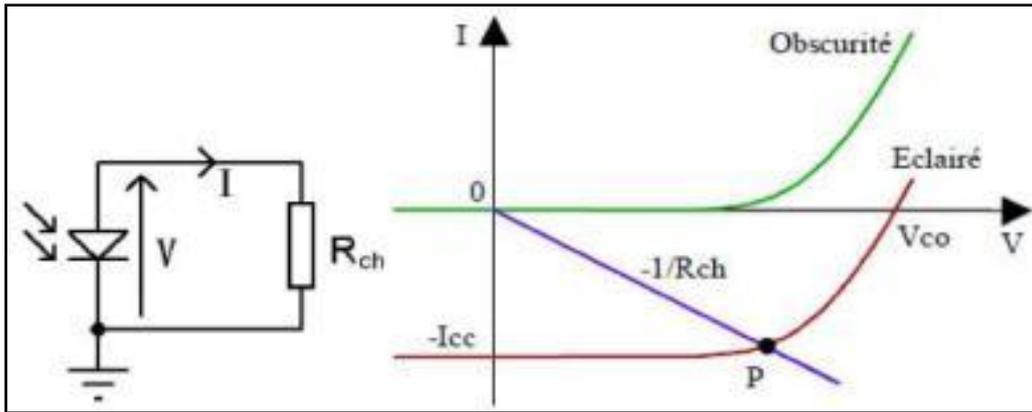


Figure II.4: Approximation de la caractéristique courant-tension du panneau photovoltaïque [23].

La caractéristique d’une jonction PN non éclairée est celle d’une diode (idéale). En présence d’un éclairage, cette caractéristique est décalée vers le bas d’un courant I_{cc} (courant de court-circuit). De même, elle coupe l’axe des abscisses en V_{co} (tension maximale de circuit ouvert).

Les résultats précédente de la figure (II. 1) permet d’aboutir aux modèles électriques équivalents de la cellule photovoltaïque développées par la suite [23].

II.4.2.MODELE A UNE DIODE (SIMPLE EXPONENTIELLE):

Le fonctionnement d’un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établit par Shockley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [16].

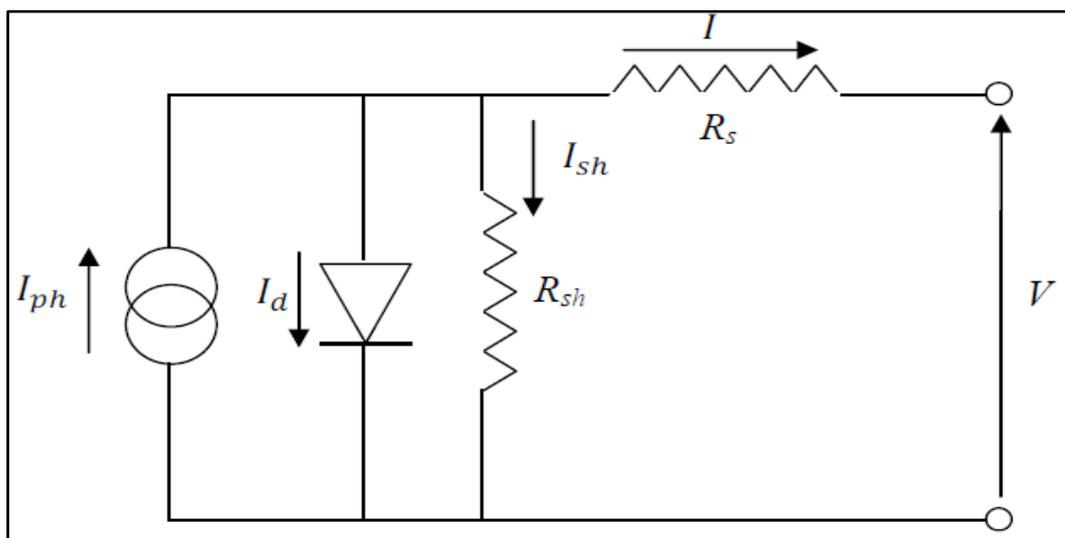


Figure II. 5 : Schéma équivalent d’une cellule PV modèle à une diode.

- La résistance série (R_s) est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière.
- La résistance parallèle (R_{sh}) rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si cette pénétration est profonde).

Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules.

La caractéristique I-V du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent de la figure II-2 (largement utilisé). Ce circuit comporte une source de courant dépendante de l'éclairement et une diode en parallèle, ainsi qu'une résistance série R_s et parallèle (shunt) R_{sh} pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule. Ce modèle appelé aussi modèle à quatre paramètres; il a été proposé par Townsend et Beckmann [18].

D'après la loi de nœud de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad \text{II.1}$$

I : courant généré par cellule.

I_{ph} : le photon courant.

I_{sh} : le courant circulant dans la résistance shunt.

I_d : le courant circulant dans la diode.

Le courant circulant dans la diode est donné par:

$$I_d = I_0 \left[\exp \left\{ \frac{V_d}{V_t} \right\} - 1 \right] \quad \text{II.2}$$

A partir de la loi de maille:

$$V = V_d - R_s * I \quad \text{II.3}$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad \text{II.4}$$

Donc:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{(V+R_s I)}{V_t} \right\} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad \text{II.5}$$

- I : Courant généré par la cellule [A].
- V : Tension à la borne de la cellule [V].
- I_{ph} : photo-courant [A].
- R_s : Résistance série [Ohm].
- R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ohm].

$$V_t = \frac{nKT}{q} \quad \text{II.6}$$

- V_t : tension thermique.
- q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ [C].
- K : constant de Boltzmann.
- T : température de cellule [k].

$$I_d = I_o \left[\exp \left\{ \frac{q(V+R_s I)}{nKT N_s} \right\} - 1 \right] \quad \text{II.7}$$

N_s : nombre de cellule série.

Le photon –courant est proportionnelle à l'irradiation et la température est donné par la relation suivant :

Il faut noter que ces deux résistances (R_s et R_{sh}) sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser R_s de telle sorte que R_{sh} soit très important.

Le photo-courant I_{ph} varie avec l'irradiante, il est déterminé par rapport à des valeurs données aux conditions de référence:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} [I_{sc} + K_i \times (T - T_n)] \quad \text{II.8}$$

G : Irradiation [W/m^2].

G_n : Irradiation de référence [W/m^2].

I_{sc} : courant de court- circuit [A].

T et T_n : Température de cellule et de référence [K].

k_i : coefficient de température du photo-courant (ou courant de court-circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression :

$$I_0 = I_{rs}(T/T_n)^3 \times \exp \left[\left(\frac{q \times E_{g0}}{nK} \right) \times \left(\frac{1}{T_n} \right) - \left(\frac{1}{T} \right) \right] \quad \text{II.9}$$

Eg0 : Energie de ‘gap’ de la cellule.

Irs : courant de saturation inverse.

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left\{ \frac{qV_{oc}}{nKTN_s} \right\} - 1} \quad \text{II.10}$$

Voc : la tension a vide.

$$I = \frac{G}{G_n} [I_{sc} + Ki \times (T - T_n)] - I_o \left[\exp \left\{ \frac{q(V+R_s I)}{nKTN_s} \right\} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad \text{II.11}$$

II.4.3. MODELE A DEUX DIODES (DOUBLE EXPENETIELLE) :

Dans ce cas, deux diodes ont été utilisées pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d’une part en surface du matériau et d’autre part dans le volume du matériau. Le schéma du .générateur photovoltaïque devient dans le cas de la figure II.7 [17].

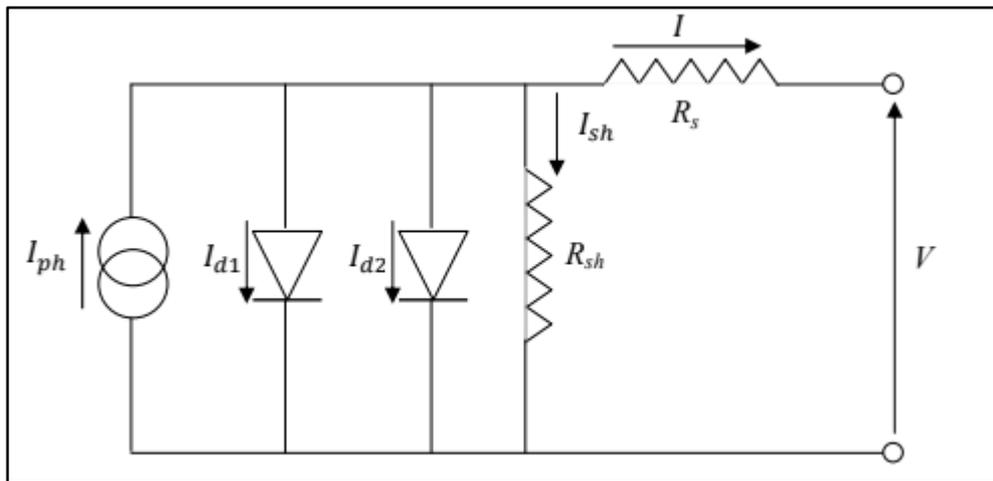


Figure II.6 : Schéma équivalent d’une cellule PV modèle à deux diodes.

Le courant fourni par la cellule I à partir de loi des nœuds est donné par :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad \text{II.12}$$

$$I_{d1} = I_{s1} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{A_1 K T} \right\} - 1 \right] \quad \text{II.13}$$

II.5. CARACTERISTIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES :

Il y a quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires :

- Le courant de court-circuit I_{cc} ;
- La tension en circuit ouvert V_{oc} ;
- Le facteur de forme ff ;
- Le rendement de conversion d'énergie η [19].

Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants, par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants).

En circuit ouvert ($R_c = \infty$, $I = 0$, $V = V_{oc}$) ou en court-circuit ($R_c = 0$, $I = I_{cc}$, $V = 0$), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance $P = V_{max} \times I_{max}$ fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale, et vaut P_{max} [12].

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure ci-dessous. Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle.

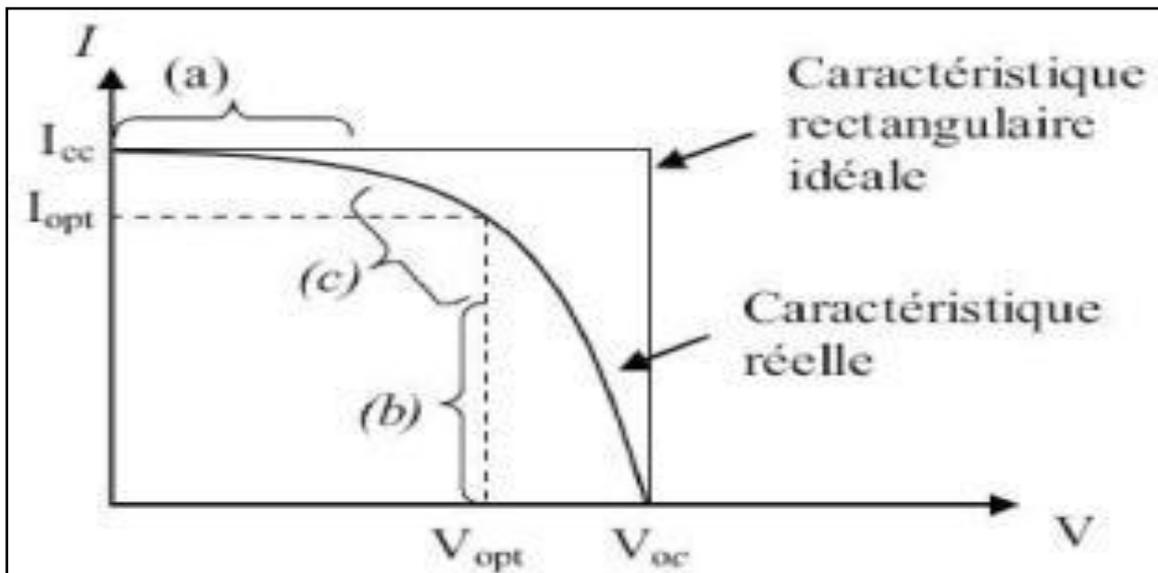


Figure II.7: Caractéristique $I-V$ d'une cellule photovoltaïque idéal et réelle [23].

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} ,
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement [20].

II.5.1 COURANT DE COURT CURCUIT (I_{CC}):

Le courant de court-circuit I_{cc} de la cellule photovoltaïque est déterminé lorsque la tension est nulle ($V=0$) dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie) [21].

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I_{cc})}{AKT} \right\} - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad \text{II.14}$$

I_{cc} : courant de court-circuit [A].

I_{ph} : courant photo-généré par le générateur solaire sous éclairement .

I_s : courant de saturation [A].

R_s : résistance série du générateur solaire [Ω].

R_{sh} : résistance shunt du générateur solaire [Ω].

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

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ [Coulomb].

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/K].

A un niveau d'éclairement standard (égale à 1 kW/m^2), l'effet de la résistance série est négligeable. Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photo-courant I_{ph} , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairement G [21].

$$I_{cc} = I_{ph} = C * G \quad \text{II.15}$$

II.5.2.TENSION A CURCUIT OUVERT(V_{OC}):

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt (c'est la tension maximale d'un générateur photovoltaïque) [15].

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right] \quad \text{II.16}$$

K :La constant de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ [Joules/Kelvin]).

T : La température de la cellule en [Kelvin].

q: La charge d'un électron= $1,602.10^{-19}$ [C].

I_S: le courant de saturation de la jonction [A]

II.5.3.FACTEUR DE FORME (FF):

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_M (I_M, V_M) de la courbe courant-tension (courant compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{OC}). Ce point P_M est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox ,Oy et les droites x=I_M et y=V_M passe par un maximum.[23].

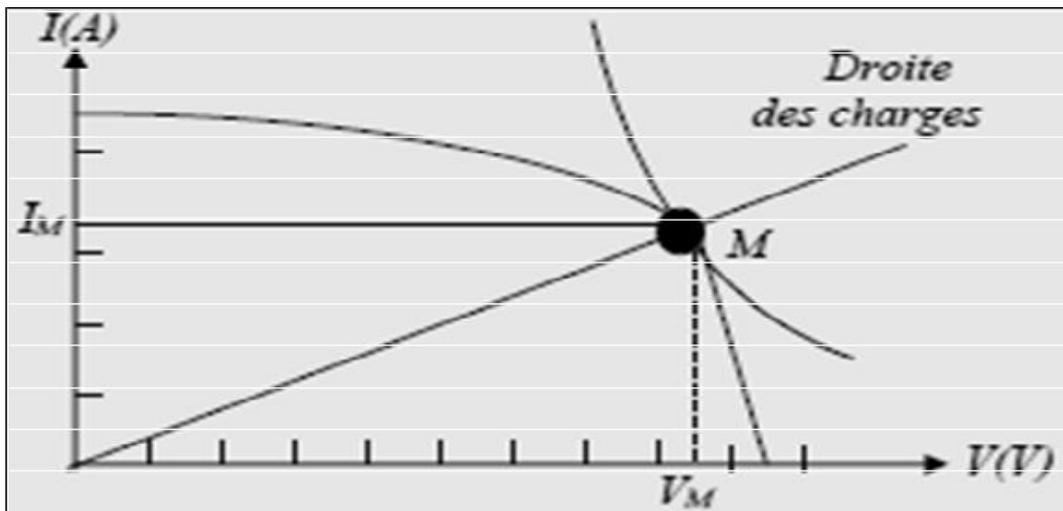


Figure II.8 : schéma d'une cellule élémentaire [23].

Le nom 'facteur de forme' (fill factor) dérive de la représentation graphique .Il est défini par la relation suivante:

$$ff = \frac{P_m}{V_{oc} * I_{cc}} = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{cc}} \tag{II.17}$$

La puissance maximale délivrée à la charge est présentée par le rectangle [I_M, V_M]:

$$P_m = V_m * I_m \tag{II.18}$$

II.5.4. RENDEMENT DE CONVERSION (η):

Le rendement η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule P_m et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{tn}} = \frac{ff * V_{oc} * I_{cc}}{P_{tn}} \quad \text{II.19}$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm^2 .

La densité de puissance incidente égale à : $\frac{P_{tn}}{S}$

S: section de la cellule.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [18].

III.6 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque à cet effet nous avons commencé par un aperçu sur les systèmes photovoltaïques, le principe de fonctionnement, le modèle mathématiques puis nous avons montrés les résultats de simulation d'un panneau photovoltaïque.

Dans la suite de notre travail nous allons étudier la méthode d'extraction de puissance maximale (MPPT) en utilisant la méthode P&O et RNA [5].

CHAPITRE III :

La commande du système photovoltaïque

III.1 INTRODUCTION :

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant mais ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale.

A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. [24]

La suite de chapitre est pour les réseaux de neurones alors nous allons diviser le chapitre de deux parties

Dans la première partie de ce chapitre nous allons expliquer le fonctionnement du convertisseur DC/DC et leurs types et les techniques nécessaires de MPPT.

Et dans la deuxième de ce chapitre nous allons présenter les réseaux neurones et leur architecture d'un point de vue général, on commence par donner une brève présentation du neurone artificiel. Ensuite les architectures et l'algorithme d'apprentissage et par suite les perceptrons et leur procédure de construction.

III.2 PARTIE 1 :

III.2.1 ETUDE DU FONCTIONNEMENT DU CONVERTISSEUR STATIQUE(CS) :

Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC.

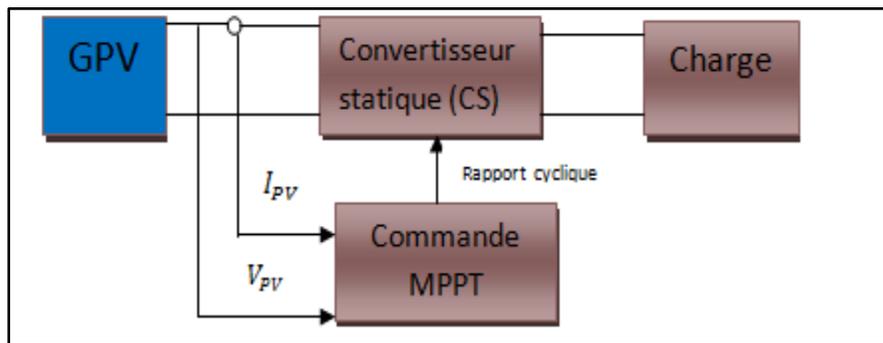


Figure III.1: *Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une Commande MPPT sur charge DC [24].*

Ce type de convertisseurs est utilisé pour transformer la tension continue en tension continue variable pour alimenter des appareils spéciaux. [24]

III.2.2 TYPE DE CONVERTISSEUR DC-DC :

On distingue trois types de convertisseurs DC-DC : Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_{out} > V_{in}$. Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_{out} < V_{in}$.

Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents qui comporte plusieurs topologies comme le BUCK-BOOST. [25]

III.2.3 CONVERTISSEUR BUCK :

Dans l'étude du convertisseur Buck. La figure (III.2) montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source.

L'ondulation de la tension de sortie donnée respectivement par :

$$V_s = \alpha \cdot V_e$$

$$\Delta i_L = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{L.f} \quad \text{III. 2}$$

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_L}{8C.f} = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{8C.L.f^2} \quad \text{III. 3}$$

Le convertisseur est donc abaisseur en tension.

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

$$I_L = I_S \quad \text{III. 4}$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes.

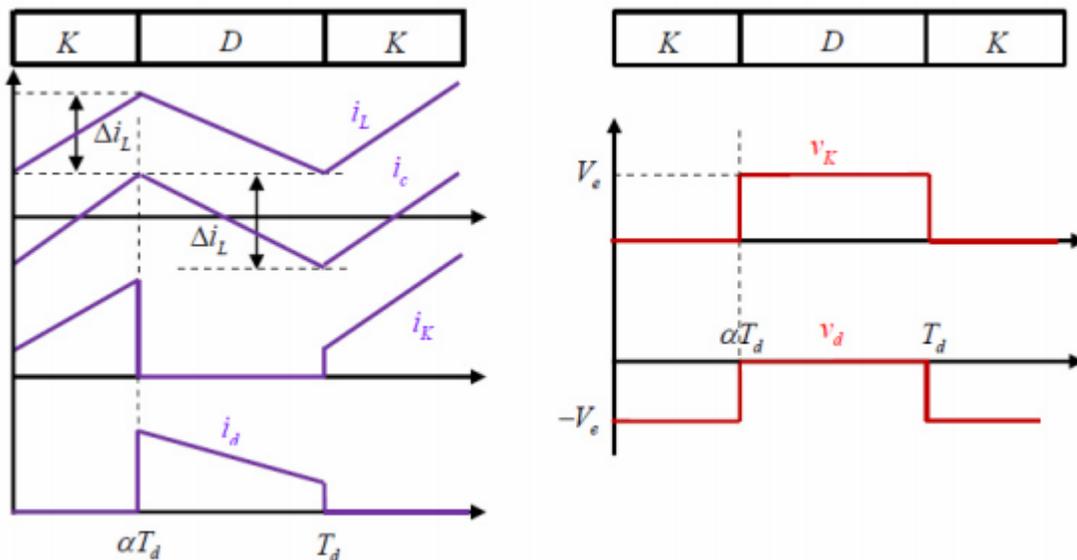
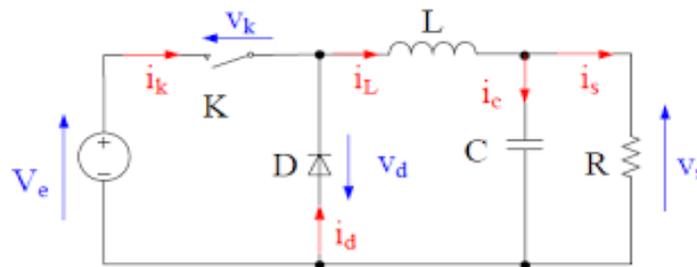


Figure III.2 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck [25].

En tension, on a :

$$V_{K_{\max}} = |V_{K_{\max}}| = V_e \quad \text{III.5}$$

En courant :

$$I_{K_{\max}} = I_{d_{\max}} = I_{L_{\max}} = I_L \frac{\Delta i_L}{2} \quad \text{III.6}$$

III.2.4 CONVERTISSEUR BOOST :

On considère un convertisseur DC-DC de type Boost. Il est composé essentiellement d'un interrupteur K (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode D l'interrupteur K est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe T_d et de rapport cyclique variable « a ». La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand K est fermé D est ouvert ; et quand K est ouvert, D est fermé. Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à aT_d et ouvert de aT_d à T_d . On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue).

On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La figure III.3 donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes [25].

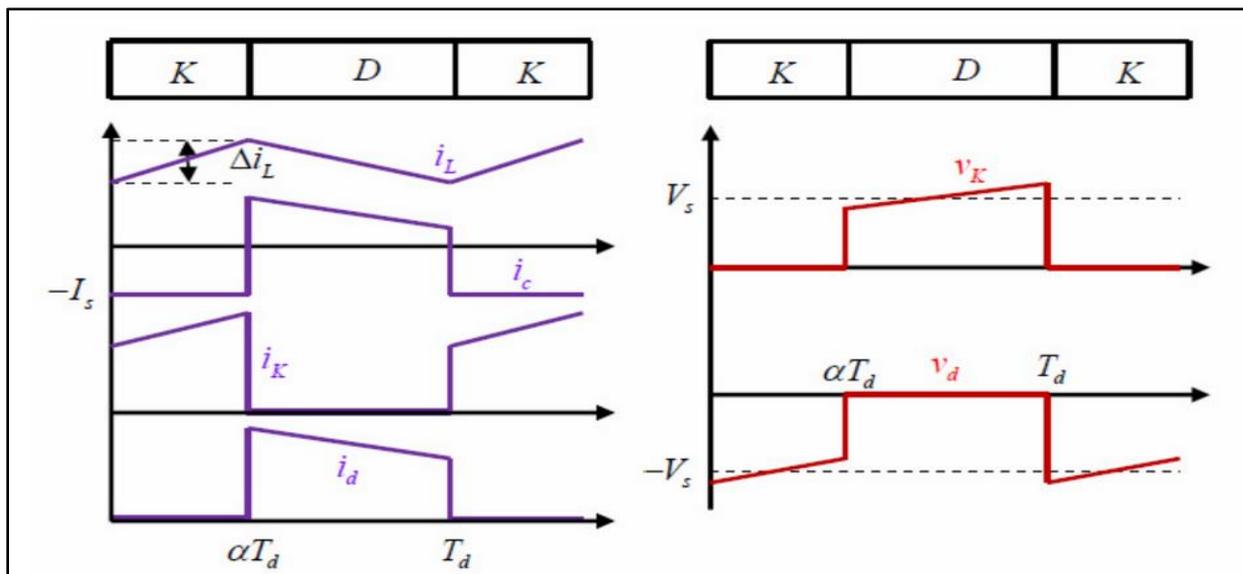
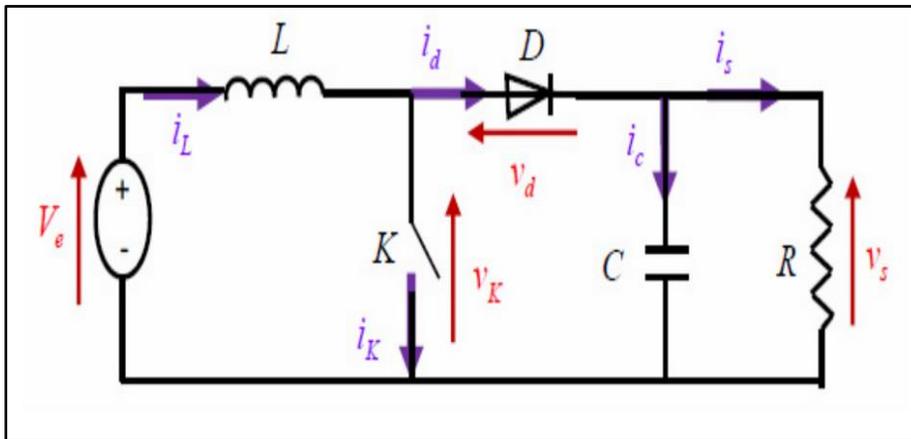


Figure III.3 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost [25]

D'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite).

Lorsque l'interrupteur \$K\$ est fermé (\$0 < t < a T_d\$), le circuit du convertisseur est (Figure III.4) :

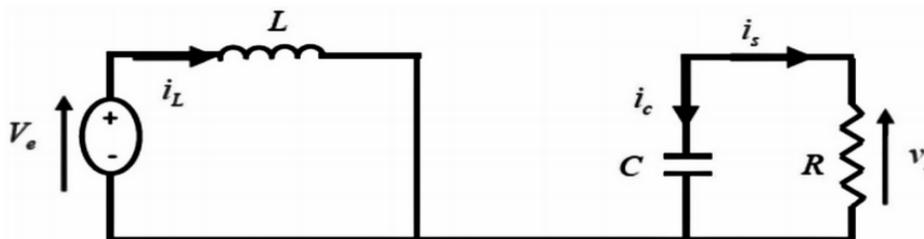


Figure III.4. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé [25].

$$L \frac{di_L}{dt} = V_c \quad \text{III.7}$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_c}{L} t \quad \text{III.8}$$

Avec I_{min} la valeur minimale du courant dans l'inductance.

A l'instant $t = \alpha T_d$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max}

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_c}{L} \alpha T_d \quad \text{III.9}$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert $\alpha T_d < t < T_d$ le circuit du convertisseur sera comme montré dans la figure III.5



Figure III.5. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert [25].

$$L \frac{di_L}{dt} = V_c - V_s \quad \text{III.10}$$

$$I_L = I_{min} + \frac{V_c - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad \text{III.11}$$

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

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_c - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad \text{III.12}$$

Soit $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$ l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (II.11) et (II.14), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad \text{III.13}$$

On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{1}{1-\alpha} I_e \quad \text{III.14}$$

De l'expression 2(11), on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_s}{L} T_d = \frac{\alpha V_c}{L f} \quad \text{III.15}$$

Avec f la fréquence de découpage.

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

$$C \frac{dV_s}{dt} = -i_s \quad \text{III.16}$$

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

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C \cdot f} = \frac{\alpha V_s}{(1-\alpha) R C f} \quad \text{III.17}$$

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

$$i_{k,max} = i_{d,max} = i_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad \text{III.18}$$

$$i_{k,max} = i_{d,max} = i_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad \text{III.19}$$

III.2.5 CONVERTISSEUR BUCK-BOOST :

La topologie et les formes d'ondes de courant et de tension obtenues de ce convertisseur sont présentées à la figure III.6. La tension moyenne est donnée par :

$$V_s = \frac{\alpha V_c}{1-\alpha} \quad \text{III.20}$$

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

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_c}{L_f} \quad \text{III.21}$$

Et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C_f} = \frac{\alpha^2 V_s}{(1-\alpha)RC_f} \quad \text{III.22}$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élévateur-inverseur en tension. Le courant moyen traversant l'inductance est donné par :

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad \text{III.23}$$

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

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

$$i_{k,max} = i_{d,max} = i_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2}$$

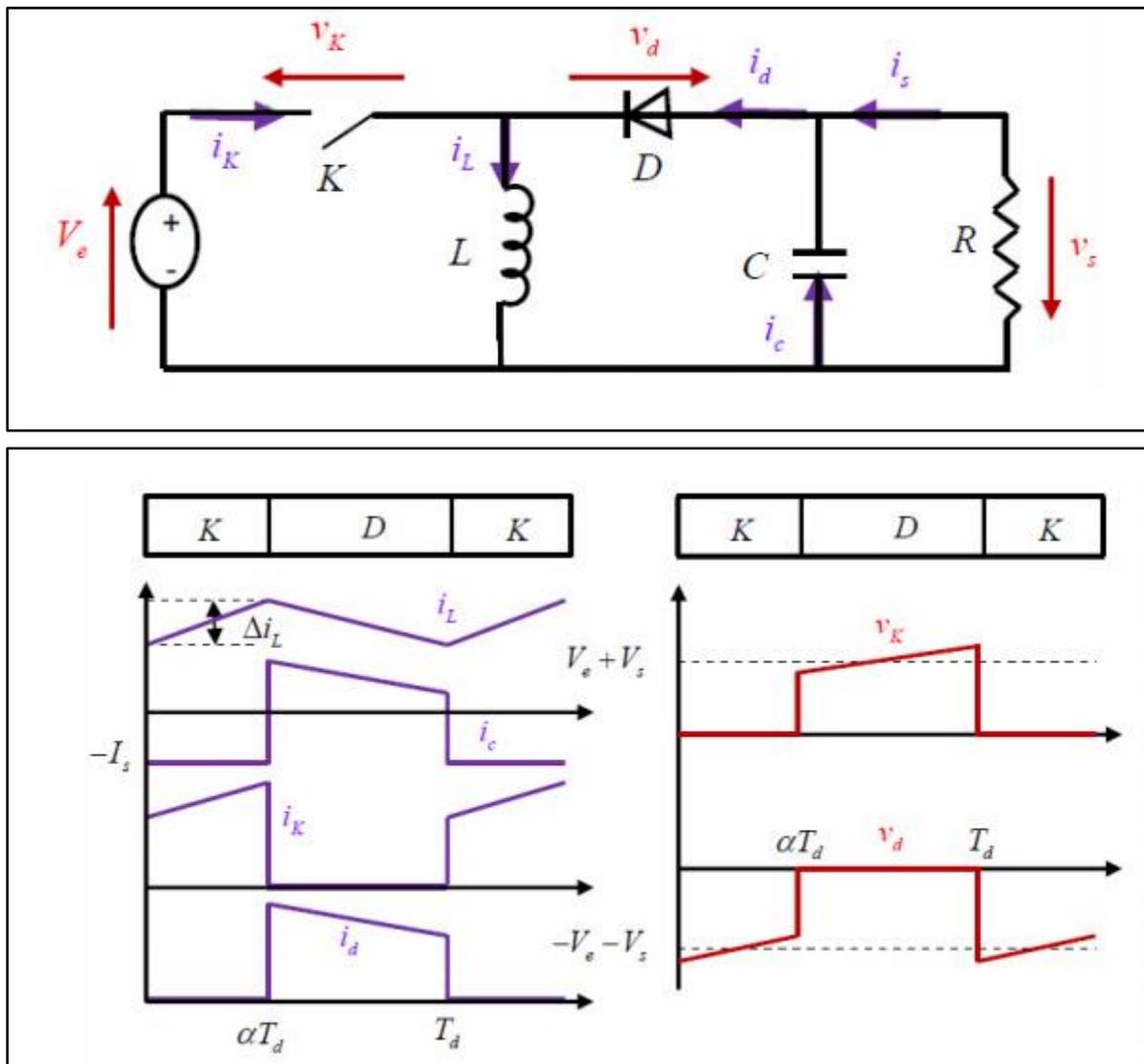


Figure III.6. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost [25]

III.3 RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE(MPPT) :

PRINCIPE :

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin.

Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le

générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale.

La figure III.7 représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. La commande MPPT est associée à un convertisseur statique permettant de faire une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge. [27] [26].

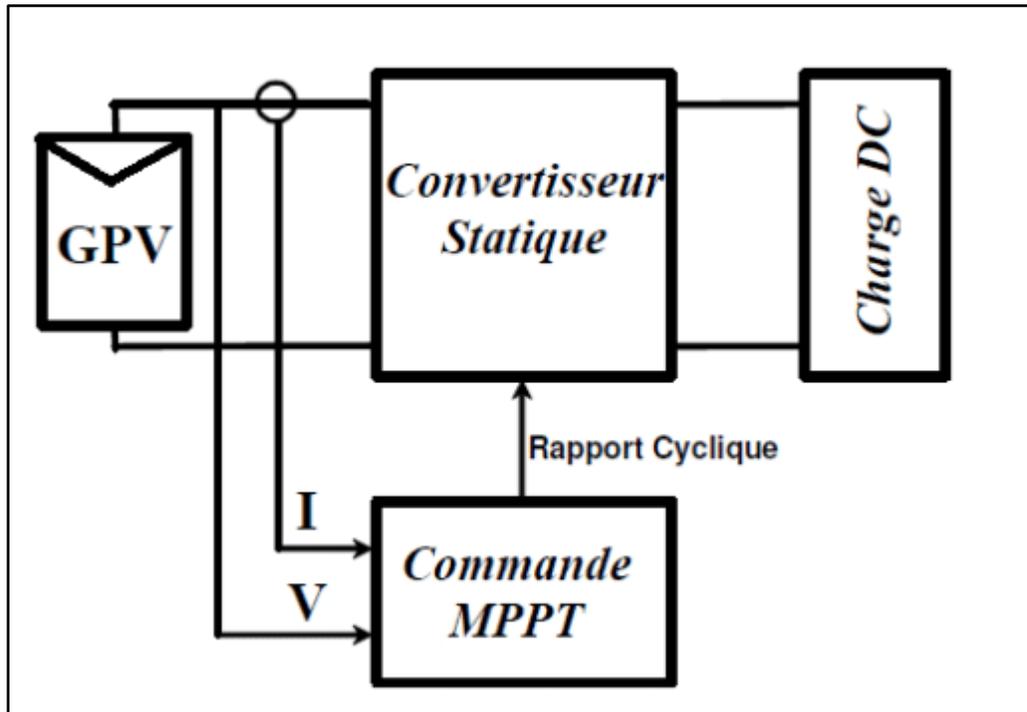


Figure III.7 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT [26].

III.3.1 LES TECHNIQUES DE COMMANDES MPPT :

Il existe de nombreuses méthodes et techniques de commande MPPT disponibles dans la littérature dont on cite trois méthodes classiques :

Perturbe and Observe (P&O), l'incrémentation de conductance (IncCon) et la méthode Hill Climbing [28]. Actuellement il existe des méthodes basées sur l'intelligence artificielle à savoir : logique floue, et réseau de neurones et les algorithmes génétiques.

III.3.2 LES COMMANDES MPPT CLASSIQUES :

❖ LA METHODE PERTURBE & OBSERVE (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure III.8, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , 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 $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [29].

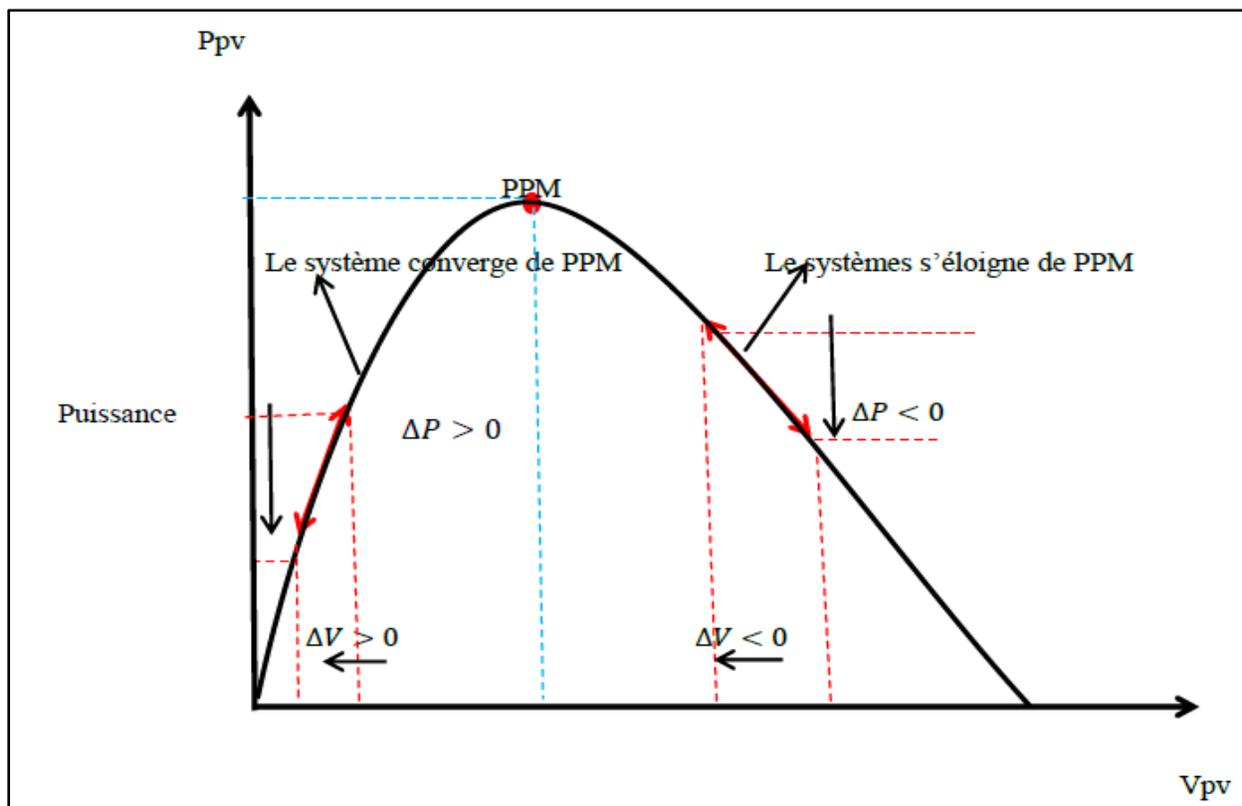


Figure III.8 : Schéma de convergence vers le PPM par P&O[26].

La figure III.9 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. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [26].

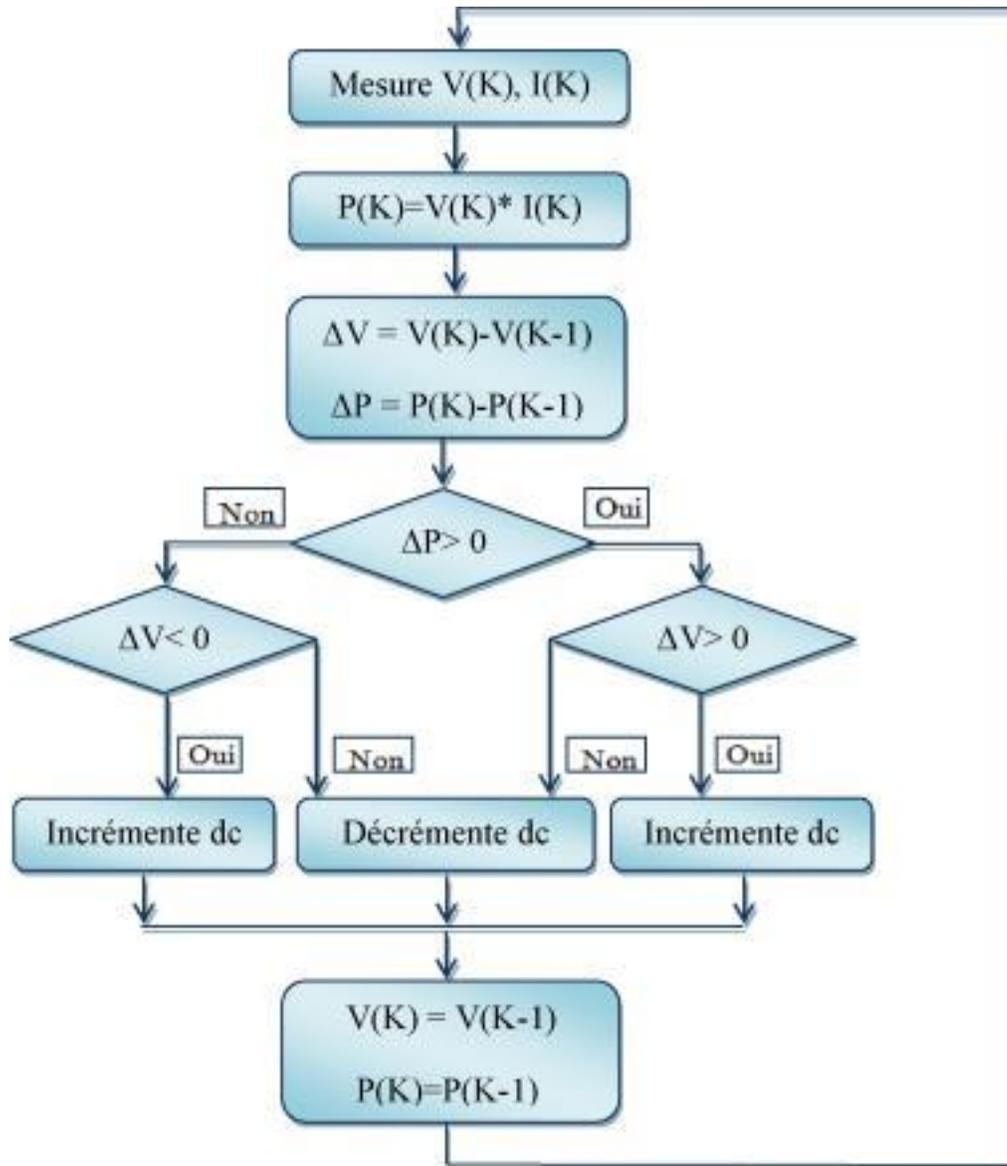


Figure III.9 : Algorithme de la méthode P&O [26].

Telle que :

P_{pvn} : la nouvelle puissance

P_{pvn-1} : l'ancienne puissance dans le temps (t-1).

$$\Delta V = V_{PVn} - V_{PVn-1} \quad \text{III.24}$$

$$\Delta P = P_{PVn} - P_{PVn-1} \quad \text{III.25}$$

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée malgré qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. En plus, et pour des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM [27] .

❖ METHODE D'INCREMENTATION DE LA CONDUCTANCE (INC) :

Dans cette méthode la tension de sortie et le courant de source sont contrôlés de façon à permettre au MPPT de calculer la conductance et l'incrément de la conductance, et de prendre la décision (augmenter ou diminuer le rapport de puissance).

L'algorithme d'incrément de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que si est nulle. Les caractéristiques du module photovoltaïque prouvent plus loin que la dérivée est supérieure à zéro à gauche du MPP et inférieure à zéro à droite du MPP.

Ce modèle est applicable seulement si à un instant donné la source non linéaire a un seul maximum dans toute la zone de fonctionnement. Autrement, il ne s'applique pas, l'impédance d'entrée du dispositif à contrôler par le MPPT doit être suffisamment grande pour éviter la perte de puissance, c'est : « **Gamme de validité et limitations du modèle** ». [30].

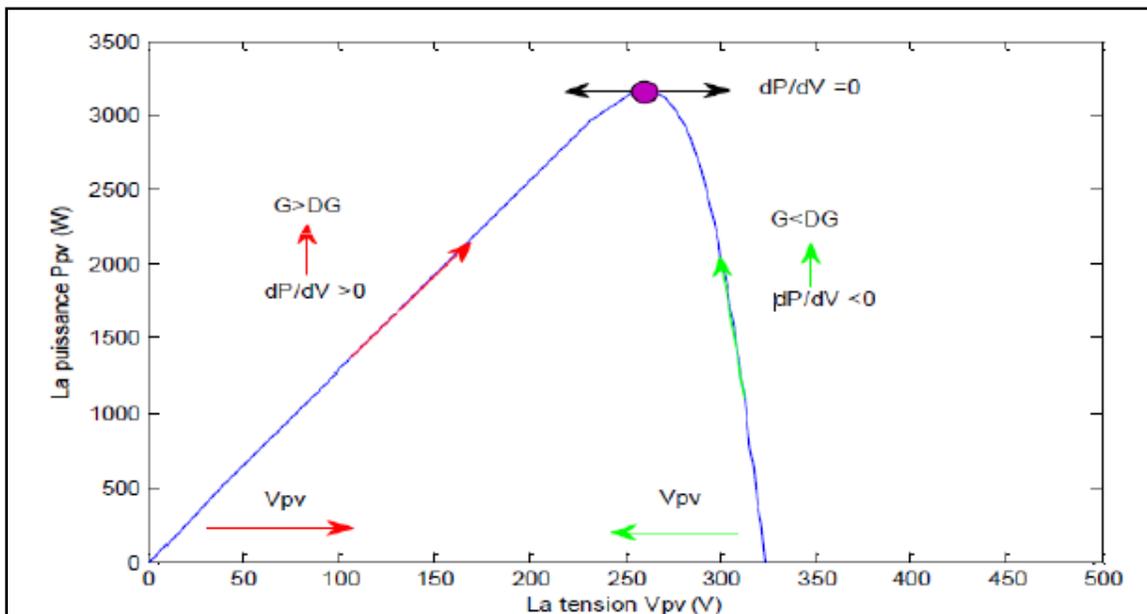


Figure III-10 : Principe de la commande MPPT de type (INC) [30].

La puissance de sortie d’une source peut s’écrire :

$$P = V \cdot I \tag{III.26}$$

En dérivant l’équation (III.26) par rapport à V et en divisant par V, on obtient :

$$\frac{I}{V} \cdot \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} - \frac{dI}{dV} \tag{III.27}$$

La conductance de la source est définie comme :

$$G = \frac{I}{V} \tag{III.28}$$

L’incrément de la conductance est défini comme :

$$\Delta G = \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad \text{III.29}$$

En général, la tension de sortie est positive, l'équation (III.27) nous montre que la tension de fonctionnement est au-dessous de la tension du MPP si la conductance est supérieure à l'incrément de la conductance et vice versa. Le travail de cet algorithme est cependant de chercher la tension pour laquelle. Ce concept est exprimé par :

$$\frac{dP}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \text{III.30}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \text{III.31}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \text{III.32}$$

Ceci est traduit par l'organigramme de la Figure suivante :

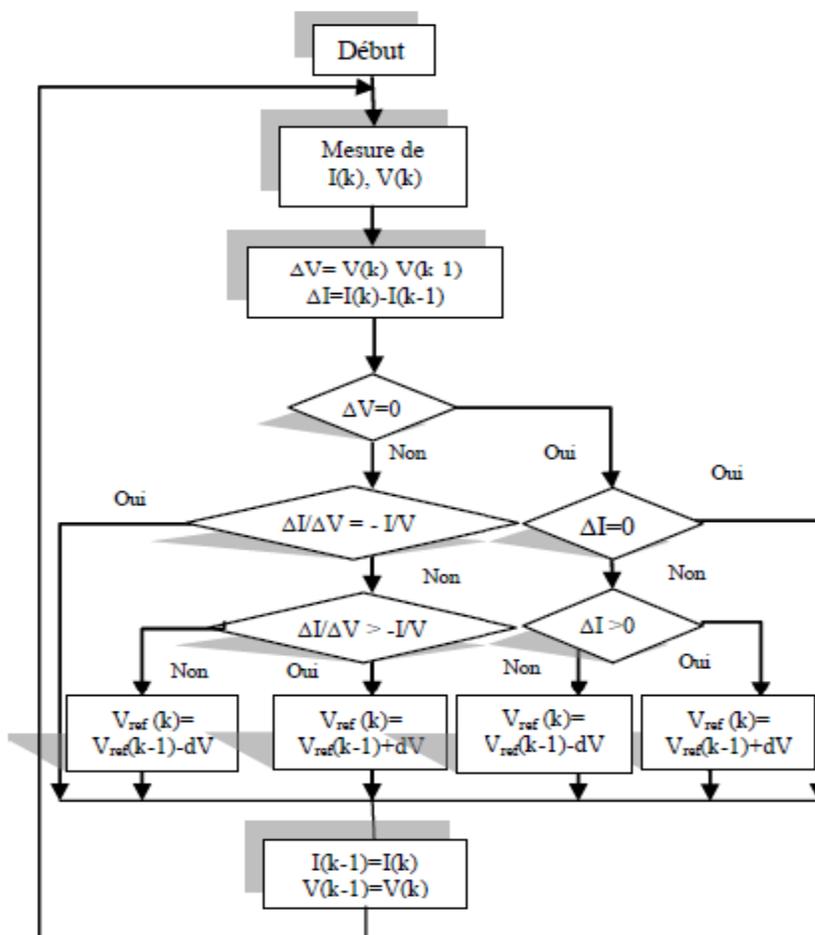


Figure III.11 : Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance [30]

PARTIE 2 :

III.3.3 LES RESEAUX DE NEURONES :

III.3.1 Présentation :

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, d'optimisation, 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 [31]. [32]

III.3.2 Définition :

Les cellules nerveuses, appelés neurones, sont les éléments de base du système nerveux central. Celui-ci posséderait environ cent milliard. Les neurones possèdent de nombreux points communs dans leur organisation générale et leur système biochimique avec les autres cellules. Ils présentent cependant des caractéristiques qui leur sont propres et se retrouvent au niveau des cinq fonctions spécialisées qu'ils assurent [33]. [34]

- Recevoir des signaux en provenance de neurones voisins,
- Intégrer ses signaux,
- Engendrer in influx nerveux,
- Le conduire,
- Le transmettre à un autre neurone capable de le recevoir,

Un réseau de neurones est une implémentation artificielle des mécanismes de base observés dans le cerveau, entre neurones, dendrites et synapses. Chaque réseau est constitué par un ensemble d'unités élémentaires interconnectées fonctionnant en parallèle. Chaque élément est capable de réaliser quelques calculs élémentaires selon l'information reçus.

III.3.3 LE MODELE NEUROPHYSIOLOGIQUE :

Un neurone est une cellule particulièrement complexe spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Son rôle est de recevoir, stocker et transmettre l'information, figure III.12. On distingue dans le neurone trois sections principales : le corps cellulaire, les dendrites et l'axone [35].

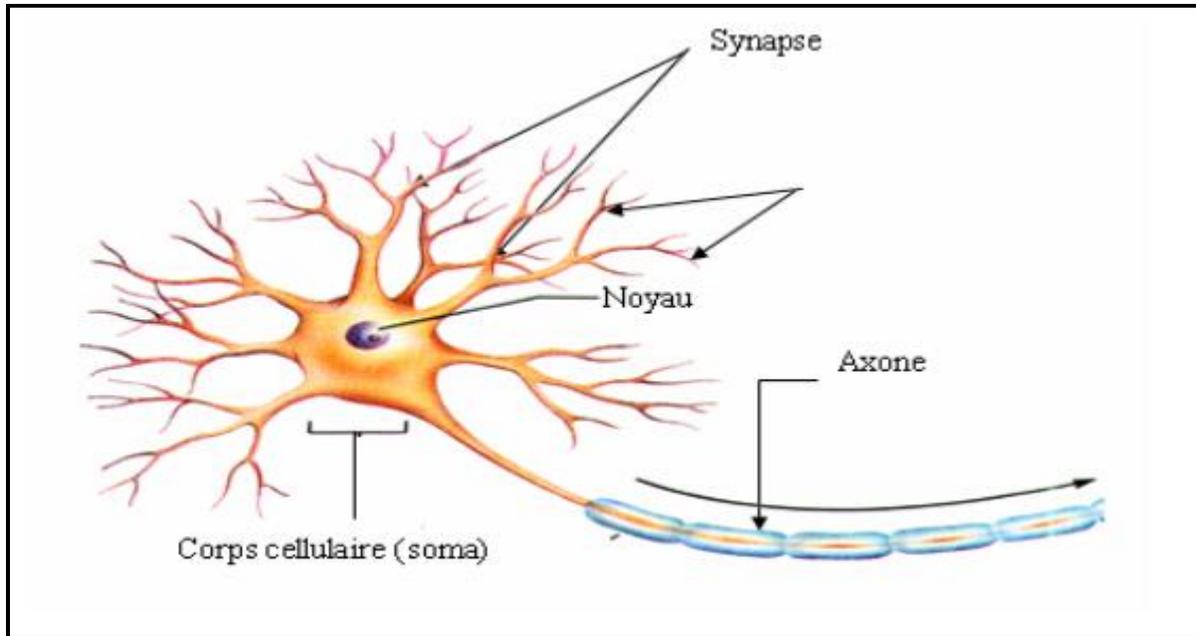


Figure. III.12 : Neurone biologique.

III.3.4 STRUCTURE DES NEURONES :

- **Le corps cellulaire** : Il contient le noyau du neurone ainsi que la machine biologique nécessaire à la synthèse des enzymes. Ce corps cellulaire de forme sphérique ou pyramidale contient ainsi les autres molécules essentielles à la vie de la cellule. SA taille est de quelques microns diamètre.
- **Les dendrites** : Ce sont des fines extensions qui se ramifient autour du neurone et forment une sorte de vaste arborescence. Les signaux envoyés sont captés par les dendrites. Leur taille est de quelques dizaines de micromètres de longueur.
- **L'axone** : L'information traitée est transmise vers l'extérieur, le long de l'axone, les signaux partent du neurone grâce à l'arborescence terminale que possède l'axone ; contrairement aux dendrites qui se ramifient autour du neurone, l'axone est plus long et se ramifie à son extrémité où il se connecte aux dendrites des autres neurones. Sa taille peut varier entre quelques millimètres à plusieurs mètres.

La notion de synapse explique la transmission des signaux entre un axone et une dendrite. Au niveau de la jonction, il existe un espace à travers lequel le signal électrique ne peut pas se propager. Les transmissions se font alors par l'intermédiaire des substances chimiques (les

neurotransmetteurs). Quand un signal arrive de la synapse, il provoque l'émission des neurotransmetteurs qui vont se fixer sur des récepteurs de l'autre côté de l'espace inter synaptique. Quand suffisamment de molécules se sont fixés, un signal électrique est émis de l'autre côté, il y a donc une transmission. [36]. [37]

III.3.5 MODELISATION :

- **Le neurone artificiel :**

La première modélisation d'un neurone date des années quarante Elle a été présentée par Mac Culloch et Pitts. S'inspirant de leurs travaux sur les neurones biologiques, ils ont proposé le modèle suivant : un neurone artificiel fait une somme pondérée des potentiels d'action qui lui parviennent (chacun des potentiels est une valeur numérique qui représente l'état des neurones qui l'a émis), puis s'active suivant la valeur de cette sommation pondérée Si cette somme dépasse une certain seuil le neurone est active et transmet une réponse (sous forme de potentiel d'action dont la valeur est celle de son activation, si le neurones n'est activé pas il ne transmet rien. [38]

La fonction des transferts est un simple effet de seuil Alors, si une cellule «j» est reliée à «n» autres cellules, le neurone formel donné par la figure III.13, effectue une somme pondérée des «n» entrées, augmentée d'une entrée externe désignant le seuil du neurone «j» Le tout est suivi d'un élément de décision qui représente la fonction d'activation non linéaire qui détermine la sortie du neurone La fonction de décision peut avoir les formes les plus utilisées données par la figure III.13.

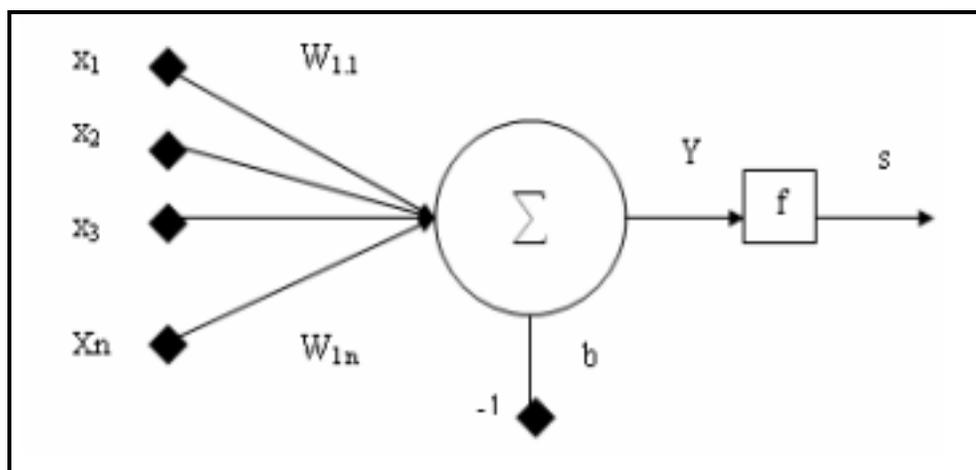


Figure.III.13 : *Modèle d'un neurone artificiel.*

Les entrées du neurone sont désignées par x_i ($i=1 \dots n$). Les paramètres W ; reliant les entrées aux neurones sont appelés poids synaptiques ou tout simplement poids. La sortie du neurone est donnée par :

$$Y = \sum_{j=0}^n W_j \cdot X^T - b \quad \text{III.33}$$

Et la sortie de neurones « S_j » est donnée par :

$$S_j = f(Y) = f\left(\sum_{i=0}^n W_{ij} \cdot X_i - b\right) \quad \text{III.34}$$

b : est appelé biais du neurone.

S : le nombre de neurones d'une même couche.

i : le premier indice (rangée) désigne toujours le numéro de neurone sur la couche.

j : le deuxième indice (colonne) spécifie le numéro de l'entrée.

Que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$W = \begin{bmatrix} W_{1,1} & \dots & W_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{s,1} & \dots & W_{s,n} \end{bmatrix} \quad \text{III.35}$$

\mathbf{X} : est de dimension matricielle ($n \times 1$), \mathbf{W} : dimension ($s \times n$)

Cette sortie correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins le biais b du neurone. Le résultat S de la somme pondérée s'appelle le niveau d'activation du neurone. Le biais b s'appelle aussi le seuil d'activation du neurone. Lorsque le niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil b , alors l'argument de f devient positif (ou nul). Sinon, il est négatif [39]

III.3.6 PRINCIPE D'UN NEURONE ARTIFICIEL :

- Pas de notion temporelle.
- Coefficient synaptique : coefficient réel.
- Somme des signaux arrivant au neurone.
- Sortie obtenue après application d'une fonction de transfert.

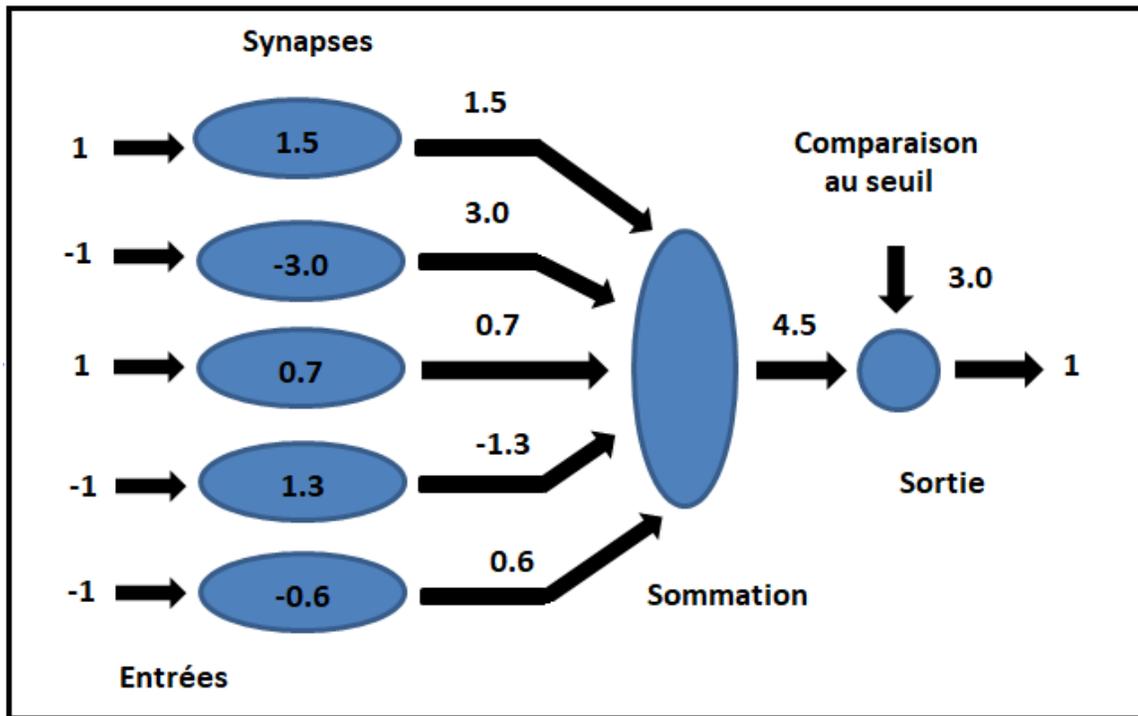


Figure.III.14 : Principe d'un neurone artificiel.

III.3.7 FONCTIONS D'ACTIVATION :

La fonction d'activation définit l'état du neurone en fonction de son entrée totale. Elle présente la relation qui lie l'ensemble des potentiels d'activation et décision du neurone. La figure III.15 donne quelques fonctions d'activations les plus utilisées [40]:

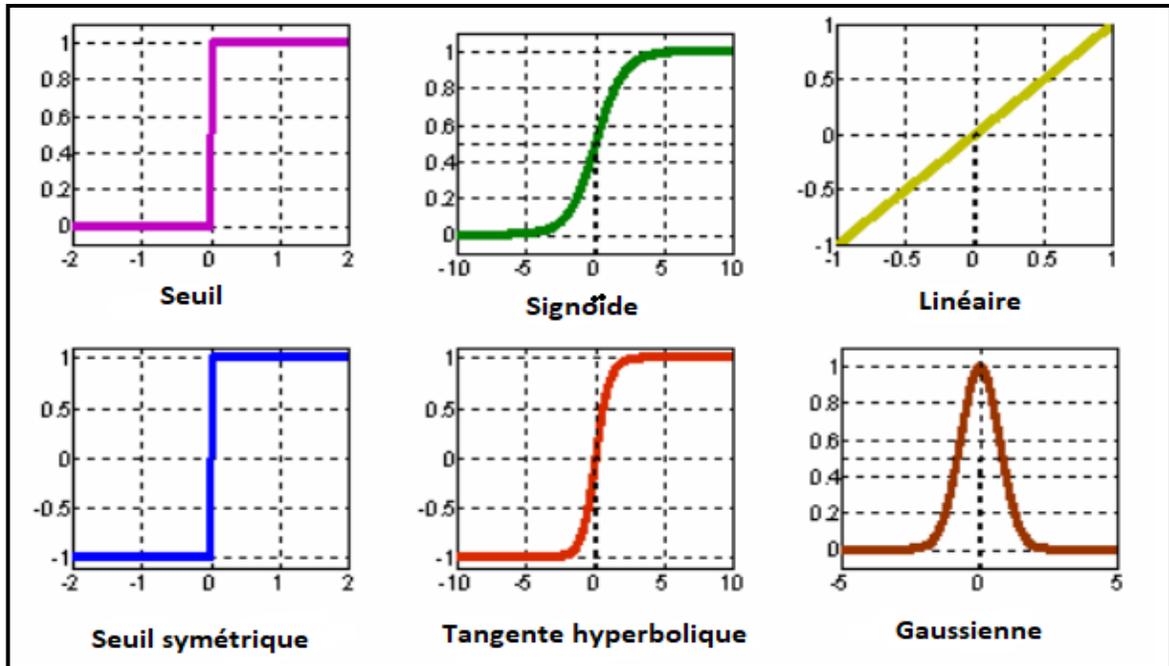


Figure.III.15 : Fonction d'activation.

III.3.8 ARCHITECTURE DES RESEAUX DE NEURONES :

- Réseaux non bouclés :

Ce sont des réseaux unidirectionnels sans retour arrière (feedforward). 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 la figure III.16. [41]

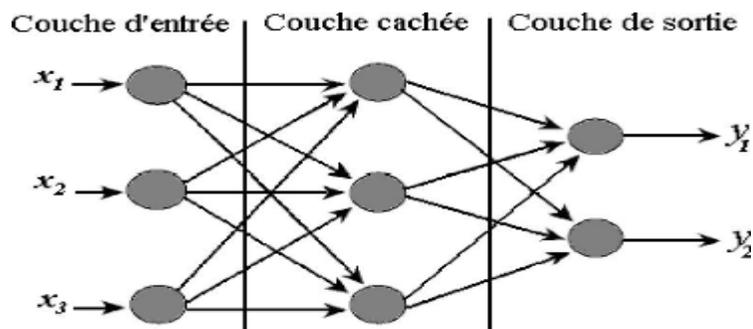


Figure.III.16 : Réseaux non bouclés.

- Réseaux bouclés :

Les réseaux bouclés représenté dans figure III.17 ont des connexions récurrentes qui ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau non bouclé. La sortie d'un neurone du réseau peut être donc fonction d'elle-même; cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est prise en considération [42].

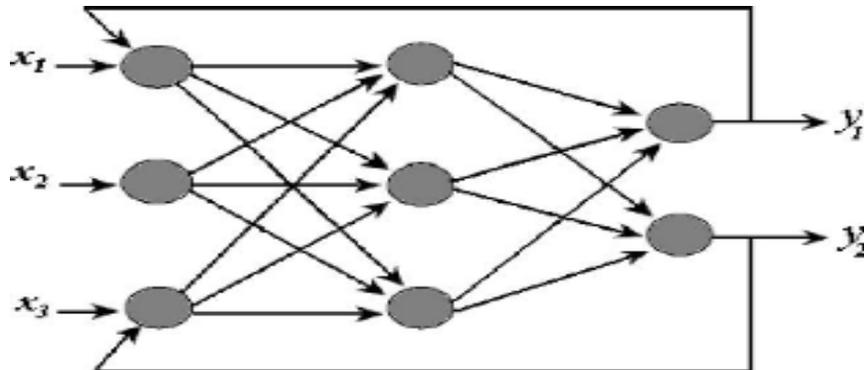


Figure.III.17 : Réseaux bouclé.

III.9 L'APPRENTISSAGE DES RESEAUX DE NEURONES :

- Apprentissage supervisé :

Dans ce cas, la connaissance a priori de la sortie désirée est nécessaire. On présente au réseau le vecteur d'entrée puis on calcule sa sortie, cette dernière sera comparée avec la sortie désirée, ensuite les poids sont ajustés de façon à réduire l'écart entre elles. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère de performance soit satisfait.

L'apprentissage supervisé détermine les poids synaptiques à partir d'exemples étiquetés de formes auquel un professeur a associé des réponses ou des cibles désirées également étiquetées et grâce à une stratégie spécifique. Après la phase d'apprentissage et la convergence des calculs, il n'est plus nécessaire. En général, de mémoriser le jeu d'apprentissage. Ces algorithmes sont particulièrement dédiés aux problèmes de classification des données bruitées ou incomplètes [43].

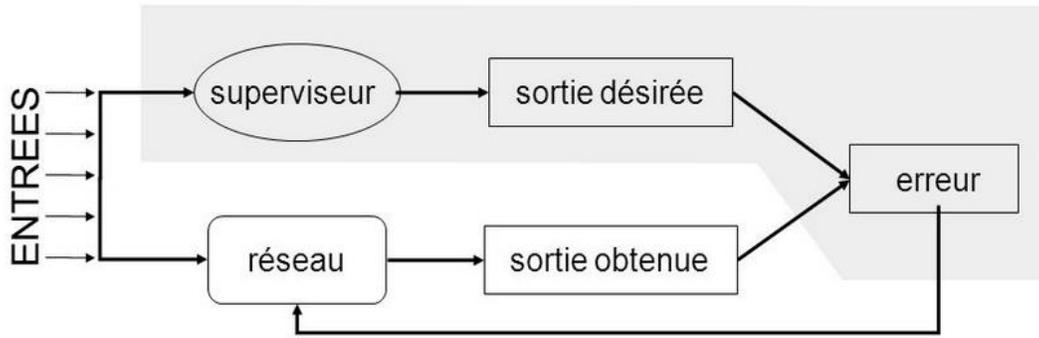


Figure III.18 : Schéma d'apprentissage supervisé.

- **Apprentissage non supervisé :**

Dans un modèle non supervisé, on n'a pas de connaissance à priori sur l'information que l'on voudrait extraire. Le réseau est laissé libre de converger vers n'importe quel état final. Dans ce cas, les exemples présentés à l'entrée provoquent une auto adaptation du réseau figure III.18 afin de produire des valeurs de sortie qui soient proches en réponse à des valeurs d'entrées similaires.

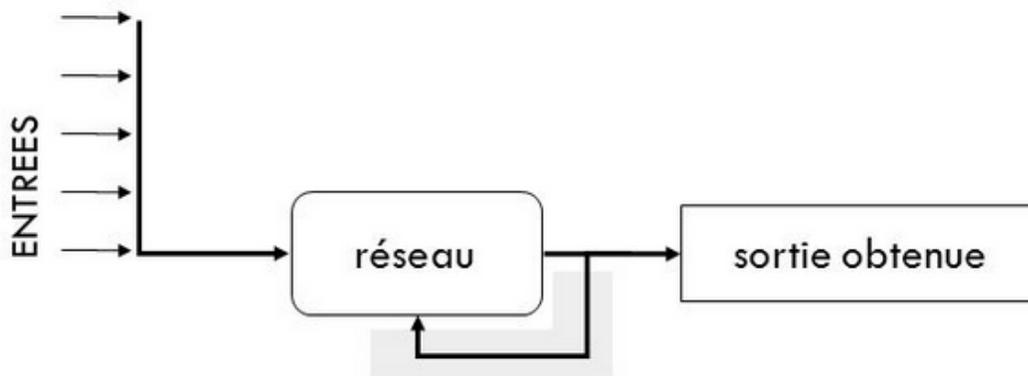


Figure III.19 : schéma d'apprentissage non supervisé.

- **L'apprentissage renforcé :**

L'apprentissage par renforcement est utile quand une information de retour sur la qualité de la performance est fournie. Mais la conduite souhaitée du réseau n'est pas complètement spécifiée par le professeur. [44]

III.10 REGLES D'APPRENTISSAGE :

Les stratégies des modifications des poids synaptiques sont dérivées des règles générales suivantes :

- La règle de HEBB ou les poids des connexions entre deux processeurs élémentaires est renforcé si les deux processeurs élémentaires sont activés simultanément.
- La règle de WIDROW HOFF ou règle delta règle ou les poids synaptique est adaptée pour obtenir la diminution de l'erreur entre la sortie réelle du processeur élémentaire et la sortie désirée.
- L'apprentissage compétitif dans lequel tous les processeurs élémentaires sont en compétition. La sélection est réalisée à l'aide d'un processus de compétition basé sur une mesure de similarité entre l'exemple de référence associé à chaque processeur et l'exemple d'entrée.

Les expressions précises des règles dépendent très étroitement de la nature des fonctions d'entrée totale, des fonctions d'activation et de la nature continue ou discrète des informations contenues dans les cellules des neurones.

La figure III.20 représente la cellule émettrice P_j connectée à la cellule réceptrice P_i par l'intermédiaire du poids synaptique W_{ij} .

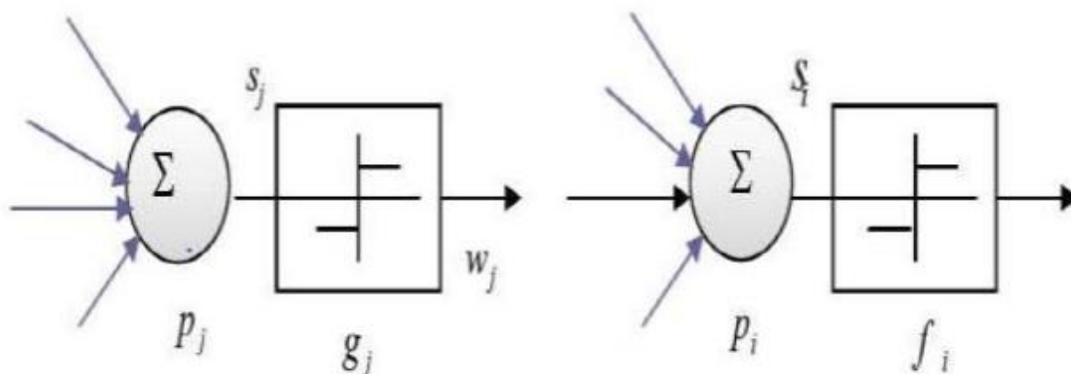


Figure III.20 : Modèle d'apprentissage de la connexion W_{ij} entre deux neurones

$$\Delta W_{ij} = \alpha f_i(S_i, t_i) g_j(S_i, W_{ij}) \quad \text{III.38}$$

Avec : α : le pas d'adaptation.

f_i et f_j : fonctions d'activations de P_i et P_j .

S_i et S_j : valeurs d'activations de P_i et P_j .

t_i : entrée professeur de P_i .

Dans la règle de HEBB, il n'y a pas de professeur et les fonctions f_i sont linéaires : le mécanisme d'adaptation se réduit à :

$$\Delta W_{ij} = \alpha S_i S_j \quad \text{III.39}$$

La règle de WIDROW HOFF, connue également sous le nom de Delta règle (ou A règle) nécessite un professeur et se formule en présence de fonctions d'activation linéaire sous la forme :

$$\Delta W_{ij} = \alpha(t_i - S_i)S_j \quad \text{III.40}$$

Le modèle compétitif de type KOHONEN met en œuvre l'expression :

$$\Delta W_{ij} = \alpha(t_i - W_{ij}) \quad \text{III.41}$$

Après la phase d'apprentissage, toute la mémorisation des connaissances est gravée dans le réseau. C'est la phase la plus longue en calcul connexionniste. Par contre, en phase de reconnaissance, si la forme à reconnaître a déjà été apprise, le réseau fournira instantanément la bonne sortie [45].

III.11 STRUCTURE D'INTERCONEXION :

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Elle peut être quelconque, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité :

- **Réseau multicouche :**

les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avales figure III.21 Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche

suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelés couches cachées [46]. [47].

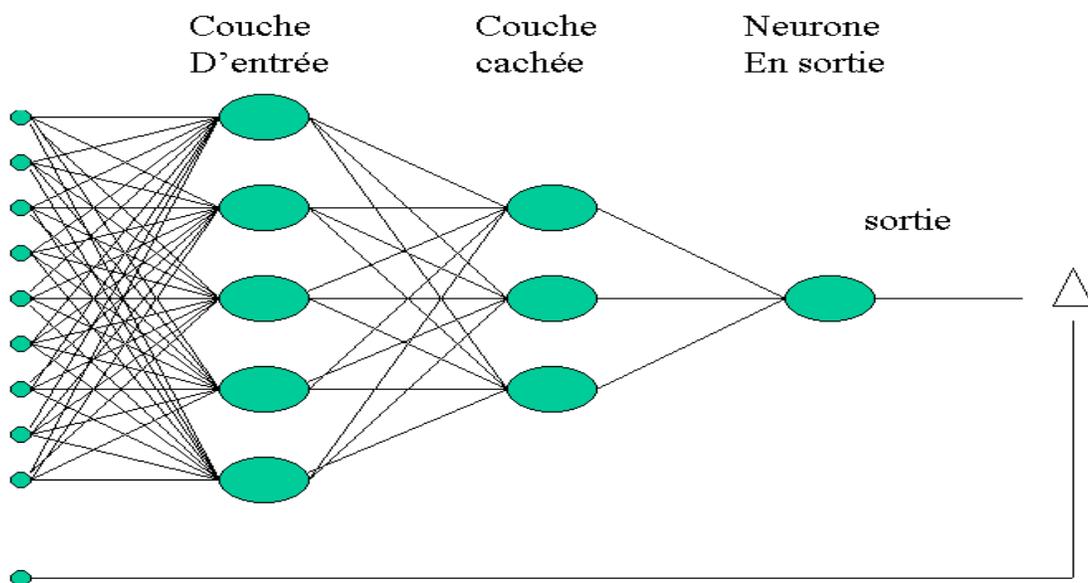


Figure III.21 : Réseaux multicouche.

- Réseau à connexions locales :

Il s'agit d'une structure multicouche, mais qui à l'image de la rétine, conserve une certaine topologie. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche avale figure III.22. Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique [47]. [48].

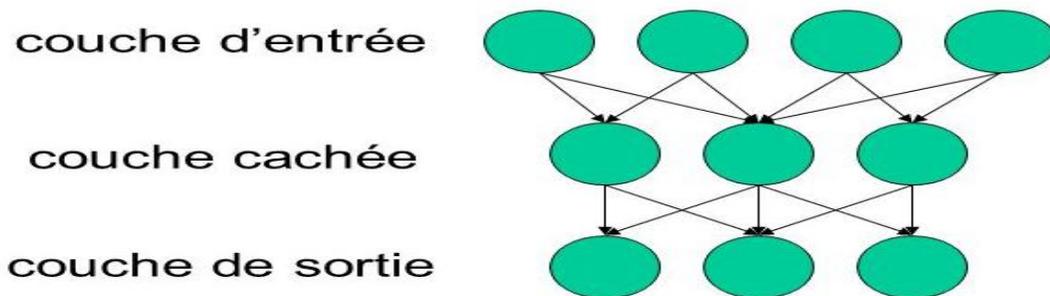


Figure.III.22 :Réseaux à connection loctales.

- **Réseaux à connexion récurrentes (dynamique) :**

Un réseau de ce type signifie qu'une ou plusieurs sorties de neurones d'une couche aval sont connectées aux entrées des neurones de la couche amont ou de la même couche. Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales figure III.23.

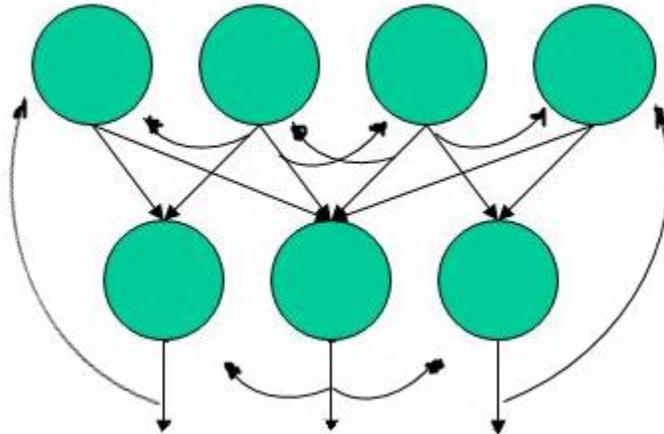


Figure III.23 : Réseaux à connexions récurrentes.

- **Réseaux à connexion complexe :**

c'est la structure d'interconnexion la plus générale figure III.24. Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau (et à lui-même) [48].

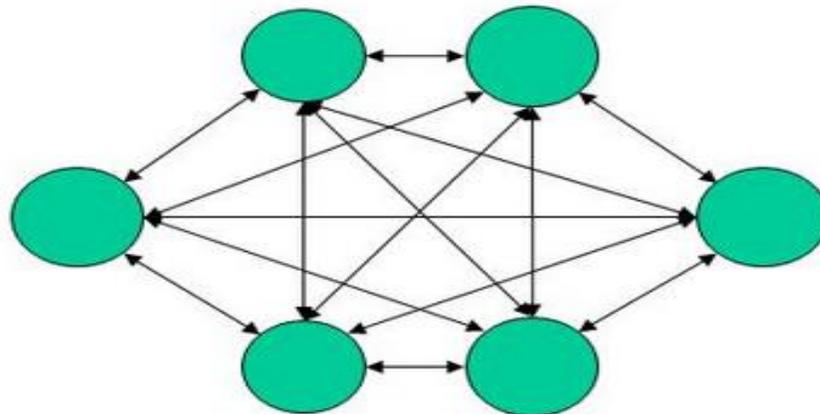


Figure III.24 : Réseaux à connexion complexe.

- **Réseaux de neurone à architecture évolutive :**

Ces réseaux de neurones changent leur structure interne pendant l'utilisation (augmentation ou diminution du nombre de neurones) [48].

III.12 PERCEPTRON :

- **Perceptron à une seule couche :**

La perception à une seule couche est le premier de trois réseaux d'après la taxonomie de la Figure III.25 qui peuvent 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.

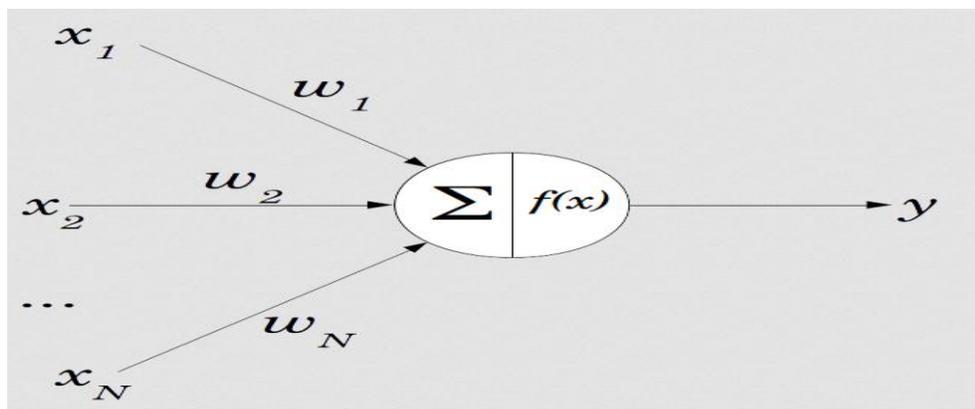


Figure III.25 : *Perceptron à une seule couche.*

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 [49].

- **Perceptron multicouche :**

Ce réseau a plusieurs couches de neurones (des poids adaptatifs). Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante, et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (l'activation) au sein d'un réseau.

Les couches intermédiaires entre la couche d'entrée et la couche de sortie n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées (dans l'exécution informatique). Figure III.26.

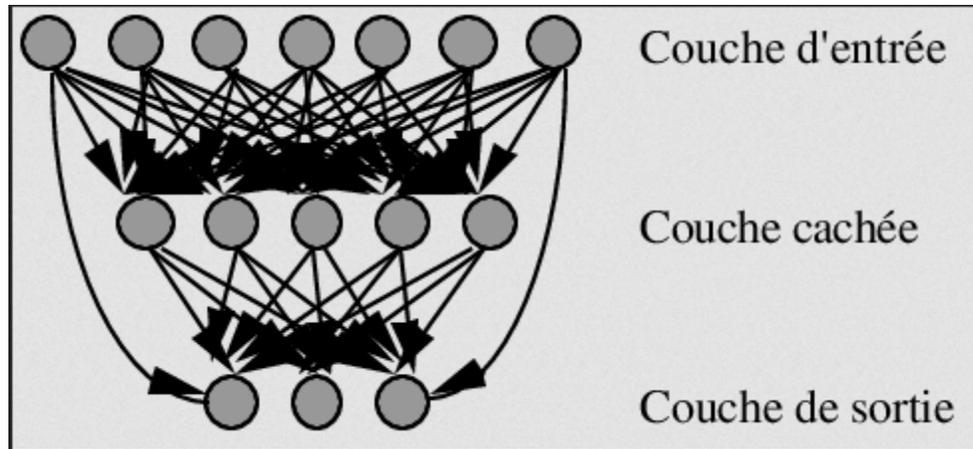


Figure III.26 : *Perceptron multicouche.*

Dans la suite, si nous discutons le réseau multicouche, nous illustrerons l'étude par le cas d'un réseau de deux couches (une seule couche cachée) car nous remuons des réseaux avec juste deux couches de poids adaptatif capables de rapprocher une fonction non linéaire continue.

On peut dire que n'importe quelle topologie (diagramme) de réseau, si elle est à propagation avant, peut être traduite en fonctions correspondantes. Alors, l'importance des réseaux de neurone est d'offrir un cadre très puissant et très général pour représenter les fonctions (linéaire ou non linéaire) de plusieurs variables d'entrées dans plusieurs variables de sortie, où les formes de ces fonctions sont régies par un certain nombre de paramètres réglables. Le processus qui fait l'ajustement de ces paramètres sur la base d'ensemble s'appelle l'apprentissage ; et pour cette raison l'ensemble de données s'appelle l'ensemble d'apprentissage [50].

III.13 PROPRIETE ET LIMITE DES RESEAUX DE NEURONES :

Les propriétés fascinantes des réseaux de neurones L'intérêt porté aujourd'hui aux réseaux de neurones tient sa justification dans les quelques propriétés suivantes :

- **La capacité d'adaptation :**

La capacité d'adaptation se manifeste dans les réseaux de neurones par la capacité d'apprentissage qui permet au réseau de tenir compte de nouvelles contraintes ou de nouvelles données. Cette capacité présente un intérêt déterminant pour les problèmes évolutifs.

- **La capacité de généralisation :**

La capacité de généralisation se traduit par la capacité d'un système à apprendre et à retrouver, à partir d'un ensemble d'exemples, des règles sous-jacentes ou à mimer des comportements qui permettent de résoudre un problème.

- **Le parallélisme :**

Cette notion se situe à la base de l'architecture des réseaux de neurones considérés comme un ensemble d'entités élémentaires qui travaillent simultanément. Le parallélisme permet une rapidité de calcul supérieure mais exige de penser et de poser différemment les problèmes à résoudre.

III.14 PROCEDURE DE CONSTRUCTION D'UN RESEAU DE NEURONE :

Le cycle classique de développement peut être séparé en sept étapes :

- La collecte des données,
- L'analyse des données,
- La séparation des bases de données,
- Le choix d'un réseau de neurones,
- La mise en forme des données,
- L'apprentissage.
- La validation.

III.14 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES RESEAUX DE NEURONES :

- ❖ **Les Avantages :**

- 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 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 variable
- ❖ **Les Inconvénients :**
- 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).
 - La connaissance acquise par un réseau de neurone est codée par les valeurs des poids sont inintelligibles pour l'utilisateur.

IV.15 CONCLUSION :

Cette étude a été centrée sur l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque. L'objectif principal était de trouver un algorithme efficace et optimal permettant d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque.

Ce chapitre est consacré à la description de la commande MPPT, le principe de recherche du MPP, les différents algorithmes MPPT les plus répondus existants dans la littérature (Inc.CoN, P&O), avec des études d'amélioration de la performance de l'algorithme (P&O).

Dans la deuxième partie de chapitre nous avons étudié la méthode d'extraction de puissance maximale (MPPT) nous avons utilisé la technique des réseaux de neurones [5].

CHAPITRE IV :

Simulations et analyses de MPPT (P&O et RNA)

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons étudier la modélisation de la cellule et le générateur photovoltaïque constitué de 54 cellules connectées en série dans les conditions standard (STC) ($E=1000W/m^2$, $T=25^\circ c$), nous allons étudier l'influence de la température et l'éclairement sur l'énergie de la cellule PV.

Dans la suite, nous allons représenter la modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT « perturbation et observation ». Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge. On utilise le programme MATLAB/SIMULINK pour faire la simulation finalement on va faire l'apprentissage par RNA pour déterminer MPPT.

IV.2 Les caractéristiques des panneaux :

Les caractéristiques principales du module sont illustrées dans le tableau IV.1

Courant de court – circuit de celle (STC) I_{cc}	0.0032A
Température nominal T_n (k)	298
La charge d'électron(C)	$1.6*10^{-19}$
Facteur d'idéalité de diode	1.3
Constant de Boltzman (J/K)	$1.38*10^{-23}$
Nombre des cellules séries	54
Nombre des cellules shunt	1
Resistance série R_s (Ohm)	221
Resistance shunt R_{sh} (Ohm)	415.405
Puissance nominal	200 w
Voltage maximale	26.4 V
Courant maximal	7.58 A
Voltage de circuit ouvert	32.9 V
Courant de court – circuit	8.21 A

Tableau IV.1.les caractéristique électrique de la cellule étudié.

Remarque: le Circuit équivalent de cellule et les équations électriques nous les mentionnés en détail dans le chapitre II.

IV.3 Schéma bloc d'une générateur PV :

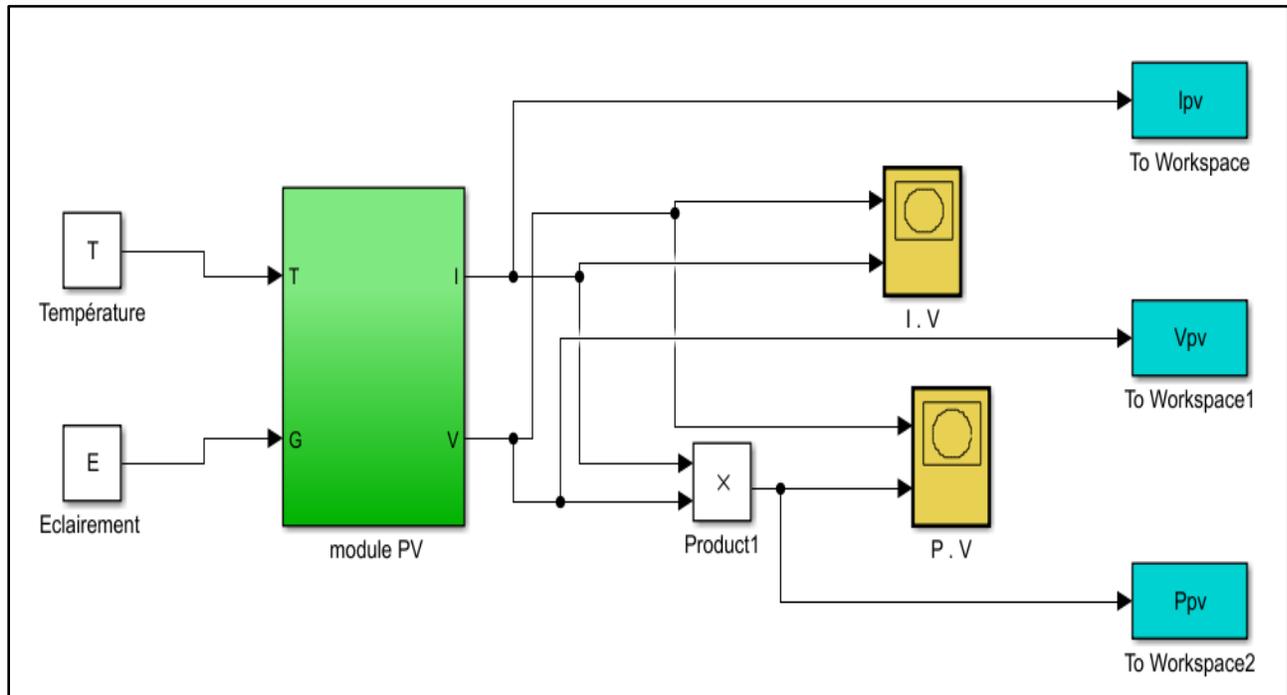


Figure IV.1. schéma de module photovoltaïque

IV.4 Influence de l'éclairement :

Avec l'augmentation de l'éclairement, on constate à travers la courbe I -V que le courant est fortement affecté par l'augmentation de sa valeur. Quant à la tension, elle est faible Quand Les courbes I-V se déplacent vers l'augmentation des valeurs, permettant à l'unité de produire plus d'énergie électrique Figure IV.2. le même comportement peut constater pour la caractéristique P(V) dans la FigureIV.3.

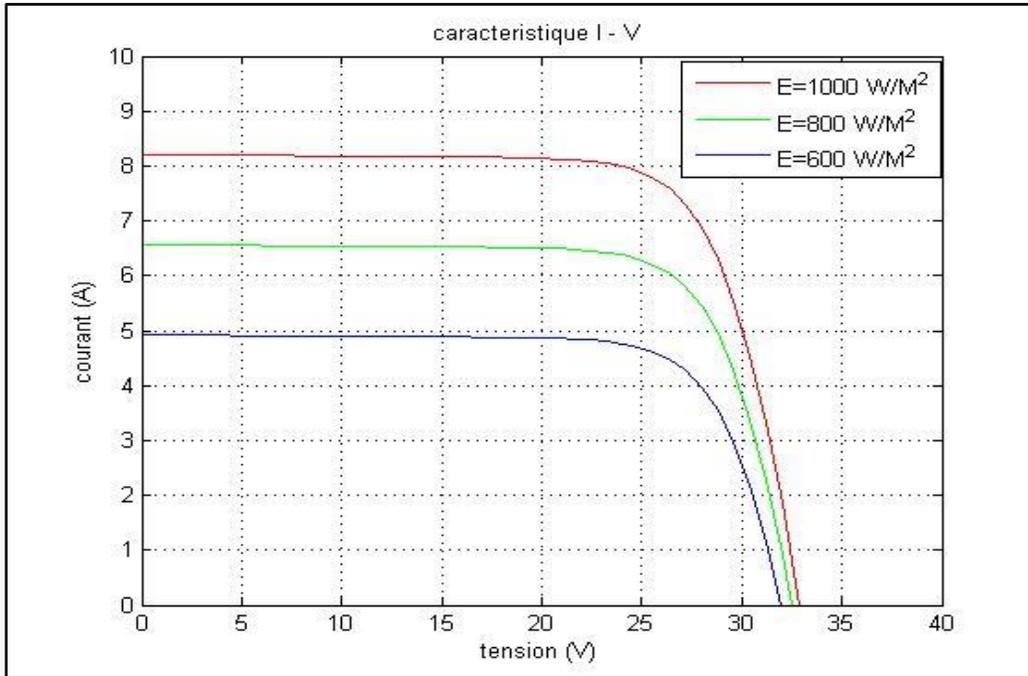


Figure IV.2 Caractéristique I(V) d'un module pour éclairement solaires variable.

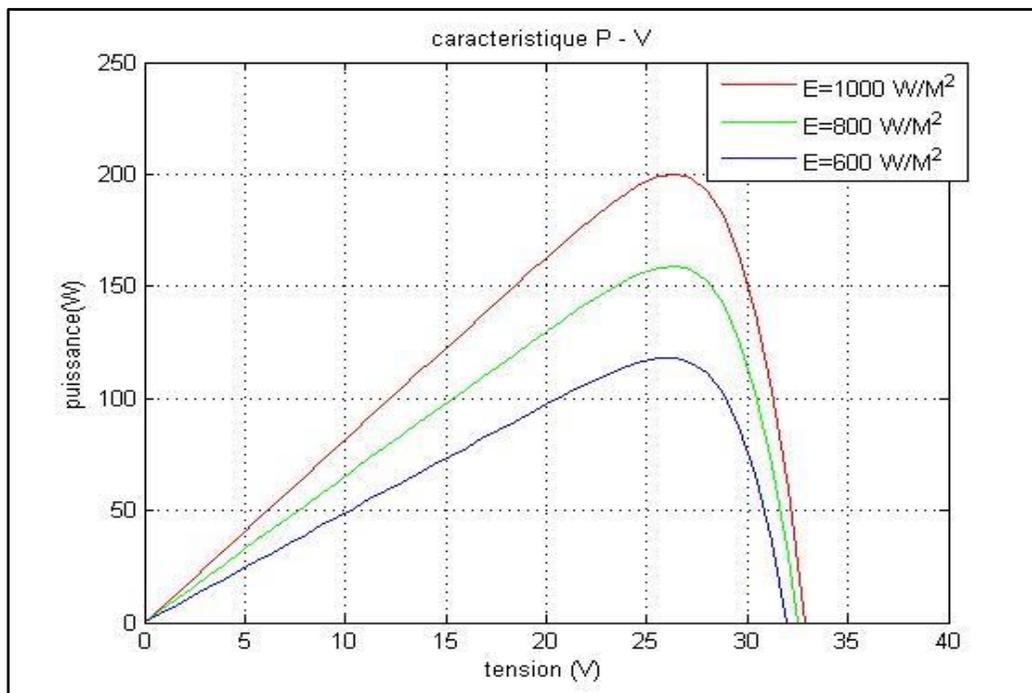


Figure IV.3. Caractéristique P-V d'un module pour température constante ($T=25^\circ$) et éclairement solaire variable.

IV.5 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE :

D'après la **Figure IV.4**, On voit à travers la courbe I – V que le courant est faiblement affecté par la température, alors qu'il affecte clairement la tension. Quant à l'énergie, elle augmente avec la baisse de température.

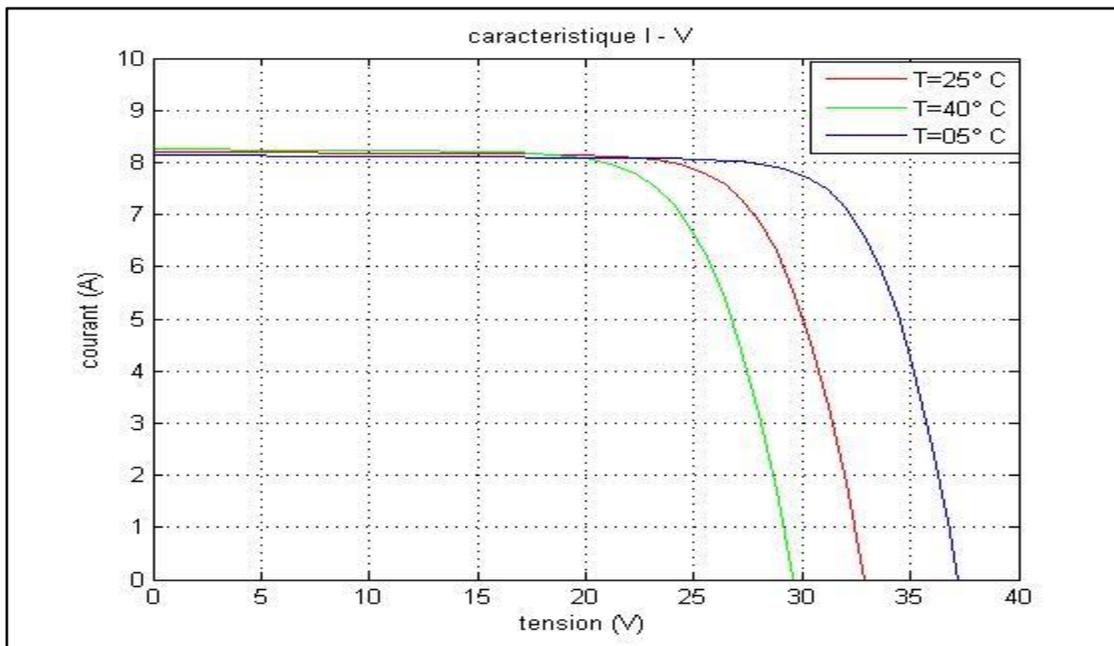


Figure IV.4.Caractéristique I(V) d'un module pour Température variable.

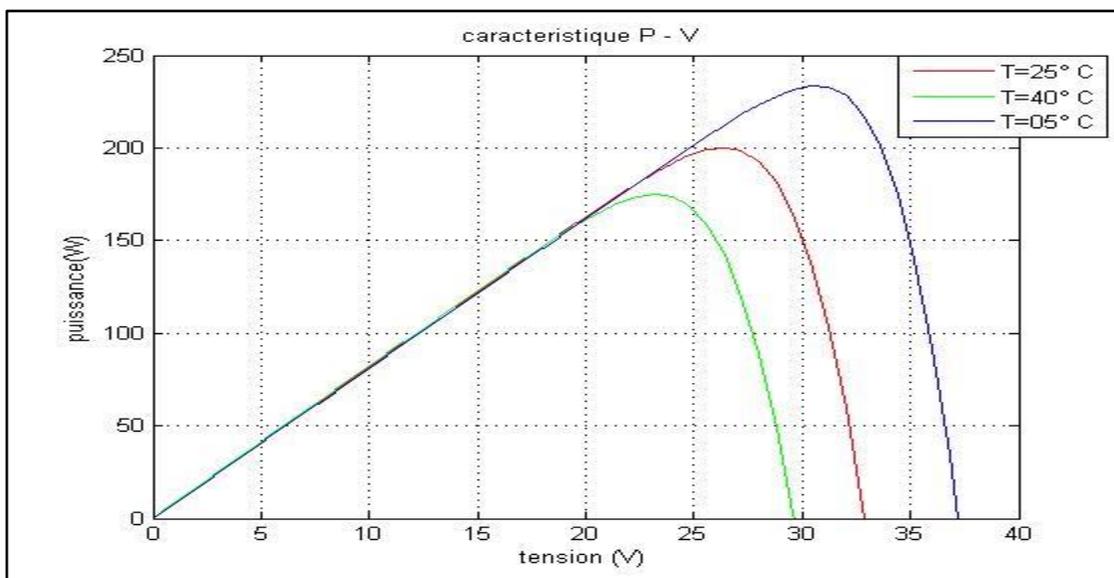
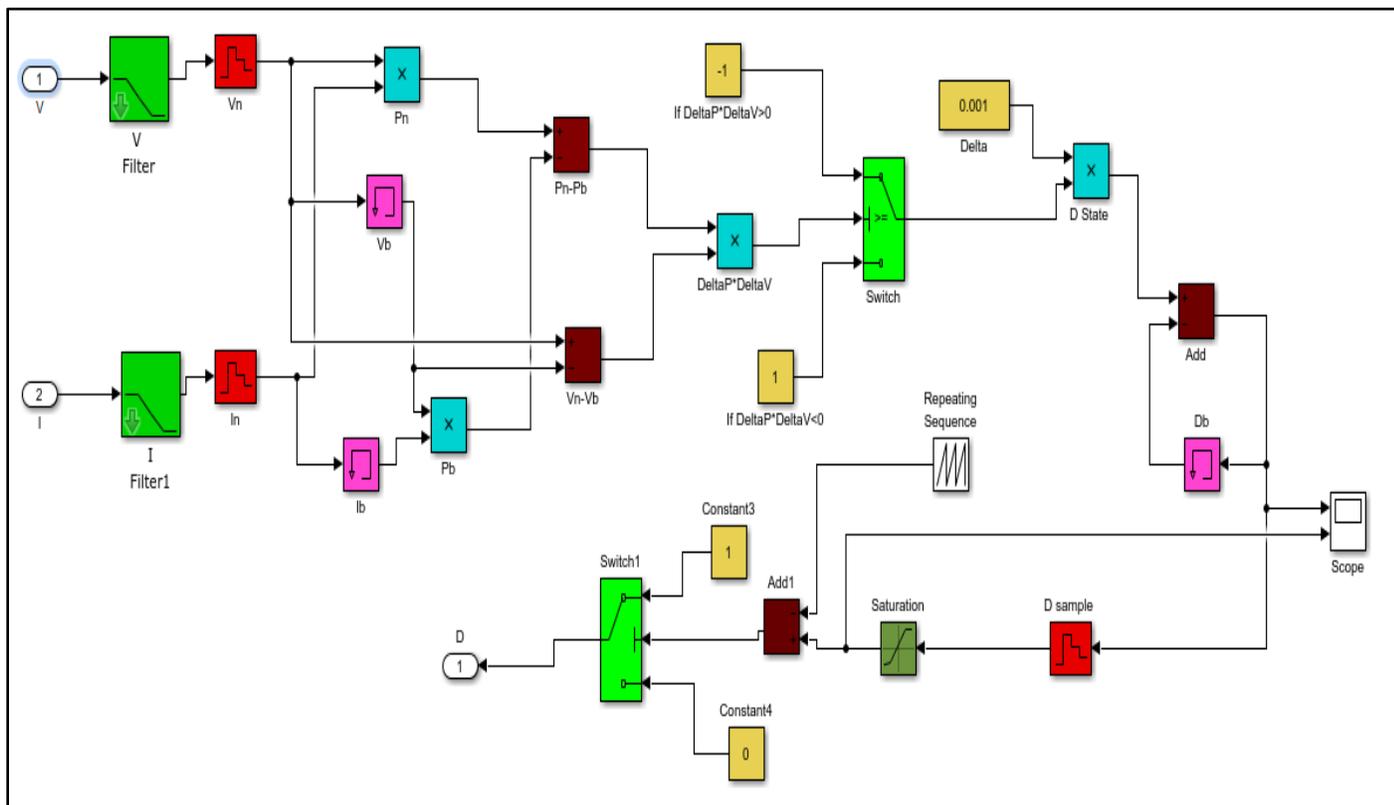


Figure IV.5.Caractéristique P(V) d'un module pour Température variable.

IV.6 Schéma bloc d'un MPPT de P&O :

La figure IV.6 représente le bloc schématique de SIMULINK de la commande MPPT :



.Figure IV.6.Schéma bloc de l’algorithme P&O.

IV.7 Bloc du système avec MPPT :

La figure (IV.7) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation ». Dans cette simulation on a utilisé un Module photovoltaïque, un hacheur Boost caractérisé par : $C = 0.003F$, $C1 = 0.002F$, $L = 0.01H$, on a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O et une charge $R=5ohm$:

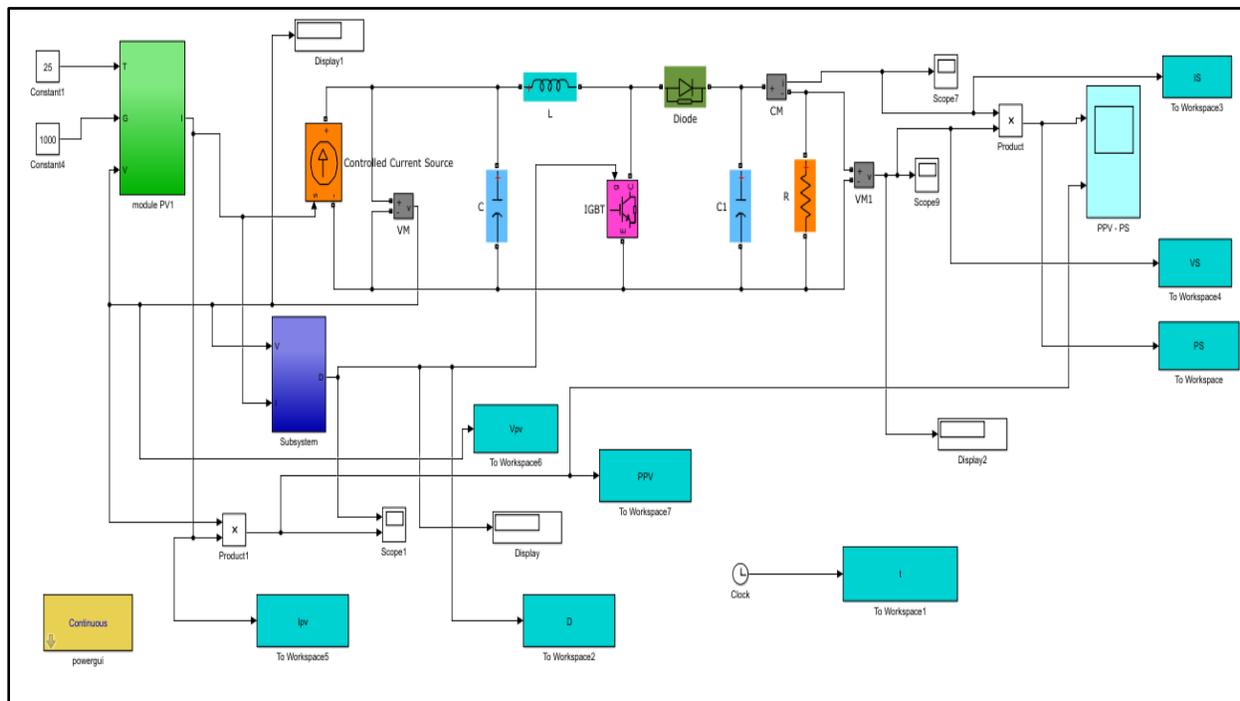


Figure IV.7. Modèle de simulation du GPV adapté par la commande MPPT (P&O).

IV.7.1 Simulation de la méthode MPPT:

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures (IV.8) à (IV.10). Ces figures représentent la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

L'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.

Les figures **suiivante** présente allure de puissance en fonction de temps d'un système photovoltaïque commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et différents éclairagements ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$) :

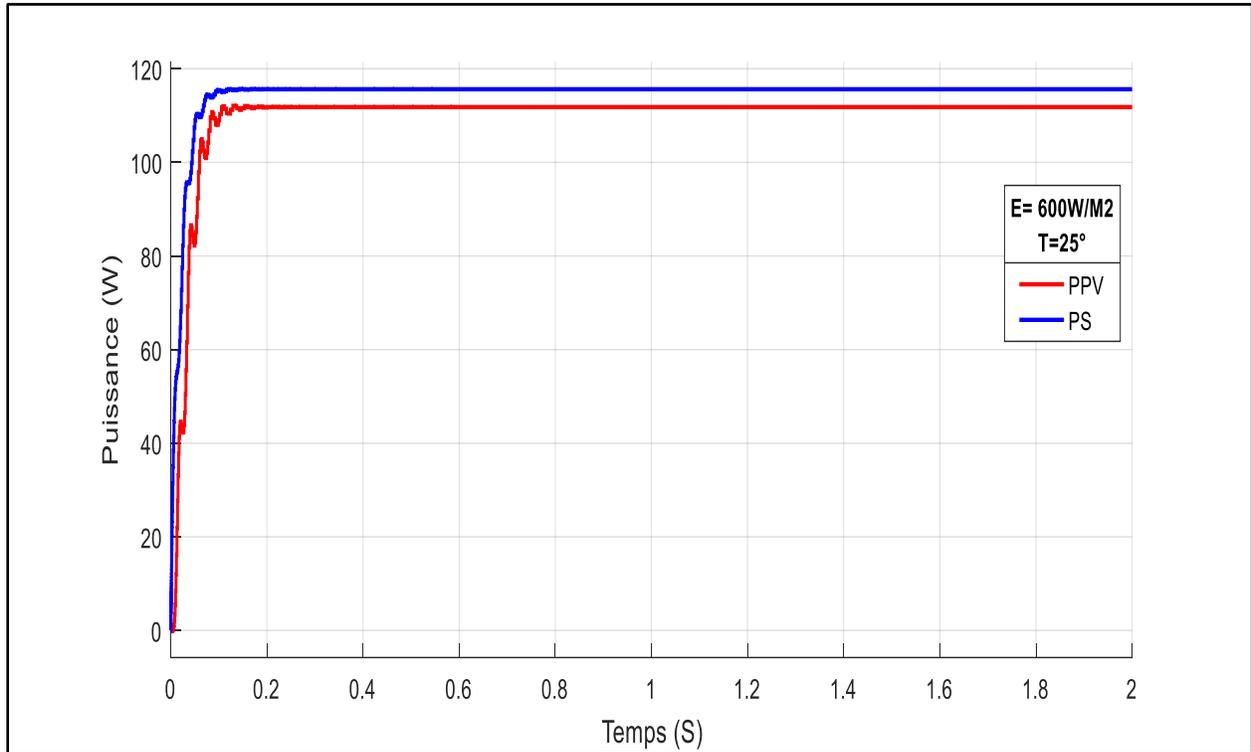


Figure IV.8. Allure de la puissance en fonction de temps pour ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=600\text{W}/\text{m}^2$).

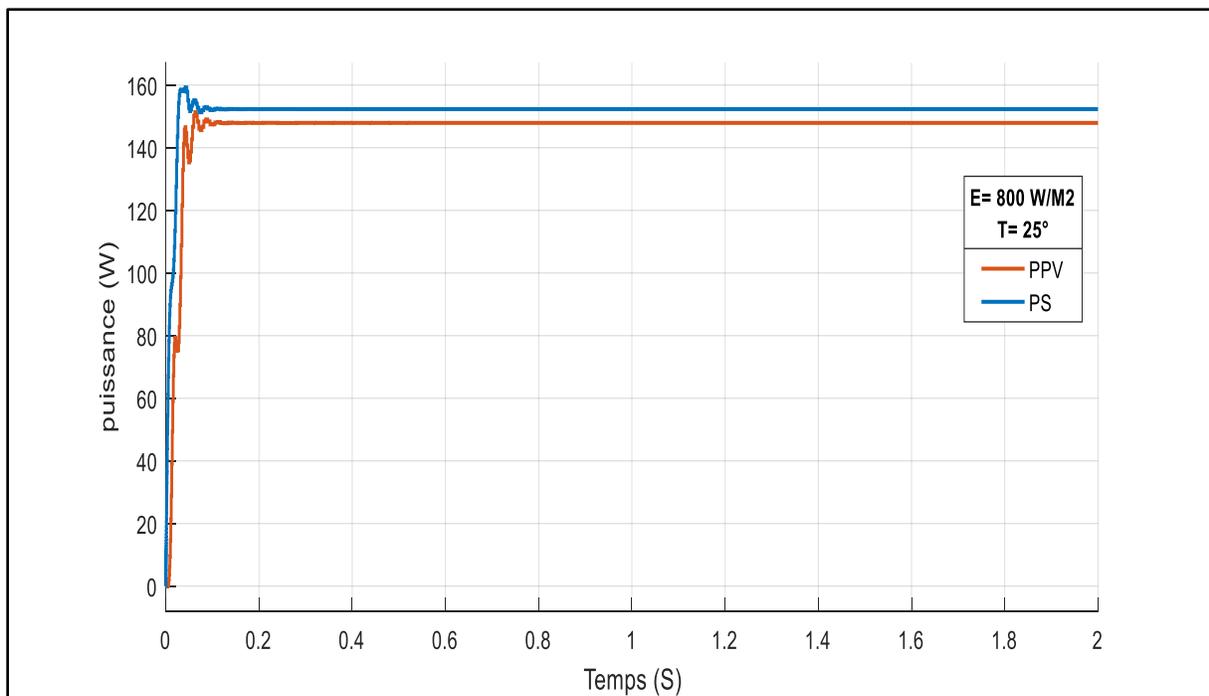


Figure IV.9. Allure de la puissance en fonction de temps pour ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=800\text{W}/\text{m}^2$).

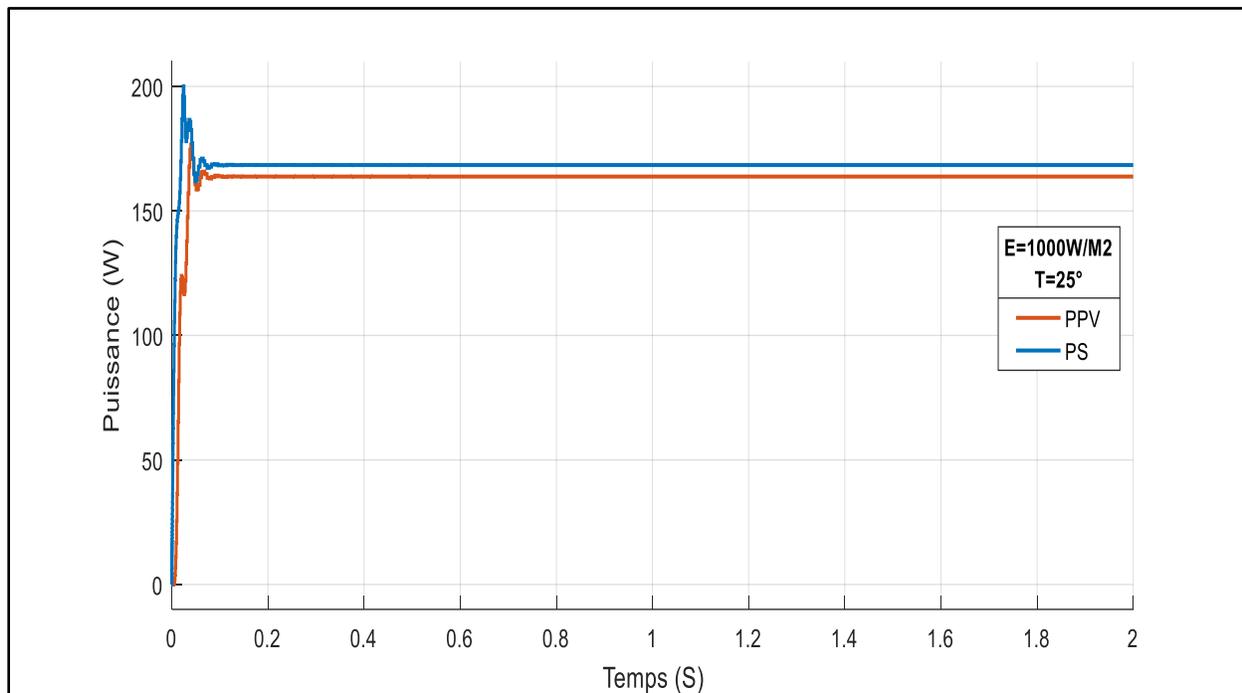


Figure IV.10. Allure de la puissance en fonction de temps pour ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W/m}^2$).

D'après les figures obtenus on remarque que la puissance réagit en fonction de l'éclairement du panneau et inférieur au la puissance à la sortie de le hacheur.

IV.8 PROCEDURE DE CONSTRUCTION D'UN RESEAU DE NEURONES:

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

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

IV.8.1 CREATION DU BLOC SIMULINK:

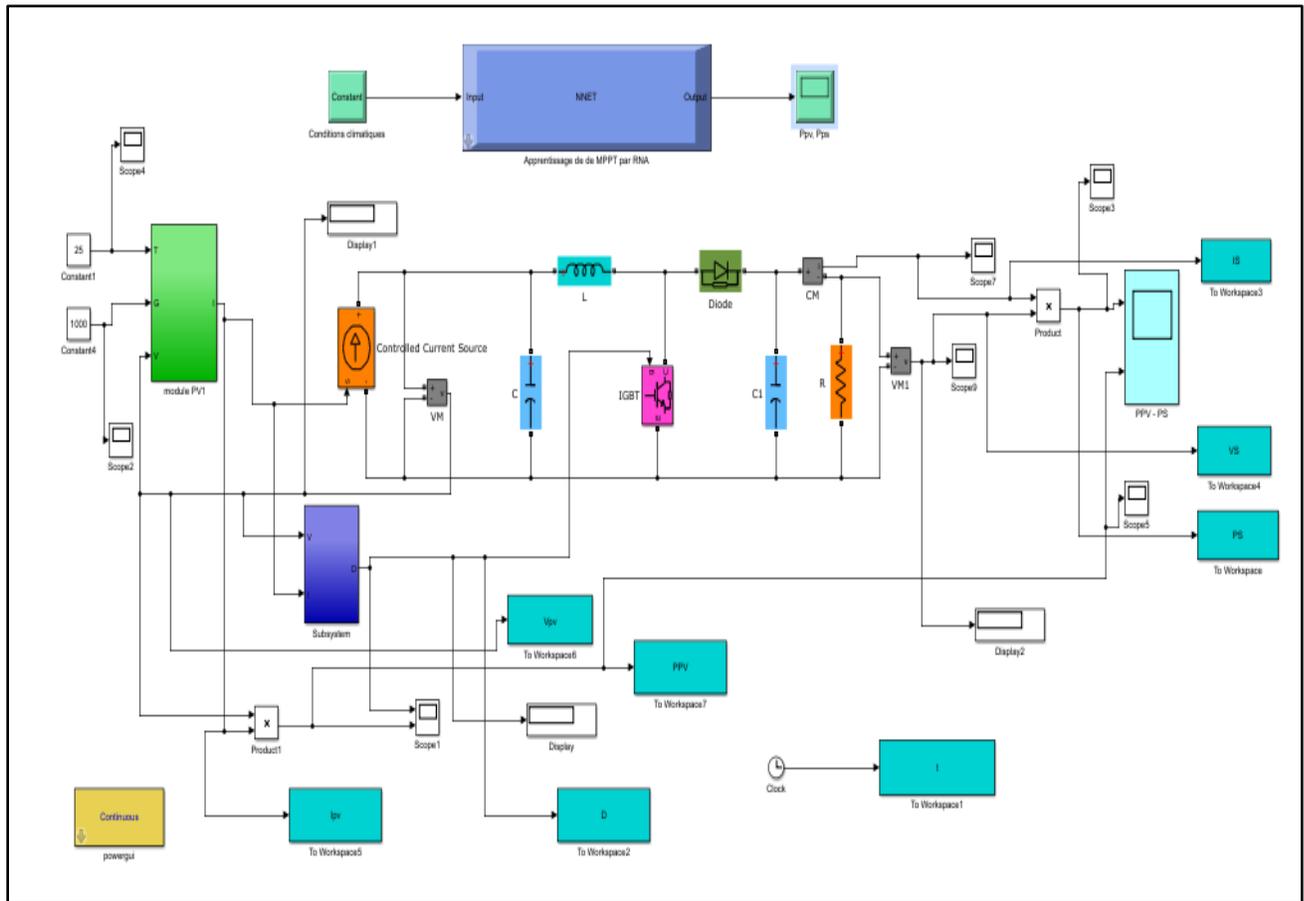


Figure IV.11. : Modèle de simulation du GPV adapte par la technique MPPT [RNA].

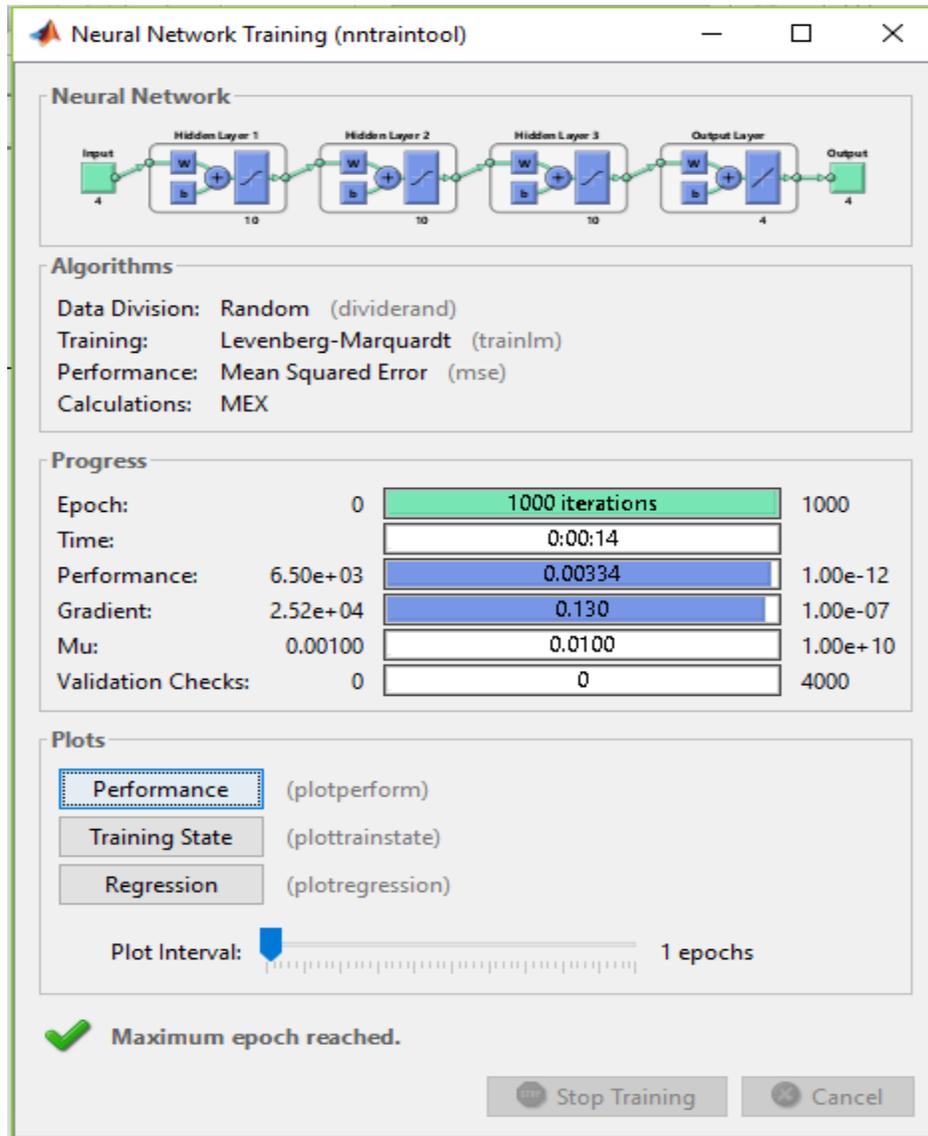


Figure IV.12. Formation du RNA avec MATLAB

IV.8.2 Résultat de la simulation :

Les résultats de simulation avec le réseau de neurone sont présentés par les figures suivantes :

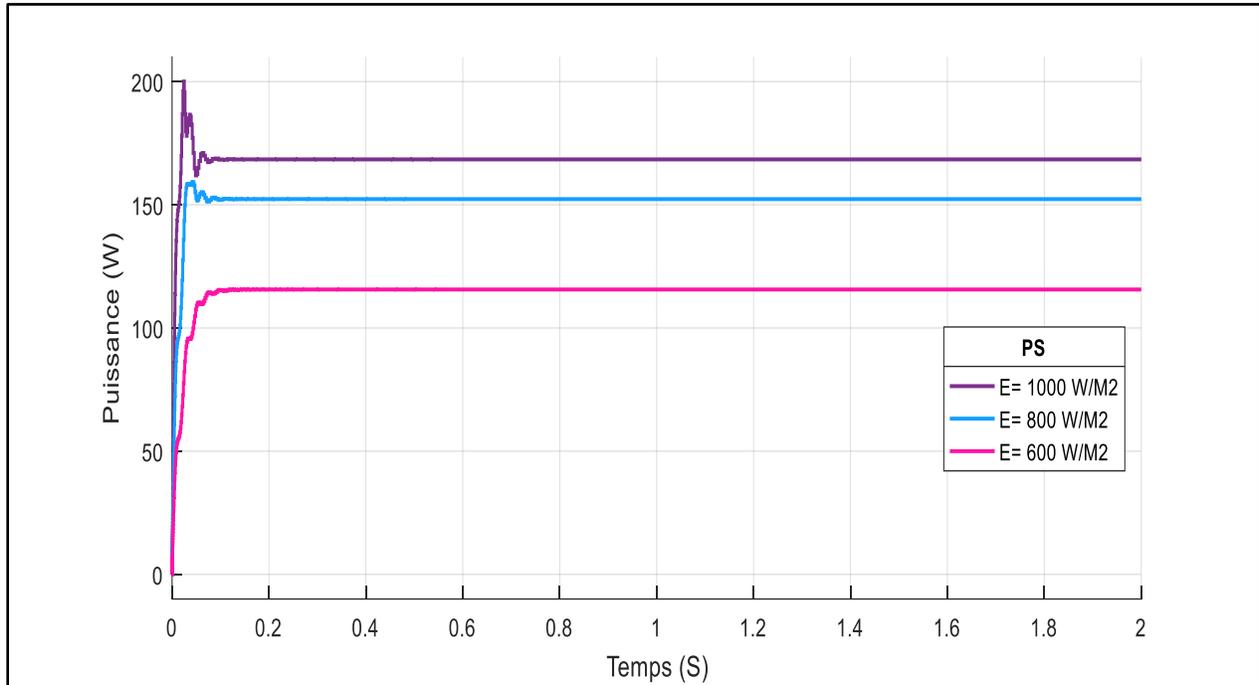


Figure IV.13. Allure de la puissance à la sortie de l'hacheur par la technique RNA ($T=25^{\circ}$, $E=1000, 800, 600 \text{ W/M}^2$).

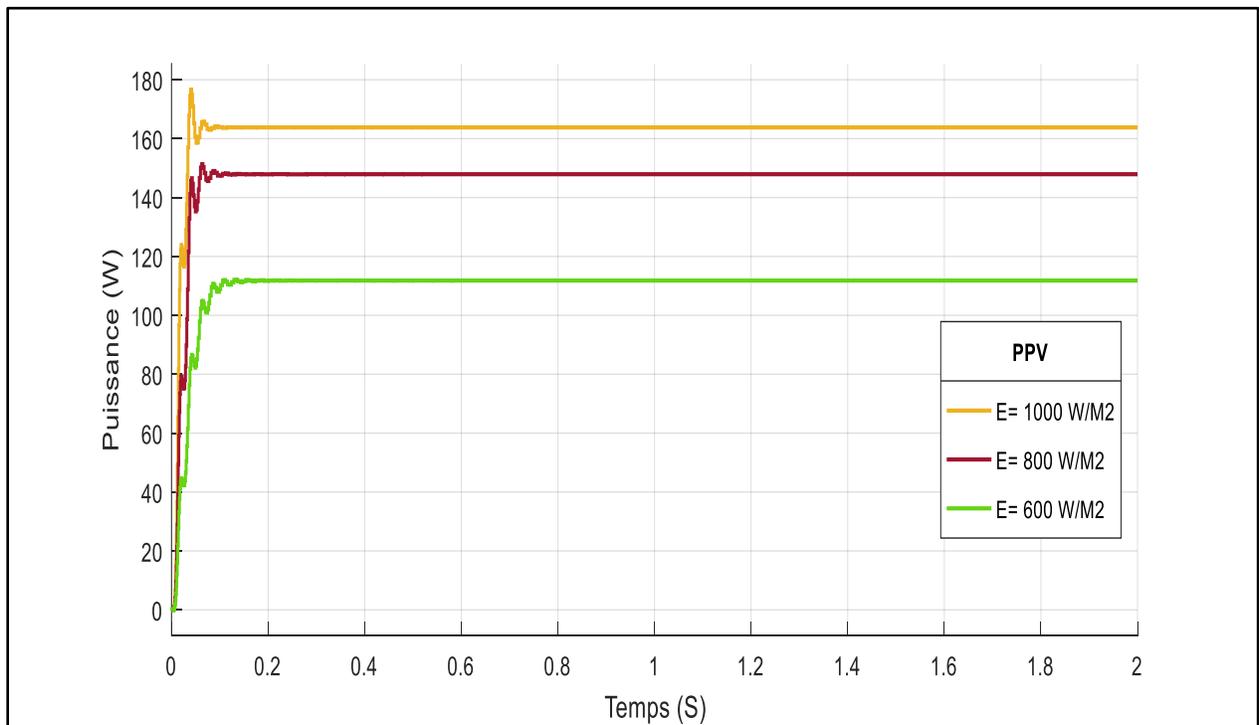


Figure IV.14. Allure de la puissance à la sortie de GPV ($T=25^{\circ}$, $E=1000, 800, 600 \text{ W/M}^2$).

Donc on peut remarquer une bonne adaptation de remplissage de RNA de détermination des outputs de notre système.

IV.9 Conclusion :

Selon les résultats obtenus, on peut conclure que le système RNA fait apparaître une cohérence entre les caractéristiques et l'efficacité des calculs, sa robustesse, sa rapidité et la précision de ses sorties lui permettent de donner des décisions correctes et d'éviter les cas d'indécisions.

Les réseaux de neurones avec leurs capacités de s'adapter à des situations inconnues par le biais de l'apprentissage, ont permis une génération automatique des règles d'intelligence artificielle qu'on peut utiliser dans divers domaines y compris l'énergie.

Conclusion générale

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est une des alternatives qui, depuis l'avènement des grands programmes spatiaux, a montré sa grande souplesse et son aptitude à fonctionner en milieu hostile. Il s'agit d'une solution intéressante aux moyens de productions conventionnels.

La production d'électricité à partir de panneaux PV est intermittente. C'est une fonction du rayonnement solaire, et aussi la température reçu sur Terre, Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale, l'utilisation des contrôleurs MPPT robuste aux changements climatiques est obligatoire. Pour le même but, la méthode MPPT (RNA) offrent des performances mieux que la méthode classique MPPT (P&O).

Selon les résultats obtenus, on peut conclure que le système RNA fait apparaître un bon compromis entre la caractérisation et l'efficacité des calculs. Sa robustesse, sa rapidité et la précision de ses sorties lui permettent de donner des décisions correctes et d'éviter les cas d'indécisions, les réseaux de neurones avec leurs capacités à s'adapter à des situations inconnues par le biais de l'apprentissage. Les résultats obtenus lors de notre travail encouragent la poursuite des recherches dans ce sens.

Référence

- [1].T.Massitan, «gestion du système photovoltaïque d'une alimentation privé connecté au réseaux», Mémoire de master, université de ANNABA 2017.
- [2]. W.Palz L'électricité Solaire. Ed: Dunod Unesco, (1981).
- [3].Michel Rodot et Abdelhanine Benallou. Electricité Solaire au service du développement rural. Guide de l'Ingénieur, Collection Etudes et filières, (1993).
- [4].Z.Hassiba, «optimisation des générateurs électriques d'énergies renouvelables alimentant les système de télécommunications radioélectrique », Mémoire de magister, université de ANNABA 2004
- [5].R. Badreddine, O. Souhila, «modélisation et commande du système photovoltaïque par les réseaux de neurones», diplôme de master option réseaux électrique2017.
- [6]. Mancini.F, « Traitement des déchets issus de la biomasse pour la génération d'énergie » thèse de doctorat, université bordeaux I, 2006
- [7]Belloufi.Y, « Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraîchissement des locaux », mémoire de master, Université de Biskra, 2012
- [8].S. Mohammed EL Amine, H. Zohra, «l'impact des énergies renouvelables sur le réseau électrique ouest algérien 220 kv», mémoire de master, université de Saida 2014.
- [9 10 11].programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique.mars 2011 réalisation SATINFO.
- [12]. Belhadj.M, «Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome», Mémoire de magister, université de Béchar, 2008.
- [13]. B.Azoui «Concept and réalisation of a three phase Brushless DC Motor (BLDCM) for solar application », Thesis of doctorat of science, University of Batna 2002.
- [14]BOUKHERS Djamil« Modélisation Et Commande Des Machines Electriques ».Magister en electrotechnique.
- [15]. S. Ameziane «Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien», Mémoire de Magistère, Université de Batna-2009.

- [16]. Y. Pankow. «Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau base tension. Application au générateur photovoltaïque», Thèse de Doctorat en électronique électrotechnique et automatique. Centre national de recherché technologique Lille. France. 2004.
- [17]. O. Gergaud, «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur», Thèse de Doctorat de l'école Normale Supérieure de Cachan. France. 2002.
- [18]. A. Borni, «Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire», Thèse de Magister Université de Constantine 2009.
- [19]. M. Zakaria. «Contribution a la Modélisation D'une cellule solaire», Mémoire de magistère, Université de Béchar - 2009.
- [20]. H. Chenoufi, «Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion». Mémoire de Magistère, Université de Batna-2005.
- [21]. M. Dahbi «Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome», mémoire de magister, option physique énergétique 2007.
- [22]. B. Djamil, «optimisation d'un système d'energe photovoltaïque a application au pompage », mémoire de magister, option modélisation et commande des machines électriques 2007.
- [23]. A. Méroin, H. Omar, «étude comparative entre defferents modeles électriques photovoltaïque », diplôme de magister, spécialité gene électrique 2012.
- [24] M..A. Abdelaziz, «étude des différentes commandes MPPT pour générateur photovoltaïque », diplôme de master, université de BEJAIA 2013.
- [25].T. Tariq, H. Nouh, « commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque », diplôme de master Académique , université de M'SILA 2019.
- [26].G.Noureddine.M. Abdelkader, «Réalisation d'un converisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », diplôme de master, université de Oum El Bouaghi 2017.
- [27]. S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat, co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.
- [28] S. Chikha, «Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques», Mémoire de Magistère, université de OEB, 2011/2012.

- [29]. M.S. Amamra « Optimisation de la production d'un générateur Photovoltaïque », thèse master université de Ouargla 2015.
- [30] H.Djamel,B.Djohra, « La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque sous Ombrage total et partiel », diplôme de master en académique , université de BEJAIA 2018.
- [31] : 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
- [32] :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
- [33] :C. Touzet, "Le réseaux de neurones artificielles. Introduction et connexionnisme" livre PDF, 1992.
- [34] :F. Sorin, L. Broussard, " Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones "Techniques de l'Ingénieur, traité Informatique industrielle Doc : S 7 582.
- [35] :R. Tahar «Application de l'intelligence artificielle au problème de la stabilité transitoire des réseaux électriques», Thèse magister.
- [36] :R. Tahar «Application de l'intelligence artificielle au problème de la stabilité transitoire des réseaux électriques», Thèse magister.
- [37] :C. Touzet, «Le réseaux de neurones artificielles. Introduction et connexionnisme » livre PDF, 1992.
- [38]:R. Tahar "Application de l'intelligence artificielle au problème de la stabilité transitoire des réseaux électriques", Thèse magister, Constantine 2005.
- [39]:A.Al.Amoudi, L.Zhang, " Application of radial basis function networks for solar array modelling and maximum power-point prediction ", IEE Proceedings. online, Vol 147, No 5 pp310-316, September, 2005.
- [40] : R. Tahar «Application de l'intelligence artificielle au problème de la stabilitétransitoire des réseaux électriques», Thèse magister.
- [41]: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

[42] : A. Harendi et A. Arbaoui, « Calcul de l'MPPT par réseaux de neurone pour un système photovoltaïque », mémoire master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015

[43] : Azouz .H, Zouhir .B, "diagnostic des défaillances par la technique de réseau de neurone artificiel appliqué sur la machine synchrone a aimants permanents", Mémoire d'ingénieur , Université de M'sila, 2005

[44]: B.A. Sediri, « Commande MPPT à base d'un réseau de neurone artificiel pour un système photovoltaïque », mémoire master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019

[45]: Azouz .H, Zouhir .B, "diagnostic des défaillances par la technique de réseau de neurone artificiel appliqué sur la machine synchrone a aimants permanents", Mémoire d'ingénieur, Université de M'sila, 2005

[46]: C. Touzet, "Le réseaux de neurones artificielles. Introduction et connexionisme" livre PDF, 1992.

[47]: M. Parizeau, "Réseaux de neurones", Livre PDF , 2004.

[48]: F. Sorin, L. Broussard, P. Roblin, « Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones », Techniques de l'Ingénieur, traité Informatique industrielle Doc : S 7 582. Constantine 2005.

[49]: F. Othmani Marabout , « Utilisation des réseaux de neurones dans l'estimation des paramètres de la distribution Ki -2 Non Centrale Gamma », mémoire Magister en électronique, Université de Mentouri-Constantine, 2005

[50]: I. Othmani, « L'analyse discriminante et le perceptron multicouche », thèse magister, Université Mentouri Constantine, 2011