REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté deTechnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electrotechnique.

Spécialité : Energie renouvelable en électrotechnique.

Optimisation d'un système pv adapté par une commande MPPT réseau de neurone

Présenté par:**Proposé et Dirigé par**:

- KABACH Abdelhak*Dr. AMOKRANE Zouhir
- FERSSASI Ahmed Chrif

Année universitaire 2020-2021

Dédicaces

A mes très chers parents, source de vie,

d'amour et d'affection

A mes chers frères et leurs enfants, source de

joie et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir et demotivation

A tous mes amis qui m'ont aidé dans mon travail,

A **Rachid**,,**Zaki** *et* **Abdelkarim**.

Au professeur encadrant qui n'a pas lésiné sur nous avec ses indications

*et ses conseils***Dr. AMOKRANE Zouhir**

Abdelhak.

SOMMAIRE

Résumé ……..
INTRODUCTION GENERALE……..……01

I. Chapitre 01:

I.1. Introduction…….....03
I.2. Générateur photovoltaïque…….....….....03
I.3. Le semi-conducteur……..…….... 03
I.4. Les Cellules photovoltaïques……..….....04
I.5. Les différentes technologies des cellules solaires……..….....06
I.6. Modèle mathématique et formulation…….....09
I.7. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....10
I.8. Caractéristiques I=f(V) et P=f(V) aux STC…….....12
I.9. L'influence des différents paramètres de la cellule solaire sur ca fonctionnement.....13
I.10. Panneaux (modules) photovoltaïques…….....17
I.11. Association des cellules/modules photovoltaïques…….....18
I.12. Les différents types de centrales photovoltaïques…….....20
I.13. Avantages et inconvénients d'une installation PV…….....26
I.14. Conclusion…….....……....27

II. Chapitre 02:

II.1. Introduction……..…….…….....29
II.2 Le neurone biologique…….……..…….....29
II.3 Neurone Artificiel...…….....31
II.4 Caractéristiques des réseaux de neurones artificiels….....…34
II.5 Classification des réseaux de neurones…….....34
II.6 Construction d'un réseau de neurones…….....…….....37
II.7 Calcul de la sortie d'un réseau de neurones…….....…37
II.8 L'apprentissage des réseaux de neurones…….....…….....38
II.9 Techniques d'apprentissage des réseaux de neurones artificiels.....39
II. 10 Application des réseaux de neurones artificiels…...….....….42
II.11 Conclusion…….....…42

III. Chapitre 03:

III.1. Introduction…….....44
III.2 Les types des convertisseurs statiques (DC-DC)…..…..... 44
III.3 Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) 47
III.4 Méthode de poursuite du point de puissance maximale……..... 49
III.5 Les techniques du poursuit de point maximal .....…...……....49
III.6Conclusion…….…….....…….……..…52

IV. Chapitre 04:

IV.1. Introduction……...…….....54
IV.2 Simulation du système photovoltaïque …..……..…...…..….....54
IV.3 Simulation de la commande MPPT (P&O) …….....….....58
IV.4 Simulation de la commande MPPT à base de réseau de neurone….61
IV.5 Conclusion……..…….……..….....…66
Conclusion générale:……..…….....68
Bibliographie …… …… 70

Liste des figures

Figure (I.01): jonction PN…..……..**05**

Figure (I.02): Schéma d'une cellule photovoltaïque. ……...……..**05**

Figure (I.03): Silicium Monocristallin……..…….**06**

Figure (I.04) : Silicium Polycrystalline……..……...**06**

Figure (I.05): Silicium Amorphe……...…….**07**

Figure (I.06): Schéma équivalent d'une cellule PV à une diode…..……..**09**

Figure (I.07): Modèle à deux diodes d'une cellule PV……..……**10**

Figure (I.08): Caractéristique Ipv =f(Vpv) dans les conditions : G stc=1000w/m², Tstc=25°C (par outil MATLAB/Simulink)……..……**12**

Figure (I.09): Caractéristique Ppv =f(Vpv) dans les conditions: G stc=1000w/m², Tstc=25°C (par outil MATLAB/Simulink)…..……...**12**

Figure (I.10): Caractéristique I (V) d'un GPV pour différents éclairements (par outil MATLAB/Simulink)…….……..…**13**

Figure (I.11): Courbe de puissance d'un GPV Pour différents éclairements(par outil MATLAB/Simulink)……..**13**

Figure (I.12): Influence de la température sur la caractéristique I (V) (par outil MATLAB/Simulink)…….**14**

Figure (I.13): Influence de la température sur la caractéristique P (V)(par outil MATLAB/Simulink)……..**14**

Figure (I.14): Influence de la résistance série sur la caractéristique I (V)(par outil MATLAB/Simulink)…….**15**

Figure (I.15): Influence de la résistance série sur la caractéristique P (V)(par outil MATLAB/Simulink)……..**15**

Figure (I.16): Influence de la résistance shunt sur la caractéristique I(V)(par outil MATLAB/Simulink)……..…**16**

Figure (I.17): Influence de la résistance shunt sur la caractéristique P(V)(par outil MATLAB/Simulink)……...**16**

Figure (I.18): panneaux photovoltaïque……...……..**17**

Figure (I.19): Module constitué de Ncs connectées en série……..…….. **17**

Figure (I.20):champ photovoltaïque composé de Nst strings en parallèle…….…....**18**

Figure (I.21): Caractéristique résultante d'un groupement en série des3 modules identiques (par outil MATLAB/Simulink)……..**18**

Figure (I.22): réseau Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle des 3 modules identiques (par outil MATLAB/Simulink). …… **19**

Figure (I.23): Caractéristique résultante d'un groupement hybride des 3 modules en série et 3 modules en parallèle, identiques(par outil MATLAB/Simulink)……...…**20**

Figure (I.24): Installation photovoltaïque autonome……..**21**

Figure (I.25): Installation photovoltaïque couplée au réseau…….22

Figure (I.26) : Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT……..**22**

Figure (I.27): cellule électrochimique de base……...**24**

Figure (II.1): Le neurone biologique [06]…….…....**30**

Figure (II.2): Communication neuronale…….…..**30**

Figure (II.3): Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel.…...**31**

Figure (II.4): Le modèle du neurone…….....**31**

Figure (II.5): Le neurone artificiel [12]. ……...**32**

Figure (II.6): Deux autres modèles du neurone artificiel……...**33**

Figure (II.7) : (a): le perceptron (b) : Le réseau monocouche…….……..**35**

Figure (II.8): Le réseau multicouche [11]. …….……..**36**

Figure (II.9): Réseau récurrent « withself-feedback »……..……....**36**

Figure (II.10): Allure Réseau récurrent « fullyconnected ». ……..……..**36**

Figure (II.11): Un réseau de neurones récurrent……....**37**

Figure (II.12): Principe de l'apprentissage supervisé [11]……...….**38**

Figure (II.13): Principe de l'apprentissage non supervisé…….....**38**

Figure (II.14): Flux des signaux de la rétro propagation de l'erreur [05]……..…**39**

Figure (III.1): schéma d'un hacheur Back (série)……..**45**

Figure (III.2): schéma d'un hacheur Booste……...……...**46**

Figure (III.3): Hacheur mixte (série-parallèle).……..…**47**

Figure (III.4): contrôleur MPPT…….....…….....**48**

Figure (III.5): Caractéristique PPV(VPV) d'un panneau solaire…….....…….**50**

Figure(III.6): Chahine élémentaire de la production photovoltaïque…....…….**51**

Figure (IV.1): schéma block d'un système photovoltaïque adapté a la commande MPPT…….…..**54**

Figure (IV.2) : Allure de la puissance en fonction de la tension à (T=25C° G=1000W/m²) **55**

Figure (IV.3): Allure du courant en fonction de la tension à (T=25C° G=1000W/m²).....**55**

Figure (IV.4): Allure de la caractéristique I-V T=25C° (G=1000W/m²;800W/m²; 600W/m²; 400W/m²)……..……..**56**

Figure (IV.5): Allure de la caractéristique P-V T=25C° (G=1000W/m²;800W/m²; 600W/m²; 400W/m²)…….…..**56**

Figure (IV.6): Allure de la caractéristique I-V G= G=1000W/m² (T=25C°; 40C°;35C°;15……..…....**57**

Figure (IV.7): Allure de la caractéristique P-V G= G=1000W/m² (T=25C°; 40C°;35C°;15C°)…….....**57**

Figure (IV.8): schéma block de l'algorithme (P&O)..……...**58**

Figure (IV.9): Allure de la puissance en fonction de temps pour (T=25°C,G=1000W/m²)**58**

Figure (IV.10): Allure de la tension en fonction de temps pour (T=25°C, G=1000W/m²)**59**

Figure (IV.11): Allure du courant en fonction de temps pour (T=25°C, G=1000W/m²)...**59**

Figure (IV.12): Allure de la tension à la sortie du système PV (T=25°C,G=1000W/m²)..**60**

Figure (IV.13): Allure du courant à la sortie du système PV (T=25°C, G=1000W/m²)...**60**

Figure (IV.14): schéma block d'un SPV adapté à la méthode MPPT (RNA)..…….**61**

Figure (IV.15): architecture du RNA pour la commande MPPT……..……....**62**

Figure (IV.16): résultat d'apprentissage du réseau...……**63**

Figure (IV.17): schéma Bloc du réseau de neurone artificielle dans SIMULIN……**63**

Figure (IV.18): Allure de la puissance en fonction du temps (T=25°C,G=900W/m²)..…**64**

Figure (IV.19): Allure du courant en fonction du temps (T=25°C,G=900W/m²)…..**64**

Figure (IV.20): Allure de la puissance en fonction du temps (T=25°C,G=900W/m²).….**65**

Figure (IV.21): Signale de l'éclairement à l'entrée du système PV……...…...**65**

Figure (IV.22): Allure de la puissance en fonction du temps……..…….**66**

Liste des tableaux

Tableau (01):État comparatif des différentes technologies des cellules photovoltaïques ……..**08**

Tableau (02): caractéristique électrique du module photovoltaïque MSX60……..**54**

Résumé

L'objectif visé dans c:e travail est le calcule et le suive du point de puissanceLe maximum (MPPT) pour un système photovoltaïque fonctionne selon le mécanisme objectif visé dans ce travail est le calcule et le suive du point de puissance maximum (MPPT) pour un système photovoltaïque d'intelligence artificielle " réseau de neurone artificielle ".e fonctionne selon le mécanisme d'intelligence artificielle" réseau de neurone artificielle ".Dans notre travail, on a conçu un système PV où le générateur PV est le module BP Dans notre SX150S produisant dans les conditions standards de test (CST), une puissance crête de travail, on a conçu un système PV où le générateur PV est le module.

MSX60 150W, un courant optimal de 4.35 A et une tension optimale de 34.5V. Les résultatsde produisant dans les conditions standards de test (CST), une puissance crête de 150simulation obtenus sous Matlab/Simulink montrent la performéW, un courant optimal de 3,5 A et une tension optimale de 17.1ance du contrôle dans leV. Les résultats de simulation obtenu comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.Mots sous Matlab/Simulink montrent la performance du contrôle dans: Système PV - comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.Convertisseur survolteur - Commande MPPT - Réseau de neurone.

Mots-clés : system PV modélisation -convertisseur survolteur–command MPPT- réseau de neurone –simulation.

Abstract:

The objective targeted in this work is the calculate and monitor the power point The maximum (MPPT) for a photovoltaic system operates according to the objective mechanism targeted in this work is the calculate and monitor the maximum power point (MPPT) for an artificial intelligence photovoltaic system "artificial neuron network" .e works according to the artificial intelligence mechanism "artificial neuron network". In our work, we designed a PV system where the PV generator is the BP module In our SX150S producing peak working power under standard test conditions (CST), we designed a PV system where the PV generator is the module.

MSX60 150W, optimum current of 4.35 A and optimum voltage of 34.5V. The results of producing under standard test conditions (CST), a peak power of 150 simulation obtained under Matlab / Simulink show the performance W, an optimal current of 3.5 A and an optimal voltage of 17.1ance of the control in the V The simulation results obtained dynamic behavior of photovoltaic systems. Words under Matlab / Simulink show the performance of the control in: PV system - dynamic behavior of photovoltaic systems. Booster converter - MPPT control- Neuron network.

Keywords: PV system modeling - booster converter - MPPT command - neuron network - simulation.

ملخص

الهدف المنشود في هذا العمل هو حساب ومتابعة نقطة القوة القصوى (MPPT) لنظام كهروضوئي يعمل وفق الآلية الموضوعية التي تهدف في هذا العمل هو حساب ومتابعة نقطة القوة القصوى (MPPT) لنظام الطاقة الكهروضوئية للذكاء الاصطناعي "شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية". وتعمل وفقًا لآلية الذكاء الاصطناعي "شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية".

في عملنا، قمنا بتصميم نظام PV حيث يكون المولد الكهروضوئي هو وحدة BP في إنتاجنا SX150S ذروة قوة العمل في ظل ظروف الاختبار القياسية (CST) ، قمنا بتصميم نظام PV حيث يكون المولد الكهروضوئي هو الوحدة النمطية.

MSX60 150W ، التيار الأمثل 4.35 أمبير والجهد الأمثل 34.5 فولت. تُظهر نتائج الإنتاج في ظل ظروف الاختبار القياسية (CST)، قدرة الذروة البالغة 150 واط، المحاكاة تم الحصول عليها بموجب "Matlab /Simulink" الأداء W، والتيار الأمثل 3.5 A والجهد الأمثل 17.1 فولت من عنصر التحكم في فولت نتائج المحاكاة تم الحصول على السلوك الديناميكي للأنظمة الكهروضوئية.

تظهر الكلمات تحت"Matlab/Simulink" أداء التحكم في: النظام الكهروضوئي - السلوك الديناميكي للأنظمة الكهروضوئية. محول الداعم - التحكم MPPT - شبكة الخلايا العصبية.

الكلمات المفتاحية: نمذجةالأنظمة الكهروضوئية - المحول المعزز –التحكم MPPT - شبكة الخلايا العصبية - المحاكاة.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Le monde est en développement continu; ce qui engendre l'augmentation de la consommation d'énergie de plus en plus forte ; la problématique imposée de ce développement est la recherche de sources d'énergie inépuisable vue que toutes les énergies déjà utilisées sont de sources fossiles qui ont une durée de régénérescence extrêmement lente à l'échelle de la vie humaine ce qui engendrera un risque non nul de leurs épuisement (comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et L'uranium), En plus des pollutions et réchauffements climatique dus à leurs production (l'effet de serre).

L'énergie solaire représente certainement la source d'énergie renouvelable la plus élégante. Elle est entrainé de s'imposer comme une valeur sure dans les applications à petite et moyenne consommation d'énergie, surtout depuis que les panneaux solaires sont devenus moins chers pour des rendements meilleurs. Les panneaux solaires, bien qu'ils soient de plus en plus performants, ont des rendementsqui restent assez faibles(autourde 20%), c'est pourquoi il faut exploiterlemaximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie.

Une caractéristique importante de ces panneaux est la puissance maximale disponible, elle est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé «Maximum Power Point » (MPP), défini par une tension et un courant donnés, et ce point se déplace en fonction des conditionsmétéorologiques (ensoleillement, température, etc.) ainsi que des variations de la charge.

Extraire le maximum de puissance nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Le problème qui se pose toujours, est comment faire fonctionner le système photovoltaïque pour qu'il fournisse sa puissance maximale? Plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité des systèmes photovoltaïques étaient appliqués, et des techniques suivies pour avoir une adaptation et un rendement élevé.

Chapitre (I)
Étude générale d'un système photovoltaïque

I. Chapitre (I)

I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable, qui permet à partir du rayonnement solaire de produire de l'électricité grâce à des cellules photovoltaïques montées en série et/ou en parallèle. Lorsque plusieurs cellules sont reliées entre-elles, celles-ci forment un module solaire photovoltaïque. Différentes technologies de modules existent aujourd'hui sur le marché.

Une installation solaire classique comporte en général plusieurs modules afin de subvenir aux besoins en énergie de l'installation, celle-ci peut se réaliser aussi bien chez un particulier que chez un professionnel ou dans une centrale solaire photovoltaïque. Cette installation peut être isolée comportant des batteries et répondant à des besoins locaux ou alimentant un réseau de distribution électrique (connecté au réseau).

I.2. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique sous forme de tension et de courant continu, variable selon l'influence de l'éclairement sur les panneaux solaires. Le composant de base de cette conversion est la cellule photovoltaïque [12].

Les cellules photovoltaïques sont composées de semi-conducteurs qui leur permettent de transformer directement une énergie électromagnétique sous forme de photon reçu par le soleil en énergie électrique sous forme d'un courant continu. Les énergies des photons absorbés par le matériau semi-conducteur créent des porteurs de charges appelés électrons et trous [01].

I.3. Le semi-conducteur

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants.

Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques.

Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

A la température de **0** K (-273°C)chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal, les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible.

Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou [11].

I.4. Les Cellules photovoltaïques

I.4.1. Jonction PN

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dope N (donneurs d'électron)et d'un semi-conducteurdope P(compose de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions:

- une jonction PN (homo-jonction, i.e.: les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas)
- une hétéro jonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents)
- une jonction métal-semi-conducteur.

Danscestroisconfigurations, les phénomènesphysiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires.

Les électrons de la jonction se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Il ne reste que des atomes ionisent fixe. Cette zone (dite de déplétion) de porteurs libres est appelée«zone de charge d'espace»créant un champ électrique. En dehors, le champ électrique est nul.

Dans une homo jonction à l'équilibre thermodynamique, à la frontière des deux régions, il s'estforme pendantle processusde déplétion,une barrière de potentiel(VD)(tension dediffusion).

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

VD [V] tension de diffusion sur une jonction,

k=1,380662 10^{-23}J.K^{-1}constante de Boltzmann,

T [°K] température absolue du cristal,

q = 1,602.10^{-19}C charge élémentaire,

Nd [cm^{-3}] concentration des donneurs,

NA [cm^{-3}] concentration des trous,

n_i [cm^{-3}] concentration intrinsèque,

Avec VT = kT/q = 26 mV a la température ambiante.

Les cellules solaires photovoltaïques sont souvent des jonctions dissymétriques, c'est-adire qu'un dopage est plus fort que l'autre, dans ce cas, la zone de charge d'espace se trouve pratiquement dans la région la plus faiblement dopée [12].

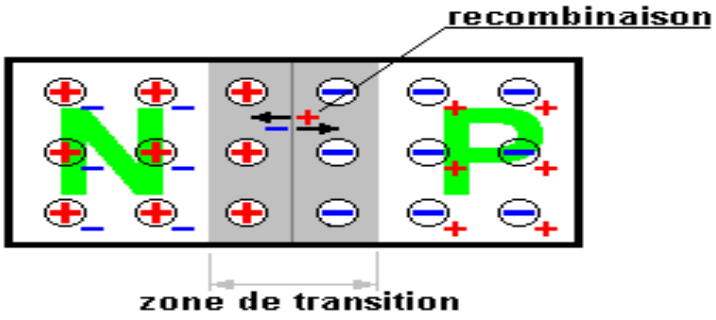


Figure (I: 1) : jonction PN.

I.4.2. Principe de fonctionnement

Une cellulePVestun capteurconstitué d'un matériau semi-conducteur absorbant de l'énergie lumineuseetlatransformantdirectementencourantélectrique.Le principede fonctionnementd'une cellule PV fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérées, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (f.é.m.) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque [20]**.**

La Figure (II. 1)illustre la constitution d'une cellule PV à base de silicium.

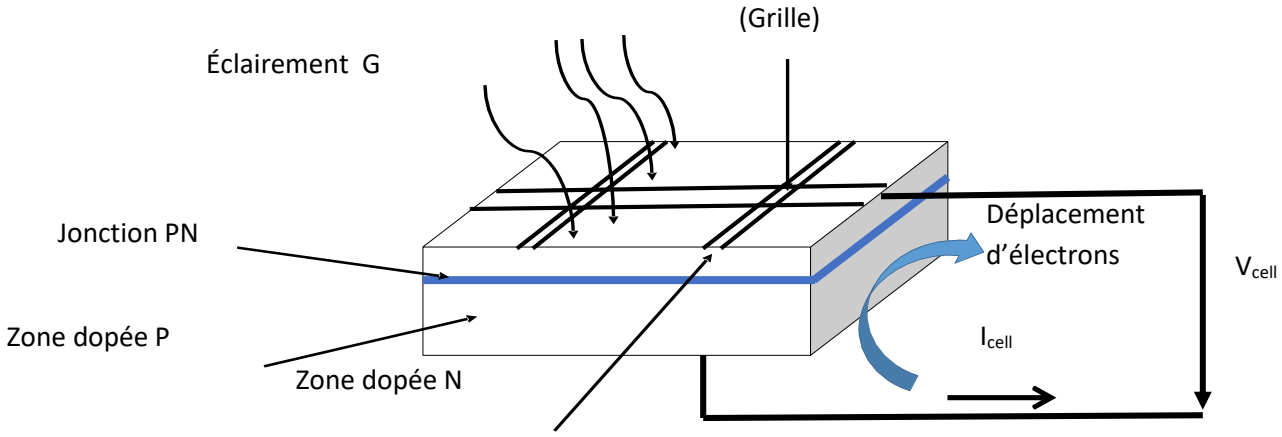


Figure (I: 2) : Schéma d'une cellule photovoltaïque.

I.5. Les différentes technologies des cellules solaires

Lescellulesphotovoltaïquesles plusrépanduessont constituéesdesemi-conducteursprincipalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs: de sulfure de cadmium (CDs), de tellurure de cadmium(Cd Te),de Germanium(Ge), de sélénium(Se) ou d'arséniuredegallium(Ga As). Lesiliciumest actuellementlesemi-conducteurle plus utilisépourfabriquer lescellulesphotovoltaïques, car il est très abondant dans la nature [11].

En effet, il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques dont les plus importants sont les suivantes [11]:

I.5.1. Les cellules mono- cristallines

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules, ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

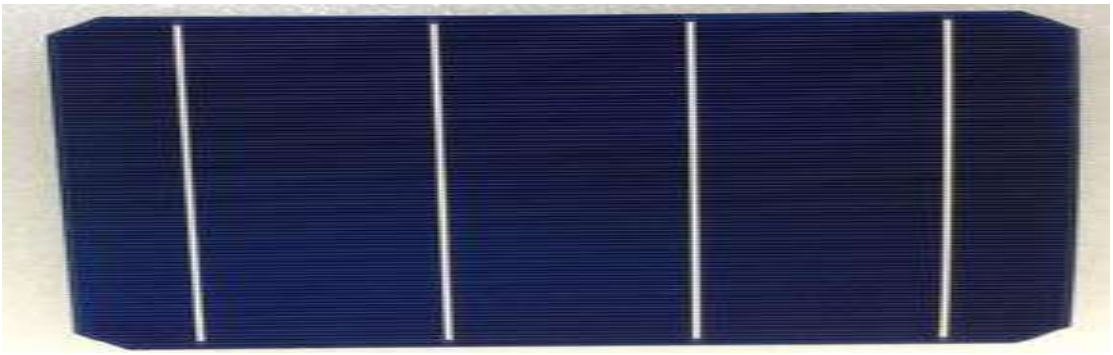


Figure (I: 3) : Silicium Monocristallin.

I.5.1.1.Avantage :

- Elles permettent d'obtenir des rendements élevées (rendement entre 13 à 17%).

I.5.1.2.Inconvénients :

- Leur cout est très élevé.
- Rendement faible sous un faible éclairement.

I.5.2. Les cellules poly-cristallines

Elles sont constituées de plusieurs cristaux .la cellule à un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme), Leur rendement est de 11 à 15%.

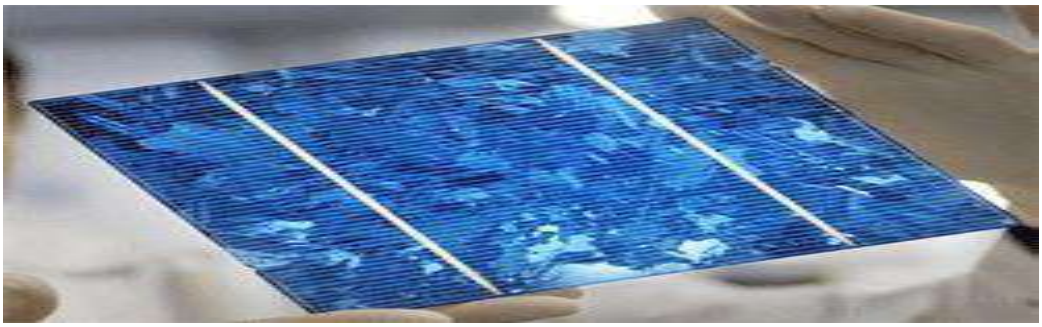


Figure (I: 4): *SiliciumPolycrystalline.*

I.5.2.1.Avantage :

- Un bon rendement, mais cependant moins bon que pour les cellules monocristallins.
- Elles offrent actuellement un bon rapport qualité/prix.

I.5.2.2.Inconvénients :

- Rendement faible sous un faible éclairement.

I.5.3. Les cellules amorphes

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé, c'est la cellule des calculatrices et des montres dites «solaires».

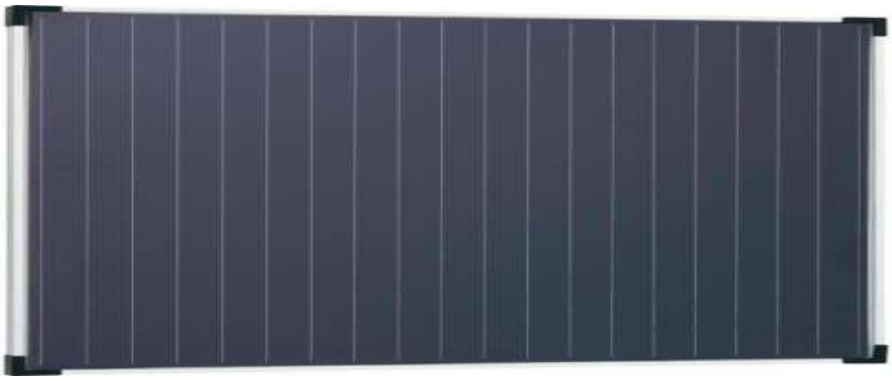


Figure (I: 5) : Silicium Amorphe.

I.5.3.1.Avantage :

- Moins cher que les autres.
- Fonctionnement avec un éclairement faible.

I.5.3.2.Inconvénients :

- Rendementfaible.
- Performances qui diminuent avec le temps, durée de vie courte.

I.5.4. Cellule En Silicium Multi cristallin

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

I.5.4.1.Avantage :

- Cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module.
- Bon rendement de conversion, environ 100 WC/m² (voire plus), mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin.
- Lingot moins cher à produire que le monocristallin.

I.5.4.2.Inconvénient :

- rendement faible sous un faible éclairement.

I.5.5. Cellule Tandem

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

I.5.5.1.Avantage :

- Sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde. Excellent rendement.

I.5.5.2.Inconvénient :

- Coût élevé dû à la superposition de deux cellules [01].

Tableau (I: 1) : État comparatif des différentes technologies des cellules photovoltaïques[09].

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium monocristallin	12 à 18% (24,7% au laboratoire)	20 à 30 ans	*Très performant *Stabilité de production *Méthode de production couteuse et laborieuse.	Aerospatiale, modules pour toits, façades,…
SiliciumPoly cristallin	11 à 15% (19,8% au laboratoire)	20 à 30 ans	*Très performant *Stabilité de production *Méthode de production couteuse et laborieuse.	Modules pour toits, façades, générateurs…
Amorphe	5 à 8%(13%)au laboratoire	≤ 10 ans	*Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. *Fonctionnement faible si luminosité *Fonctionnement par temps couvert. *Fonctionnement si Ombrage Partiel. *La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, lapuissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominaleet se stabilise après quelques mois.	Appareils Électroniques (montres, calculatrices…), intégration dans le bâtiment
Composite monocristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5%Au laboratoire)		Lourd, fissure facilement	Systèmes deconcentrateurs Aerospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS,CdTe,ClGS , etc.)	8%(16% au laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils Électroniques (montres,calculatrices...), intégration dans le bâtiment

I.6. Modèlemathématique et formulation

I.6.1. Modèle réel à une diode d'une cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est présenté dans la Figure (I.6), il inclut une source de courant, une diode, une résistance série et une résistance shunt.

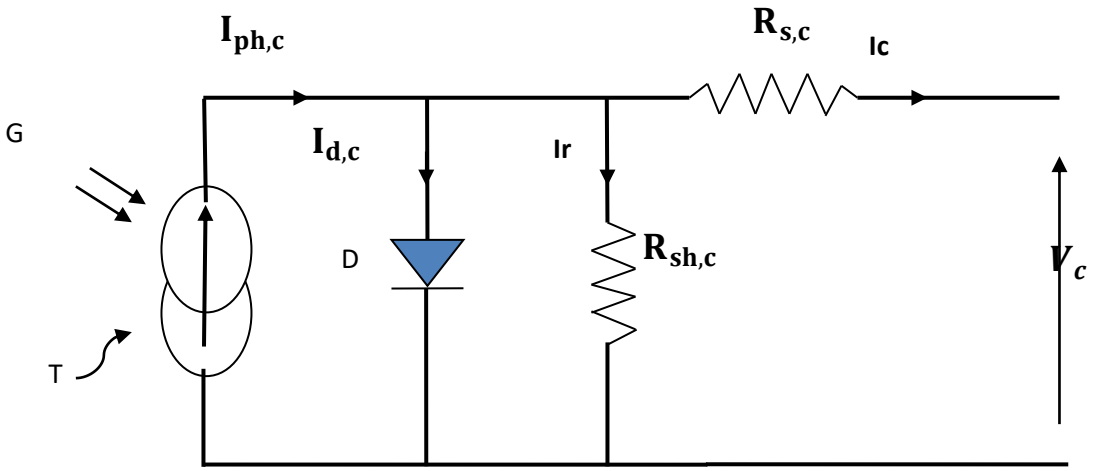


Figure (I: 6) : Schéma équivalent d'une cellule PV à une diode.

En se basant sur le circuit, le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante :

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

Dans cette équation,Iph,c'est le photo-courantd'unecellule,I0, c'est le courantdesaturation inverse de la diode d'une cellule, q et n et K et T désignent respectivement la charge de l'électron, facteur d'idéalité de la diode, Constante de Boltzmann et la température de la cellule, V, c'est la tension aux bornes de la cellule, I,c'est le courant de la cellule, Rs,c et Rsh,c sont les résistances série et shunt de la cellule [12].

I.6.2. Modèle à deux diodes

Actuellement le modèle électrique le plus proche d'une cellule photovoltaïque est celui à deux diodes (double exponentiel), où la cellule est bien sûr présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant avec deux diodes en parallèle.

Et pour tenircompte desphénomènesphysiques au niveau de la cellule,comme les modèles précédents, ce modèle est complété par les deux résistances série Rs et parallèle Rsh comme le montre le schéma électrique équivalent de la Figure (I.7) [12].

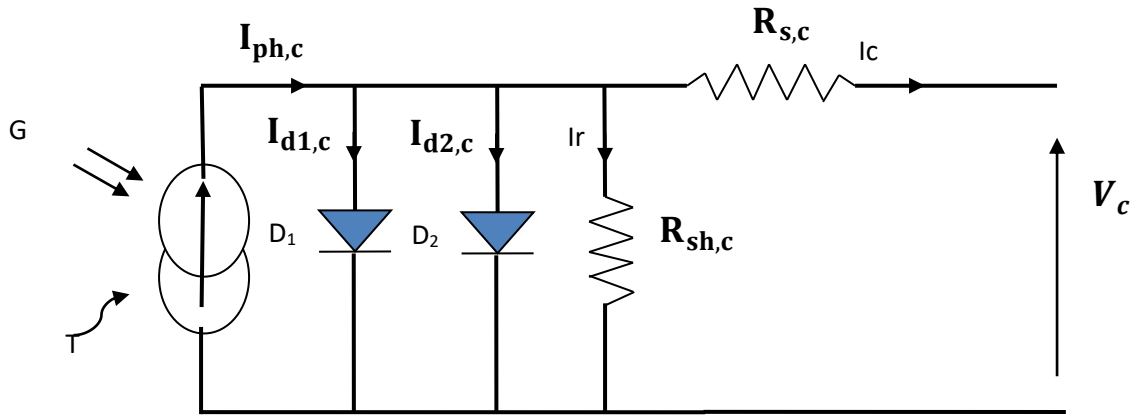


Figure (I: 7) : Modèle à deux diodes d'une cellule PV.

Avec quelques difficultés de calcul et développement mathématique, ce modèle donne un courant presque semblable au courant d'une cellule PV selon la relation :

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

Donc :

$$I_c = I_{ph,c} - I_{01,c}\left(\exp^{\frac{q(Vc+Rs,c\times Ic)}{n1KT}} - 1\right) - I_{02,c}\left(\exp^{\frac{q(Vc+Rs,c\times Ic)}{n2KT}} - 1\right) - \frac{V_c + R_{s,c}\times I_c}{R_{sh,c}} \quad (I.4)$$

Avec :

n1 et n2 : Facteurs d'idéalité des diodes D1et D2 respectivement.

I01,c et I02,c: Courants de saturation des diodes D1 et D2 respectivement.

I.7. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

I.7.1. Courant de court-circuit:

Icc = Iph, C'est la plus grande valeur du courant généré par une cellule. Elle est produite sous des conditions de court-circuit : V = 0 [10].

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

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme.

$$I_0\left(\exp^{\frac{(Icc+Rs)}{nKT}} - 1\right) \quad (I.6)$$

Devant I_{pl}'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

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

I.7.2. Tension de circuit ouvert

Correspond à la chute de tension dans la diode (jonction p-n), quand il est traversé par le photo courant Iph(à savoir ID = I ph), à savoir lorsque le courant généré est I=0. Il reflète la tension de la cellule dans la nuit et il peut être mathématiquement la formule suivante[10]:

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

I.7.3. Facteur de forme FF

Facteur de forme FF est le rapport entre la puissance maximale qui peut être transmise à la charge et le produit de Icc et VCO[12]:

$$FF = \frac{P_{MPP}}{Voc.Icc} = \frac{Vopt.Iopt}{Voc.Icc} \quad (I.9)$$

Le facteur de forme est la mesure réelle de la caractéristique I-V, Sa valeur est supérieure à 70/100 pour une bonne cellule. Il diminue lorsque la température de la cellule est augmentée.

I.7.4. Le rendement η

Le rendement η des cellules photovoltaïque désigne le rendement de conversion en puissance, Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{p_{opt}}{p_{incidente}} = \frac{Vopt \times Iopt}{G \times S} \quad (I.10)$$

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

I.8. Caractéristiques I=f(V) et P=f(V) aux STC

Nous allons étudier le comportement de notre panneau photovoltaïque dans les conditions standard de fonctionnement a ensoleillement G = 1000 W/m2 et a température T = 25C°

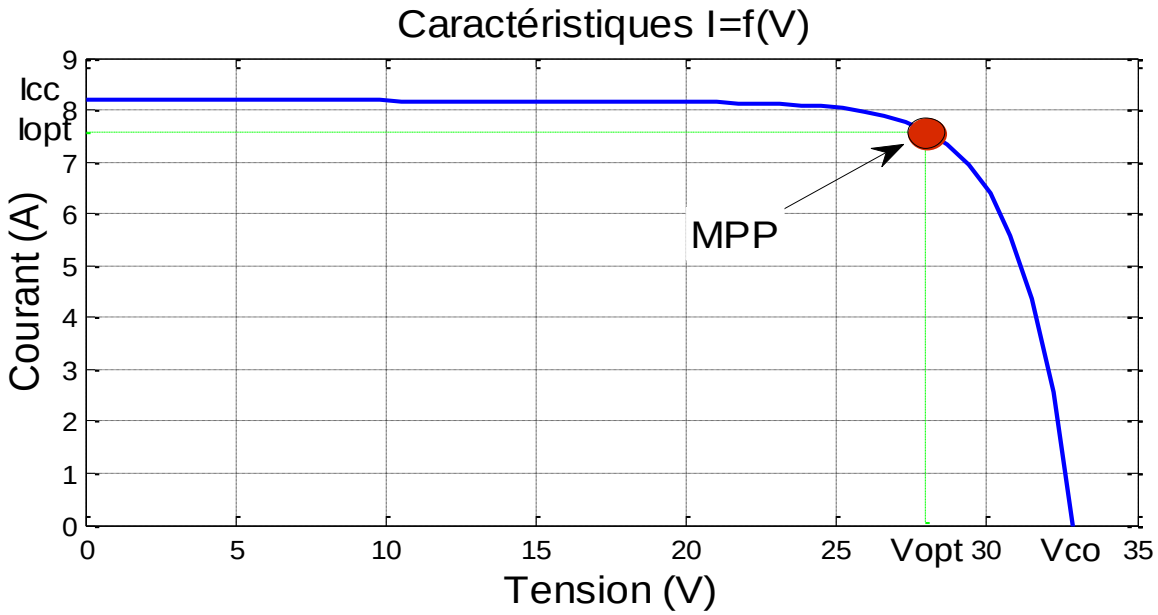


Figure (I: 8) : CaractéristiqueIpv =f(Vpv) dans les conditions: G stc=1000w/m², Tstc=25°C (par outil MATLAB/Simulink)

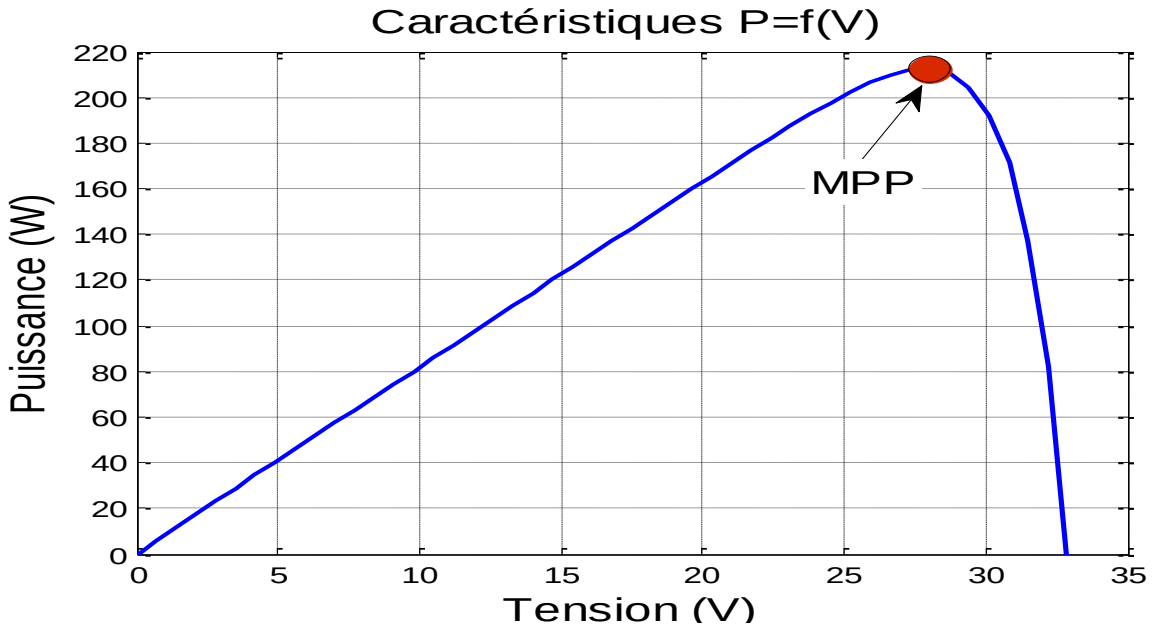


Figure (I: 9) : Caractéristique Ppv =f(Vpv) dans les conditions : G stc=1000w/m², Tstc=25°C (par outil MATLAB/Simulink)

On remarque trois points très importants qui donnent les grandeurs électriques de système en court-circuit (I = 8.1 A, V = 0), en circuit ouvert (I=0, = 32.9 V) et le point de puissance maximale = 212 W qui correspond à (I= 7.6 A, =27.9 V).

I.9. L'influence des différents paramètres de la cellule solaire sur ca fonctionnement:

I.9.1. L'influence de l'éclairement:

Les figures [(II.10), (II.11)] présente les caractéristiques I (V), P(V) on a tracé la variation du courant et la puissance par rapport à la tension pour plusieurs intensités de rayonnement solaire.

Dans la partiegauchedes caractéristiques, le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque la lumière baisse.

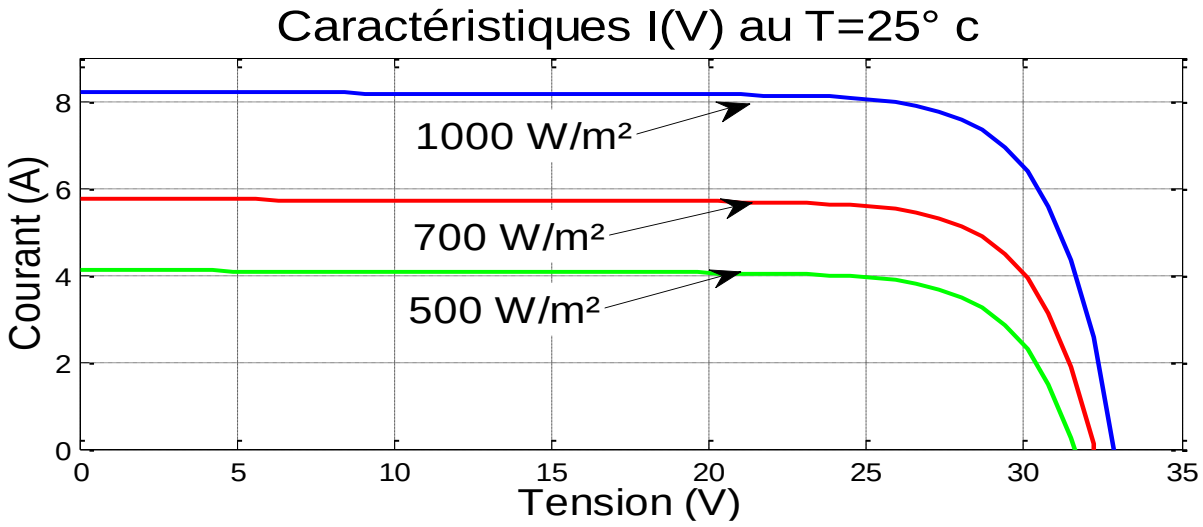


Figure (I: 10) : Caractéristique I (V) d'un GPV pour différents éclairements (par outil MATLAB/Simulink)

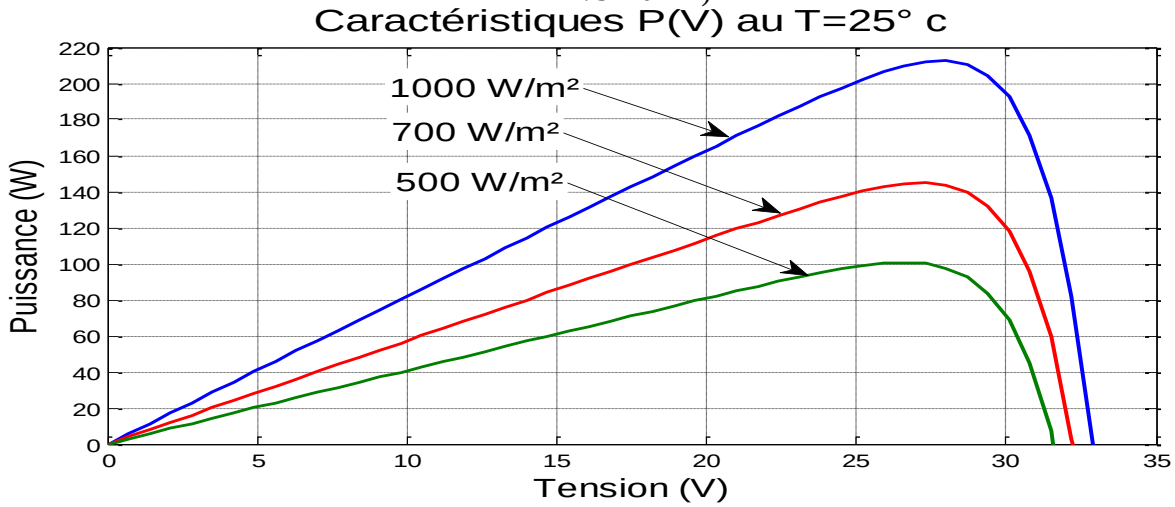


Figure (I: 11) : Courbe de puissance d'un GPV Pour différents éclairements(par outil MATLAB/Simulink)

I.9.2. L'influence de la température:

L'influencede latempérature est très significative,et demandera des choix importants de conception des systèmes.

La température de la cellule photovoltaïque induit un effet notable sur la tension de celle-ci. Par contre, l'effet de la température sur le courant de la cellule photovoltaïque est négligeable. Il apparaît que plus la température du milieu de la celluleaugmente, plus la tension à vide de celle-ci diminue. La puissance de la cellule étant égale au produit du courant et de la tension, la même remarque s'applique sur la courbe puissance.

L'effet est représenté à les figures sous-dessous [II.12 et II.13]où l'on voit différentes courbes I(V) et P(V) d'un module entre -2°c et 45°c sous un ensoleillement de 1000W/m^2.

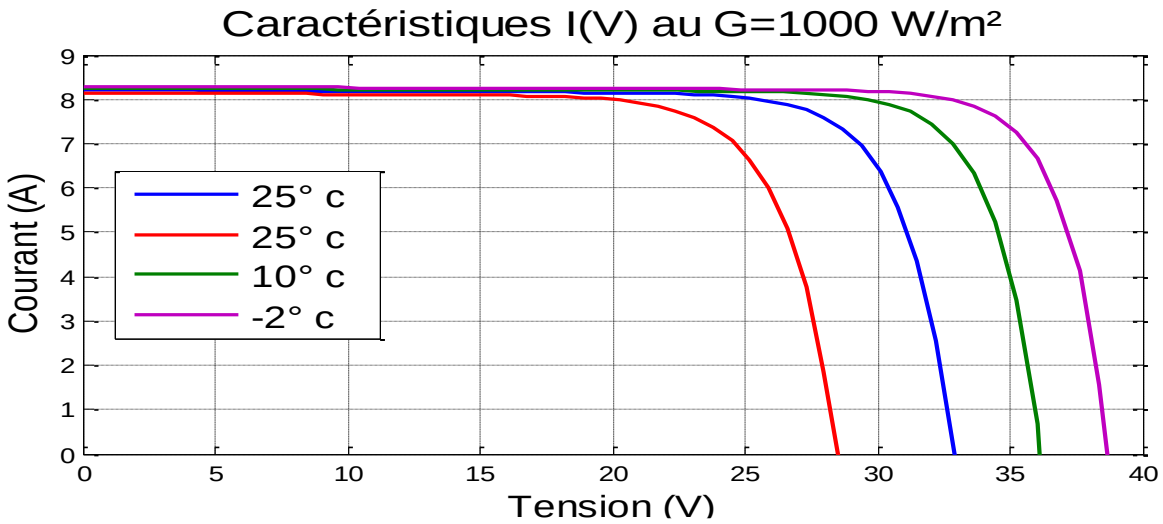


Figure (I: 12) : Influence de la température sur la caractéristique I (V) (par outil MATLAB/Simulink).

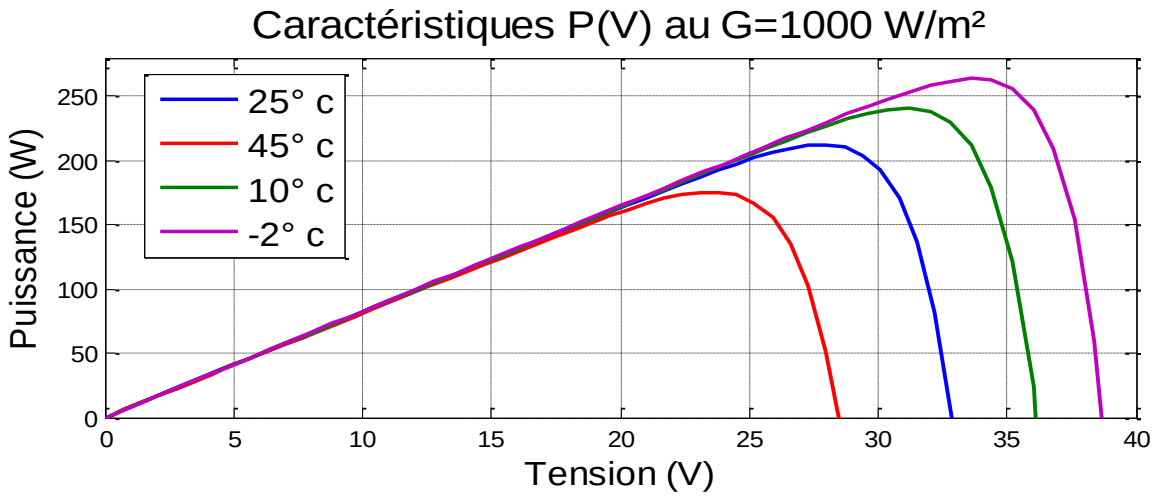


Figure (I: 13) : Influence de la température sur la caractéristique P (V)(par outil MATLAB/Simulink).

I.9.3. L'influence de la résistance série:

La résistancesériecaractérise lespertespar effets Joule de la résistance propre duSemi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contactes ohmiques de la cellule.

L'influence de La résistance série sur la caractéristique I(V) est schématisée sur la figure (I.14) Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe I(V), dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension, à droite du point de puissance maximum [01].

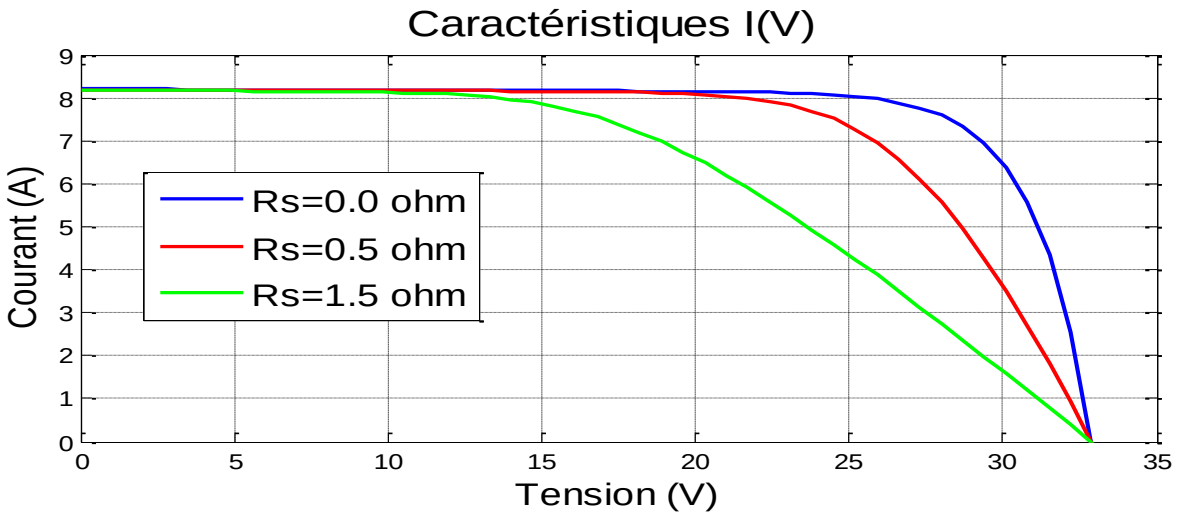


Figure (I: 14) : Influence de la résistance série sur la caractéristique I (V) (par outil MATLAB/Simulink).

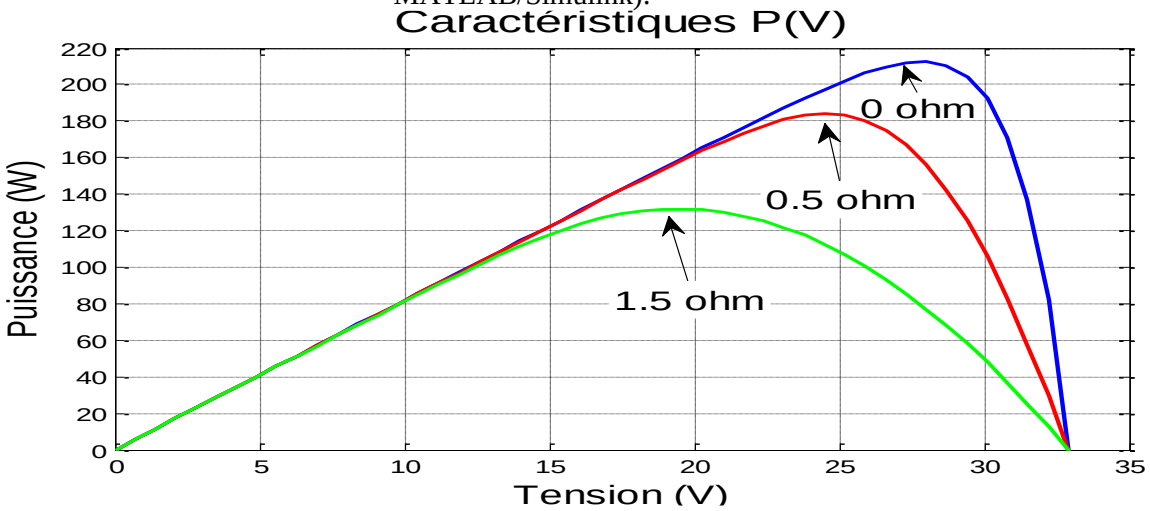


Figure (I: 15) : Influence de la résistance série sur la caractéristique P (V)(par outil MATLAB/Simulink).

I.9.4. L'influence de la résistance Shunt:

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge d'espace.

L'influencedeLa résistanceparallèle sur la caractéristique I(V) est représentée sur la figure (II.16).

La résistance parallèle est directement liée au processus de fabrication, et son influence

Nesefaitsentirquepour de très faiblesvaleurs ducourant(proche du courantde court-circuit) [12].

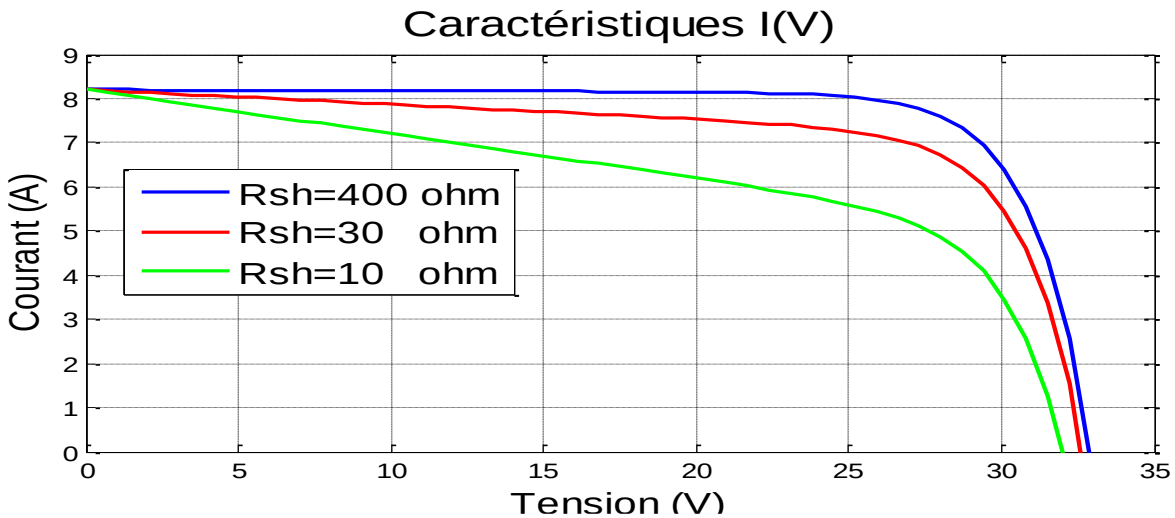


Figure (I: 16) : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique I(V)(par outil MATLAB/Simulink).

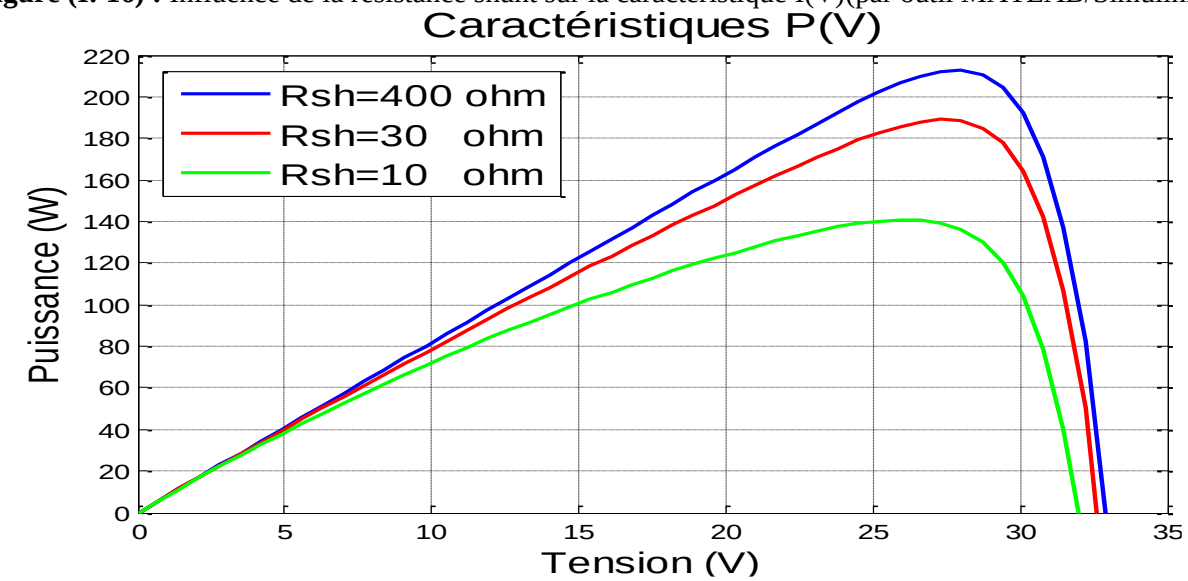


Figure (I: 17): Influence de la résistance shunt sur la caractéristique P(V)(par outil MATLAB/Simulink).

I.10. Les panneaux (modules) photovoltaïques

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série ou en parallèle afin d'obtenir des performances électriques désirées, tels que la puissance, le courant de court-circuit (Icc) et la tension en circuit ouvert (Voc) [11].



Figure (I: 18) : panneaux photovoltaïque.

I.10.1. Structure des panneaux photovoltaïques

Généralement les cellules photovoltaïques sont associées pour constituer un panneau, Ces derniers sont regroupés en série ou bien en parallèle selon la puissance demandée pour protéger les modules PV contre le point chaud (hot-spot) à cause d'un déséquilibre d'éclairement il faut monter une diode au silicium "diode de by-pass" en parallèle tête-bêche (Figure (I.19) sur une branche en général de dix-huit cellules en série, cette diode sera conductrice dans le cas de l' ombrage d'une ou plusieurs cellules dans une branche et bloquée dans le cas normal [01].

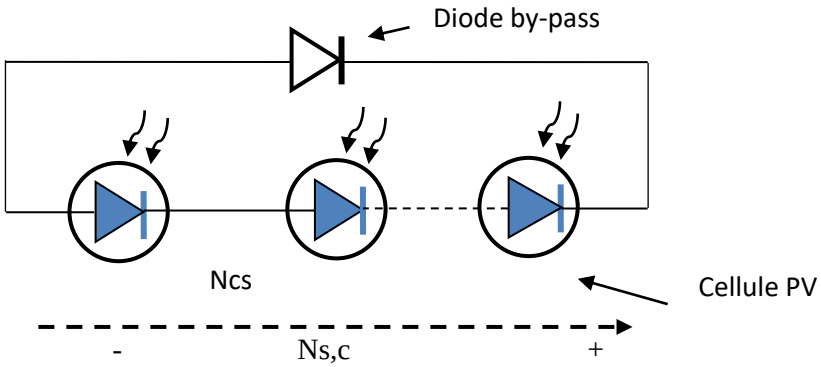


Figure (I: 19) : Module constitué de Ncs connectées en série.

Avec :Ncs nombre de cellules en séries.

✓ **String et champ photovoltaïque**

Suivant la puissance du panneau, le string est constitué de plusieurs modules connectés généralement en série. Ces strings sont connectés en parallèle pour former un champ photovoltaïque. Pour éviter qu'une branche de cellules connectées en série ne reçoive de l'énergie d'autres strings connectés en parallèle, il faut installer dans chacune des branches des diodes en série (diode anti retour) comme indiquée dans la Figure (I.20) [09].

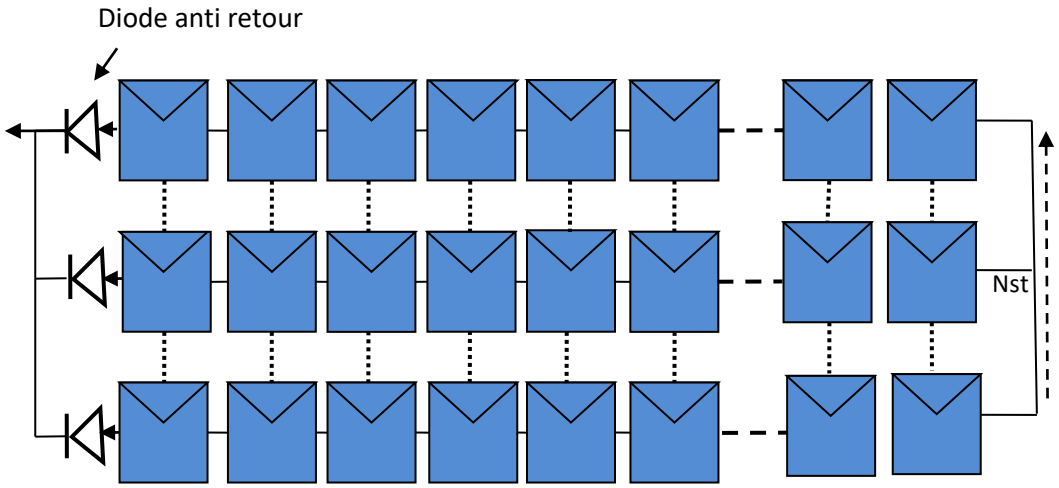


Figure (I: 20) : champ photovoltaïque composé de Nst strings en parallèle.

Avec :Nstle nombre de strings branchés en parallèle.

I.11. Association des cellules/modules photovoltaïques

I.11.1. Association en série

Dans un groupementen série,les cellules sont traversées par le même courantet la caractéristique résultantedu groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

La figure (I.21) montre la caractéristique I(V) résultante obtenue en associant en série des 3 modules identiques.

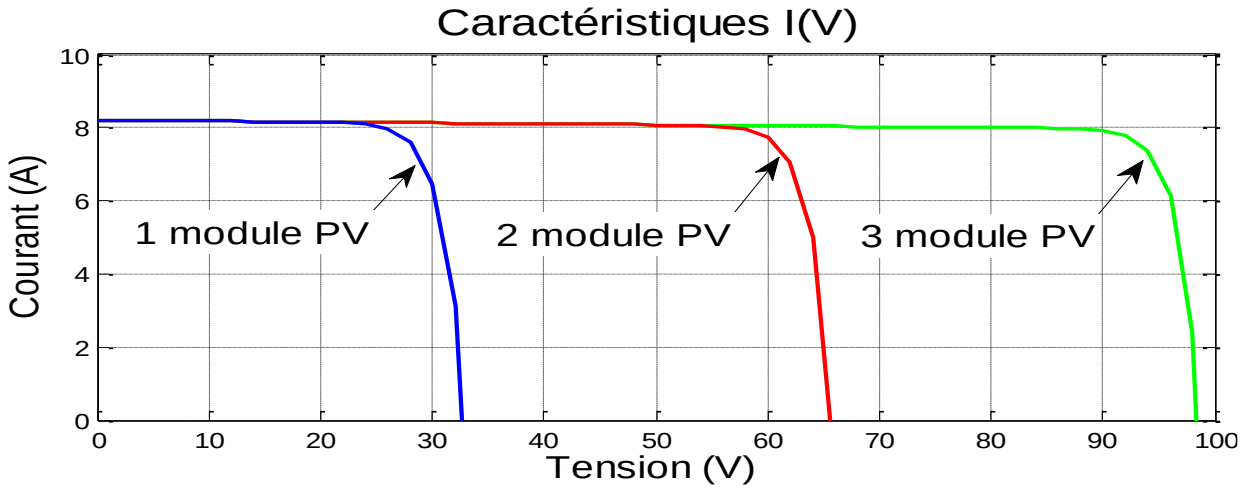


Figure (I: 21) : Caractéristique résultante d'un groupement en série des3 modules identiques (par outil MATLAB/Simulink).

I.11.2. Association Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

La figure (I.22) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles des 3 modules identiques.

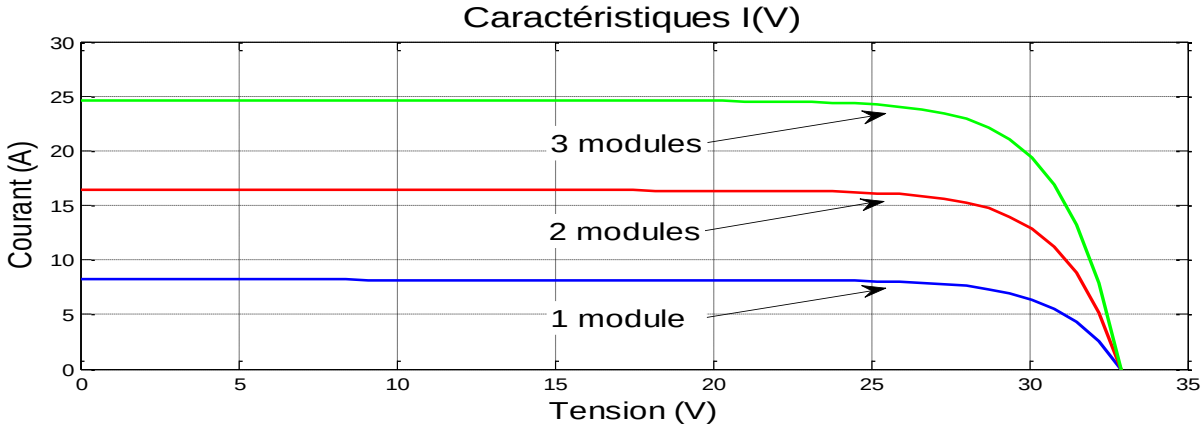


Figure (I: 22): Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle des 3 modules identiques(par outil MATLAB/Simulink).

I.11.3. Association mixte

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations [12] :

$$I'_{cc} = n_p \times I_{cc} \quad (I.11)$$

$$V'_{co} = n_s \times V_{co} \quad (I.12)$$

Avec :

np: nombre des cellule en parallèle,
ns: nombre des cellule en série.

La figure (I.23) montre la caractéristique résultante obtenue en associant, des 3 modules en série et 3 modules en parallèle, identiques.

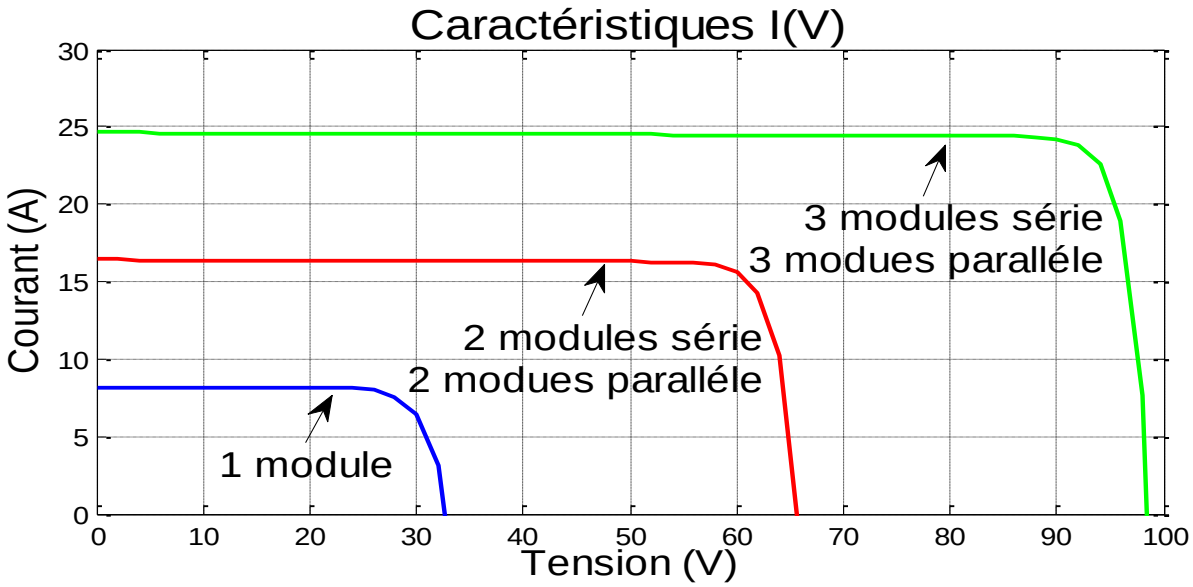


Figure (I: 23) : Caractéristique résultante d'un groupement hybride des 3 modules en série et 3 modules en parallèle, identiques(par outil MATLAB/Simulink).

I.12. Les différents types de centrales photovoltaïques

L'énergie photovoltaïque est exploitée de multiples façons. On peut distinguer les installations autonomes et les installations raccordées au réseau.

I.12.1. Les systèmes photovoltaïques autonomes

Les systèmesphotovoltaïquespeuventêtre adaptés pour répondre à tous besoins, petits ou grands: calculatrices,montres,matérieldetélécommunication,panneauxde signalisation,feux de stationnement, et balises météo.

Pionnières, les centrales photovoltaïques autonomes sont destinées à des consommateurs éloignés du réseau électrique (refuges en montagne, relais hertziens, stations de pompage agricole).

Lescentralesdomestiquesautonomessontdonconéreusesdu fait du coût de stockagede l'énergie, souventsous forme de batteries, et sont parfoisutiliséesencomplément d'un autregénérateur d'énergie (diesel, essence, gaz, éolien) Les installations autonomes peuvent avoir des dimensions «familiales», ou alimenter les besoins d'une collectivité, d'un village [01].

I.12.2. Système autonome sans stockage électrochimique

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairement solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressent pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dansl'obscurité,etpourlesquelleslebesoinenénergiecoïncideavecla présence de l'éclairementsolaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairement le plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de système autonome [12].

I.12.3. Système autonome avec stockage électrochimique

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes. Elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [12].

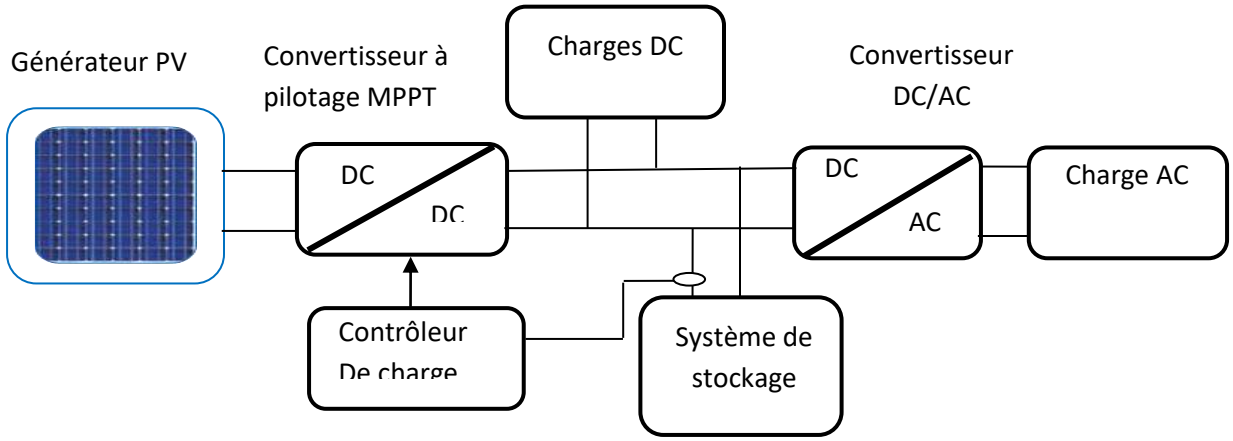


Figure (I: 24) : Installation photovoltaïque autonome.

I.12.4. Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau

Dans les années 80 est apparue la pratique d'échange d'énergie avec le réseau, de cette façon, les installations photovoltaïques peuvent se dispenser d'un système de stockage par batteries, le réseau se comportedonccommeun stockagevirtuel d'énergie. En plus de safonction traditionnelle de répartiteur del'énergie produite parles grosproducteurs, ledistributeur assure maintenant le rôlede compensateur entre les excédents et les insuffisances de la production d'électricité d'origine solaire.[10]

I.12.5. Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque

Les générateurs transforment directement l'énergie solaire en électricité (courant continu). La puissance est exprimée en Watt- crête (Wc), unité qui définit la puissance électrique disponible aux bornes du générateur dans les conditions d'ensoleillement optimales.

Un ou plusieurs onduleurs convertissent le courant continu produit en courant alternatif à50Hz et 220 V. Selon le choix retenu, toute ou une partie de la production est injectée sur leréseau public, et le reste est consommé par le producteur. Lorsque la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'électricité nécessaire[11].

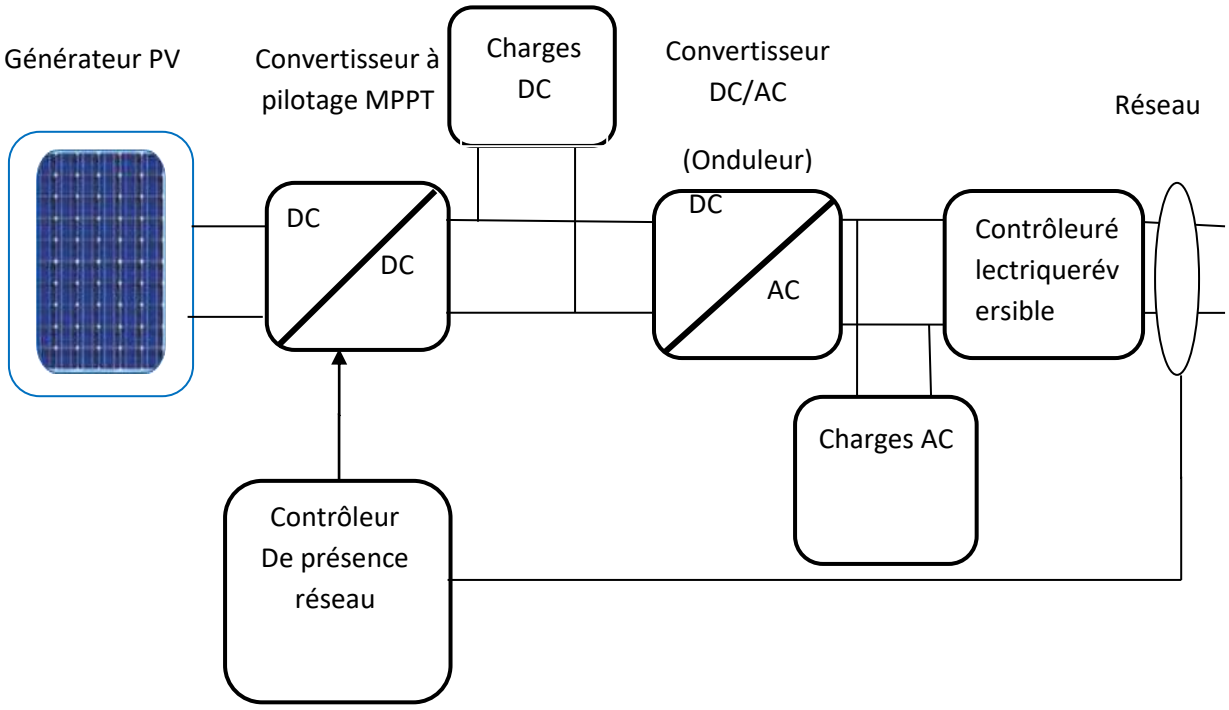


Figure (I: 25) : Installation photovoltaïque couplée au réseau.

I.12.6. Principe de la commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans des conditions météorologiques et de charge stables. Que ce soit une commande analogique ou digitale, le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV [11].

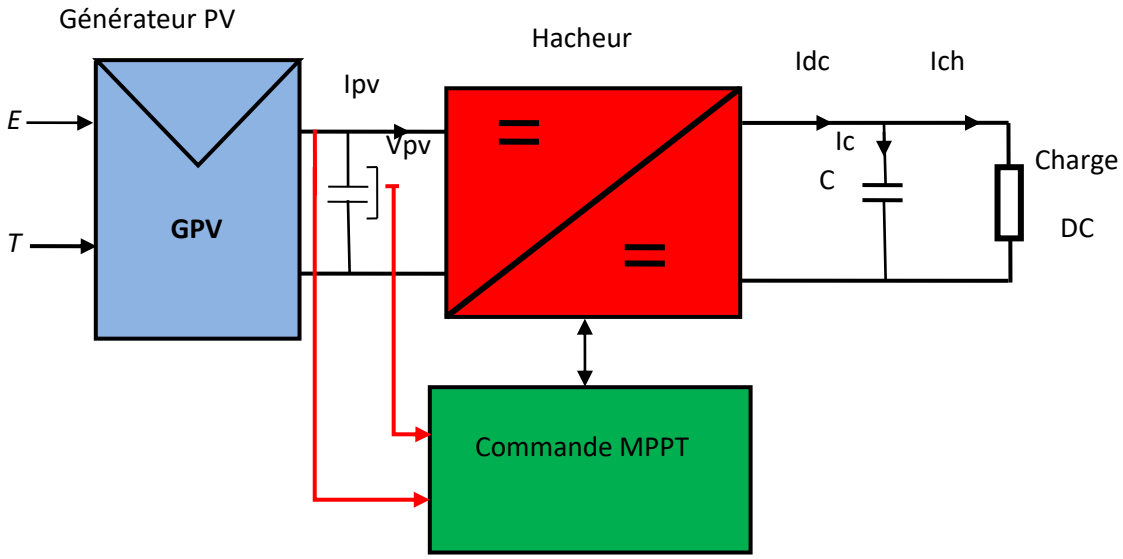


Figure (I: 26) : Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT.

I.12.7. Stockage photovoltaïque

I.12.7.1.Batteries

Une batterie est un dispositif électrochimique destiné à emmagasiner de l'électricité pour la restituer ensuite à la demande. Ce genre de batterie peut être chargé électriquement une fois déchargée par le passage d'un courant électrique à travers ces électrodes en sens inverse du courant de décharge. C'est ce qui lui donne son aspect de dispositif de stockage d'énergie électrique connue sous le nom 'Accumulateur'.

Les applications où les accumulateurs sont utilisés comme un moyen de stockage d'énergie, sont généralementconnectésà une source électrique pour être chargé (alternateur,réseau électrique,système GPV…etc.), et une charge qui consomme l'énergie délivrée par l'accumulateur en régime de décharge, exemple : voiture, installations électriques en avion, satellite …ect [09].

I.12.7.2.Principe électrochimique

Il est nécessaire de comprendre les phénomènes chimiques de base gouvernant le fonctionnement des batteries afin de pouvoir justifier les choix des méthodes , des modèles, et par la suite mieux interpréter les résultats de ces interactions. Le schéma de principe d'une cellule électrochimique est illustré par la Figure (I.30).

Lors d'une décharge de l'accumulateur, la réaction d'oxydation qui se produit à l'anode libère un ou desélectronsdanslecircuitextérieur.Cesélectronscirculentalors jusqu'àlacathodeoù ils participent à la réaction de réduction (gain d'un ou plusieurs électrons). Simultanément, les anions et les cations migrent dans la solution électrolytique entre les deux électrodes afin de préserver l'équilibre des charges. Lorsque l'anode est complètement oxydée (ou la cathode totalement réduite), ces réactions s'achèvent et la batterie est déchargée. Quant à la charge, elle est réalisée en appliquant un courant électrique aux électrodes afin d'engendrer les réactions inverses.

En décharge, l'anode est la borne négative de la batterie et la cathode est la borne positive. Par contre, en phase de charge l'électrode négative est la cathode et le positif est l'anode, les électrons circulant alors dans l'autre sens [01].

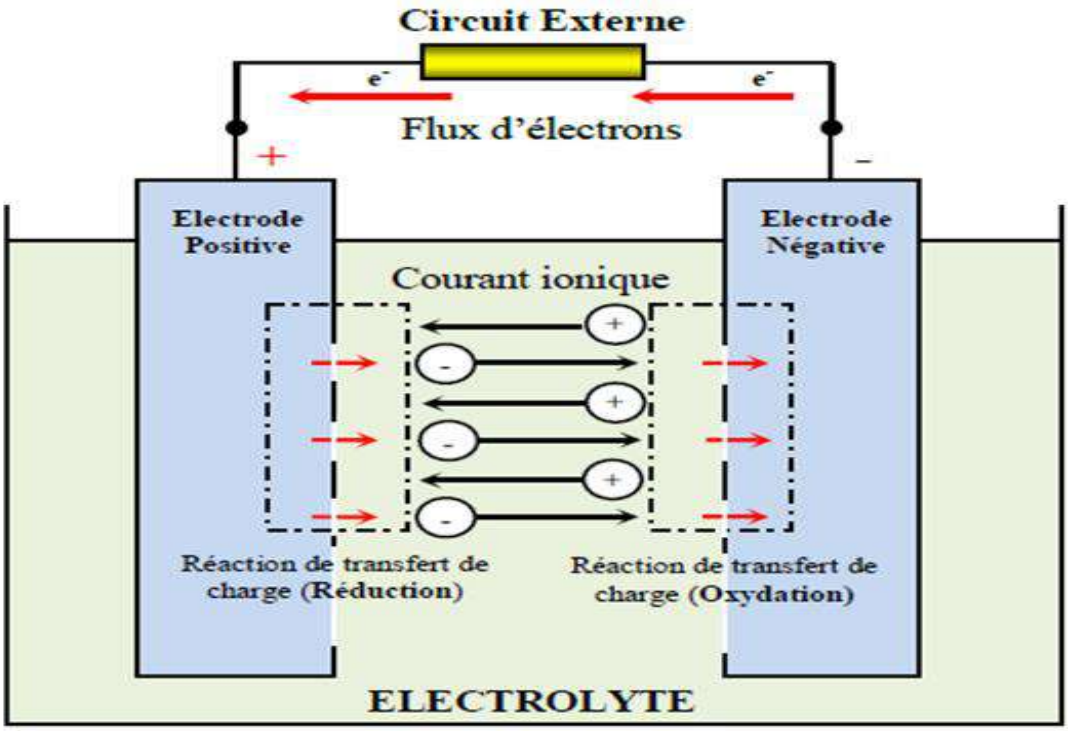


Figure (I: 27) : cellule électrochimique de base.

I.12.7.3.Caractéristiques d'une batterie

Chaque batterie électrochimique présente les caractéristiques suivantes [11] :

- Résistance interne de l'accumulateur : Elle peut être déterminée en fonction de ses composants à savoir : la résistance de l'électrolyte, la résistance de contact entre les électrodes et les cellules, et la résistance des matériaux propre à chacune des électrodes.

- Tension à vide : Lorsque la batterie est totalement chargée, la tension à vide équivaut environ à la tension idéale.

- Tension nominale : Elle indique la tension que la batterie doit recevoir pour qu'elle fonctionne correctement. Cette tension varie en fonction des différents types de batteries, puisqu'elle est déterminée par le potentiel de la réaction chimique de chaque élément du couple oxydant/réducteur utilisé. Cette tension peut avoir une valeur de 6V, 12V, 24V, 48V, etc.…

- Tension de fin de décharge : Cette tension détermine la tension une fois que la batterie est

- complètement déchargée. Elle représente la valeur minimale que la tension doit avoir pour ne pas endommager la batterie.

- **Capacité :** Elle représente l'énergie maximale que la batterie peut emmagasiner.

- Elle estproportionnelle à la dimension de la batterie, et est définie par :

$$C_{db} = \int_{t_0}^{t} I_b(t)dt \qquad \text{(I.13)}$$

Son unité de mesure est l'ampère-heure (Ah).

➢ **Taux de décharge et de recharge:**Le taux de décharge correspond au temps que la batterie met pour se décharger dans son intégralité. Par exemple, si on a un courant de décharge de 10A et une batterie de 50Ah, le taux de décharge sera égal à 5A/h. On le notera alors C/5.

➢ **Profondeur de décharge:**Elle est exprimée en pourcentage, elle définit l'énergie maximale qui peut être dérivé de la batterie sans pour autant endommager, ce qui permet de ralentir au maximum sa durée de vie.

➢ **Influence des paramètres extérieurs:**La température influe sur le rendement de la batterie. Afin d'avoir un rendement optimal, la température idéale est de 25°.

➢ **Durée de vie et nombre de jour d'autonomie:**Le nombre de jour d'autonomie se détermine en laissant la batterie alimenter le réseau jusqu'à sa décharge, sans la recharger. La durée de vie correspond au nombre de cycle charge/décharge de la batterie.

➢ **Énergie:**Elle s'exprime généralement en joule, mais peut aussi s'exprimer en Watt/heure. Elle est définie par la relation suivante :

$$E = \int_{t_0}^{t} v_1(t) i_b(t) dt \qquad \text{(I.14)}$$

➢ **État de charge de l'accumulateur:**L'état de charge de la batterie est généralement simplifié par l'acronyme SOC (state-of-charge), est une caractéristique très importante puisqu'elle nous donne le niveau de charge de la batterie en pourcentage. L'état de charge peut être déterminé par la capacité disponible et est exprimée en fonction de la capacité nominale comme suit :

$$SOC = \frac{Capacitédisponible\ (Ah)}{capaciténominale\ (Ah)} \times 100 \qquad \text{(I.15)}$$

I.12.8. Régulateur de charge :

Le régulateur est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome: il contrôle les flux d'énergie, il doit protéger la batterie contre les surcharges (solaire) et décharges profondes (utilisateur), il doit également assurer la surveillance et la sécurité de l'installation (surcharge, alarmes, fusibles, inversion de polarité). Dans les systèmes les plus élaborés, il peut aussi commander la recharge par d'autres sources d'énergie (génératrice d'appoint, éolienne, hydraulique). Dans certains cas, il peut aussi réaliser une transformation de puissance (recherche du point de puissance maximum, Max Power Tracker, MPPT).

Accessoirement, il affichera des indications concernant l'état de charge des batteries et les paramètres de fonctionnement du système [10].

I.12.8.1.Principe de fonctionnement d'un régulateur

L'indicateur utilisé dans la régulation électronique des systèmes photovoltaïques est la tension aux bornes de la batterie, en effet cette grandeur est facile à mesurer et capable de donner une estimation de l'état de charge

Le régulateur doit maintenir l'état de charge des batteries entre deux seuils, un seuil haut et un seuil bas à ne pas dépasser, donc la régulation est obtenue par limitation en tension de la batterie afin d'éviter :

- ✓ Une surcharge entraînant une perte en eau ;
- ✓ Un vieillissement prématuré des accumulateurs.

La protection contre la décharge profonde est réalisée par un disjoncteur automatique dont le but est d'éviter la sulfatation des plaques [11].

I.13. Avantages et inconvénients d'une installation PV

I.13.1. Avantage

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

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

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

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions[12].

I.13.2. Inconvénients

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

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Tributaire des conditions météorologiques.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

Lestockage del'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur[10].

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre, On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, Nous avons présenté le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales.

Ensuite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances**,** avec une notion sur les avantages et les inconvénients de l'installation photovoltaïque.

Les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module. Nous avons opté pour le modèle à une diode pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque pour différentes conditions d'irradiation et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur.

.

CHAPITRE II:
Les réseaux de neurones artificiels

II.1 Introduction

Les réseaux de neuronesartificiels RNA,présentent de nombreuses caractéristiques intéressantes qui sont à la base de l'essor considérable qu'ils ont connu ces dernières années et ce, dans différents domaines d'application. Dans ce chapitre, nous tentons, de rappeler quelques généralités comme leur principe, leurs caractéristiques et les équations régissant leur fonctionnement ainsi que leurs domaines d'application.

II.2 Le neurone biologique

Les débuts de l'approche connexionniste datent de 1943 [9,10] et sont l'œuvre de Mac Culloch (psychiatre et neuroanatomiste) et Pitts (mathématicien) qui présentèrent un modèle mathématique très simple dérivé d'une analyse de réalité biologique. De ce fait, nous avons jugé primordial de présenter le neurone biologique pour mieux comprendre sa modélisation mathématique.

Le cerveau humain, le plus étonnant des systèmes de traitement de l'information, est constitué d'environ 10 milliards d'unités appelées neurones. Les neurones sont des cellules du système nerveux spécialisées dans la transmission de l'information. Cette information est contenue dans la fréquence et la phase d'émission de signaux électriques sous forme de pulses. Les neurones ont trois fonctions :

❖ Collecter et transmettre les informations provenant des cellules réceptrices, telles que les cellules sensorielles ;

❖ Traiter toutes les informations collectées, et fournir une mémoire et une capacité cognitive qui nous permettent de prendre des réactions volontaires aux informations collectées ;

❖ Envoyer des signaux appropriés aux cellules effectrices: les muscles et les glandes.

❖ Fonctionnellement, le neurone est constitué de trois parties comme le montre la figure 2.1 et la figure 2.2 :

❖ Lesdendrites:ce sont les prolongements qui permettent au neuronede collecterles informations en provenance d'autres neurones ou du monde extérieur.

❖ Le corps cellulaire: cette partie est chargée du traitement des informations collectées

❖ L'axone **:** c'est le plus long des prolongements, il assure la transmission des signaux du neurone vers les autres cellules (neurones, cellules effectrices). L'axone se termine par des branches qui transmettent le même signal.

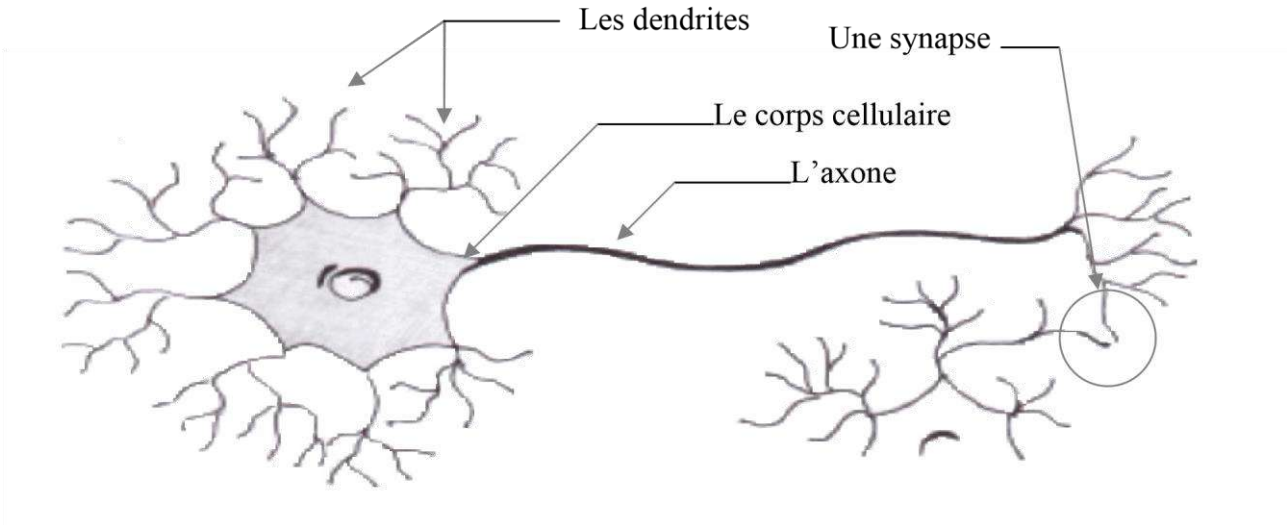


Figure. II.1 : Le neurone biologique [06].

Dans le cerveau, le neurone émet un signal en fonction des signaux collectés en provenance d'autres neurones après leur traitement. Le traitement neuronal est une opération assez complexe, il s'agit en effet, d'une intégration spatio-temporelle des signaux collectés, c'est à dire une sorte de sommation. Quand la somme dépasse un certain seuil, le neurone émet à son tour un signal à travers son axone auquel sont reliés d'autres neurones. La zone de contact entre l'axone et la dendrite est appelée synapse. C'est au niveau de cette synapse que s'effectue la transmission de l'information d'une cellule à une autre.

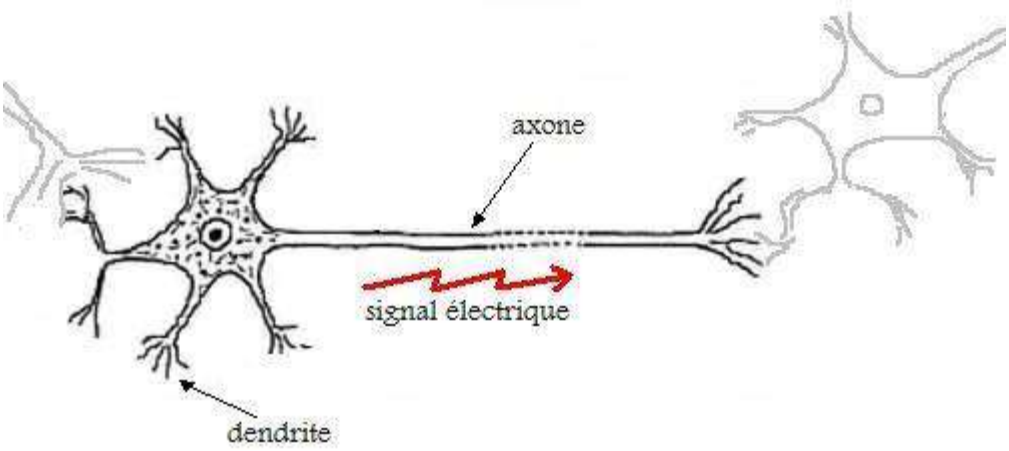


Figure. II.2 : Communication neuronale.

II.3 Neurone Artificiel

Le neurone artificiel (ou cellule) est un processeur élémentaire.Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont (on parlera de neurones "amonts"). A chacune des entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval (on parlera de neurones "avals"). A chaqueconnexionest associéun poids.Une analogie entre le neurone biologique et le neurone artificiel est mise en évidence sur la figure (2.3).

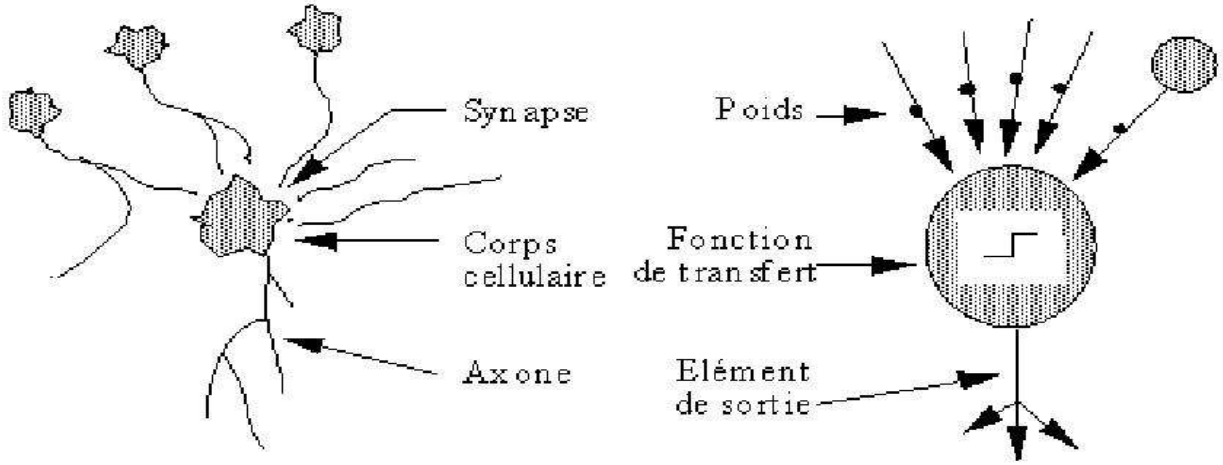


Figure. II.3: Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel

En effet, d'après l'étude biologique, le modèle du neurone peut être considéré comme étant un système élémentaire qui possède plusieurs entrées et une seule sortie comme le montre la figure suivante :

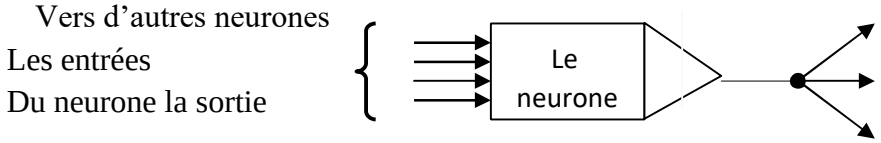


Figure. II.4 Le modèle du neurone

Ce modèle possède les caractéristiques suivantes :

- Il effectue une somme pondérée de ses entrées (cette somme remplace l'intégration spatio-temporelle du neurone biologique, qui est difficile à intégrer dans un modèle simplifié). Le résultatobtenu représentel'activité du neuronenotée.
- Ilappliqueune fonctiondiscriminanteappelée aussi fonction d'activationpour limiterl'amplitude de la sortie du neurone. L'amplitude normaliséeprendra sesvaleursdansl'intervalle [-1,+1].
- le résultat obtenu est la sortie du neurone.

Le modèle du neurone représenté par la figure (**II**.5) [12] inclut une notion de seuil dont l'effet est de minimiser la sortie du neurone. Il est à noter qu'on peut avoir le même résultat en utilisant le biais; le biais est l'inverse du seuil.

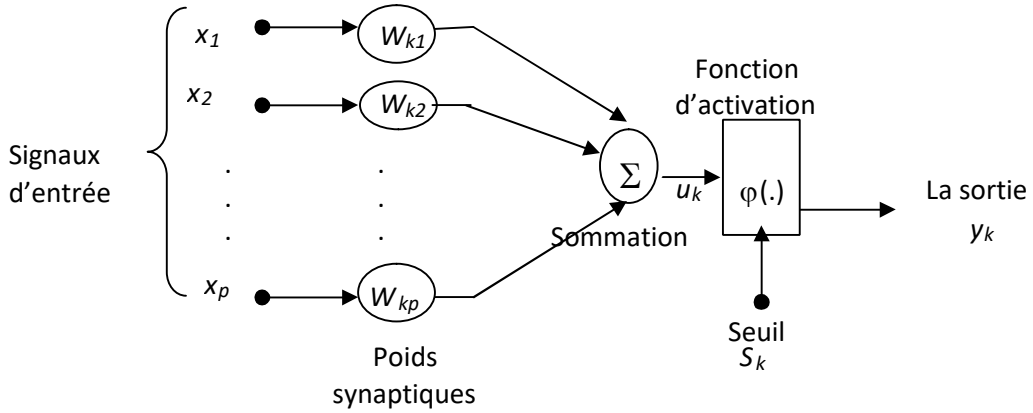


Figure. II.5 : Le neurone artificiel [12].

Mathématiquement, ce modèle peut être décrit par les équations suivantes :

$$\text{Et} u_k = \sum_{j=1}^{p} w_{kj} x_j \qquad \text{(II.1)}$$

$$\text{Avec} \quad y_{k=\emptyset}(u_k - s_k) \qquad \text{(II.2)}$$

$x_1, x_2, \ldots, x_p$: les signaux d'entrée ; $w_{k1}, w_{k2}, \ldots, w_{kp}$ sont les poids synaptiques du $k^{ième}$ neurone ;

u_k l'activité du neurone ;

S_k est le seuil ;

$\varphi(.)$: la fonction d'activation ;

r_e présente l'assortie du neurone.

$$v_k = u_k - s_k \qquad \text{(II.3)}$$

Le seuil effectue une transformation linéaire dans le modèle de la figure (II.5), comme le montre l'équation suivante :

$$u_k = \sum_{j=0}^{p} w_{kj} x_j \qquad \text{(II.4)}$$

Cette transformation se traduit par l'ajout d'une synapse, dont l'entrée est :

$$x_0 = -1 \qquad \text{(II.5)}$$

Et dont le poids est :

$$w_{k0} = s_k \qquad \text{(II.6)}$$

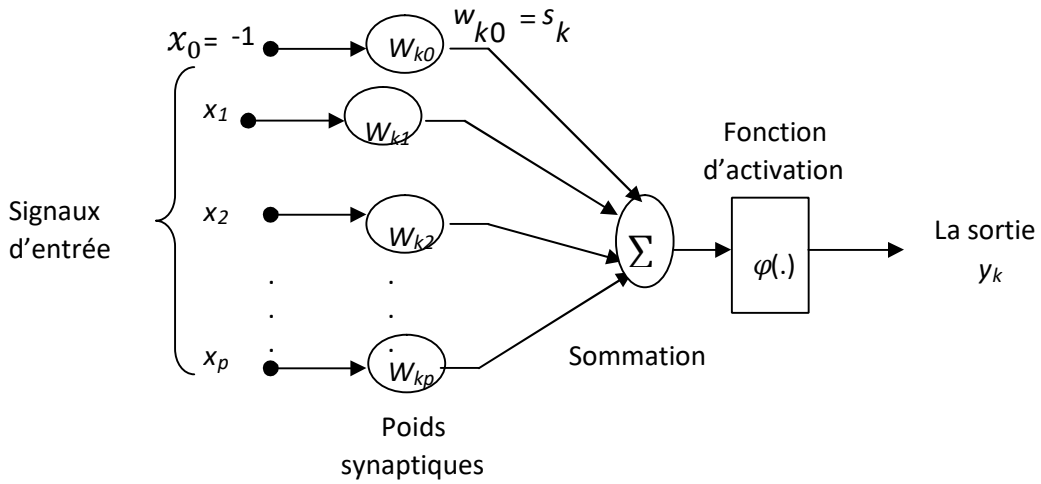
$$x_0 = +1 \qquad \text{(II.7)}$$

$$w_{k0} = -x_k = b_k \qquad \text{(II.8)}$$

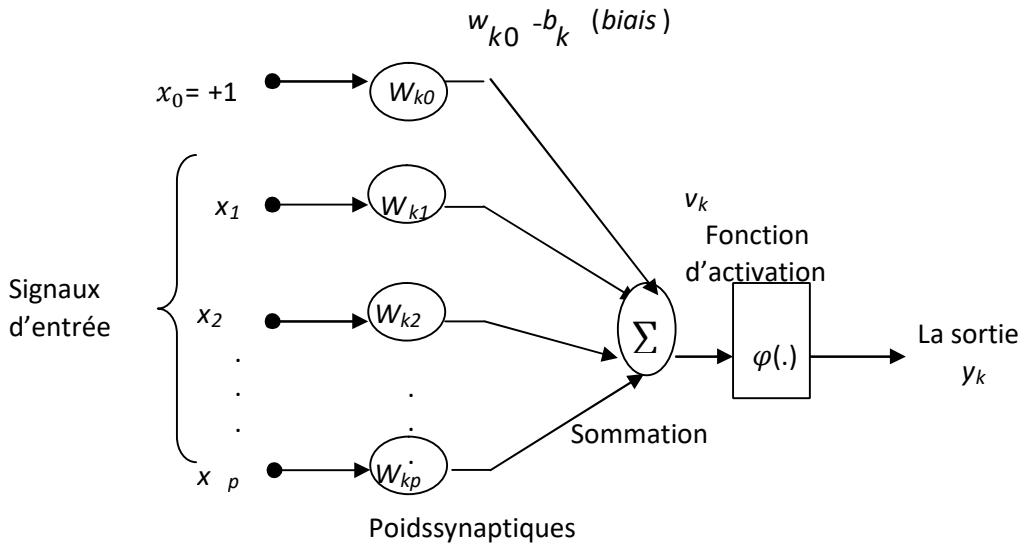
Ce modèle mathématique est représenté par la figure 2.6 (a). Le choix des paramètres de la nouvelle synapse peut se faire de la manière suivante :

Avec $b_k$le biais du k^{ième}neurone comme le montre la figure (2.6.b).

Notons que les modèles de la figure (II.5) et la figure (II.6) sont différents en apparence mais mathématiquement équivalents.



(a)



(b)

Figure. II.6 : Deux autres modèles du neurone artificiel.

II.4 Caractéristiques des réseaux de neurones artificiels

Lesréseauxdeneuronesartificielspossèdentplusieurs caractéristiques,dontles plus importantessont:

• la capacité d'apprentissage: un réseau de neurones peut modéliser le relation liant les deux espacesd'entrée et de sortie etce en ajustant les poids deses connexion durantunephase dited'apprentissage à la lumière d'un ensemble d'échantillons décrivant un système ou une fonction donnée.

• la capacité de généralisation: cette caractéristique est d'une très grande importance. Elle est dite aussi de recouvrement. Après une phase d'apprentissage, le réseau de neurones est capable de trouver la sortie correspondante aux entrées non traitées pendant la phase d'apprentissage.

• la robustesse: de par sa structure en réseau, la défaillance d'une ou de certaines connexions peut être surmontée par le réseau en entier.

II.5 Classification des réseaux de neurones

Unréseau de neurones formels estconstitué d'un grand nombre decellules debase interconnectées. De nombreuses variantes sont définies selon le choix de la cellule élémentaire, de l'architecture du réseau et de la dynamique du réseau.

Une cellule élémentaire peut manipuler des valeurs binaires ou réelles. Les valeurs binaires sont représentées par 0 et 1 ou -1 et 1. Différentes fonctions peuvent être utilisées pour le calcul de la sortie. Le calcul de la sortie peut être déterministe ou probabiliste.

L'architecture du réseau peut être sans rétroaction, c'est à dire que la sortie d'une cellule ne peut pas influencer son entrée. Elle peut être avec rétroaction totale ou partielle. La dynamique du réseau peut être synchrone : toutes les cellules calculent leurs sorties respectives simultanément.

Ladynamique peut êtreasynchrone. Dans ce dernier cas,on peut avoir unedynamiqueasynchrone séquentielle : les cellules calculent leurs sorties chacune à son tour en séquence ou peuvent avoir une dynamique asynchrone aléatoire. Par exemple, si on considère des neurones à sortie stochastique -1 ou 1 calculée par une fonction à seuil basée sur la fonction sigmoïde, une interconnexion complète et une dynamique synchrone, on obtient le modèle de Hop Field et la notion de mémoire associative. Si on considère des neurones déterministes à sortie réelle calculée à l'aide de la fonction sigmoïde, une architecture sans rétroaction en couches successives avec une couche d'entrées et une couche de sortie, une dynamique asynchrone séquentielle, on obtient le modèle du Perceptron multicouches (PMC) qui sera étudié dans les paragraphes suivants.

II. 5.1 Le Perceptron

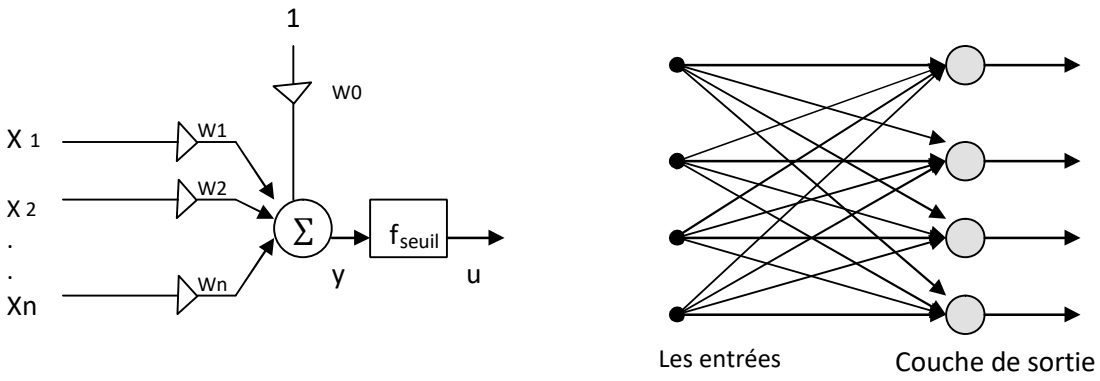
Le perceptron (Figure II.7.a) est l'un des premiers réseaux de neurones, conçu en 1958 par Rosenblatt [13,14]. Il est linéaire et monocouche (figure II.7.b). Il est inspiré du système visuel. La première couche (d'entrée) représente la rétine. Les neurones de la couche suivante sont les cellules d'association et la couche finale représente les cellules de décision. Les sorties des neurones ne peuvent prendre que deux états (-1 et 1 ou 0 et 1). Seuls les poids des liaisons entre la couche d'association et la couchefinalepeuvent être modifiés.La règle de modification des poids utilisée est la règlede Widrow-Hoff : si la sortie (celle d'une cellule de décision) est égale à la sortie désirée, le poids de la connexion entre ce neurone et le neurone d'association qui lui est connecté n'est pas modifié. Dans le cas contraire le poids est modifié en fonction de l'entrée :

$$\mathbf{w\ i <= w\ i + k\ (d - s)} \qquad \text{(II.9)}$$

***avec k** : constant positive*

***s**: sortie et d: sortie désirée*

En 1969, Papet et Minsk (un des pères des systèmes experts) démontrèrent les limites du perceptron classique, incapable, par exemple de simuler la fonction ‘‘ou’’ exclusif (xor).

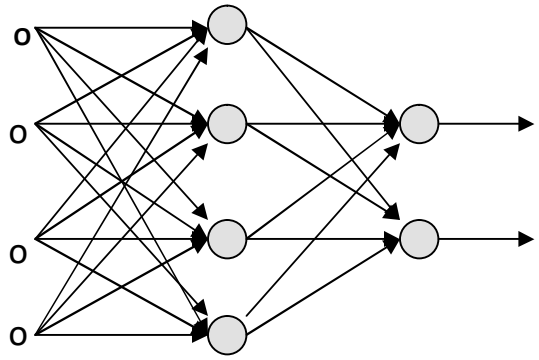


(a) (b)

Figure. II.7 : (a) : le perceptron (b) : Le réseau monocouche.

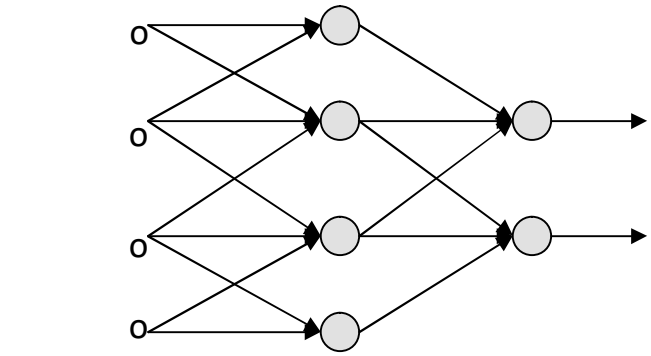
II.5.2 Les perceptrons multicouches (PMC)

Les PMC sont une amélioration du perceptron comprenant une ou plusieurs couches intermédiaires dites couches cachées. Ils utilisent, pour modifier leurs poids, un algorithme de rétro propagation du gradient, qui est une généralisation de la règle de Widrow-Hoff. Il s'agit toujours de minimiser l'erreur quadratique,cequi estassez simple quandon utilise une fonctionf dérivable(lasigmoïde par exemple). On propage la modification des poids de la couche de sortie jusqu'à la couche d'entrée. Les PMC agissent comme un séparateur non linéaire et peuvent être utilisés pour la classification, le traitement de l'imageou l'aideà ladécision.On peut donc dire que les PMC représentent le résultatd’une tentative d’amélioration du perceptron monocouche dont les limitations ont été démontrées. Cette architecture est caractérisée par la présence d’une ou plusieurs couches, dites cachées, intercalées entre la couche d’entrée et la couche de sortie. Dans un tel réseau, les sorties d’une couche sont les entrées de la couche qui se situe en aval. La connexion peut être totale ou partielle, comme le monte la figure (II.8).



Couche d’entrée Couche cachée Couche de sortie

***(a)**Connexion totale*



(b) *Connexion partielle*

Figure. II.8 : Leréseau multicouches [13].

II.5.3 Les réseauxrécurrents

La différence entre cette structure de réseaux et les structures précédentes réside dans le fait que, cette structure comporte au moins une boucle de retour de la sortie, ceci permet au réseau de tenir compte de la valeur précédente de la sortie pour le calcul de la nouvelle sortie. La sortie peut-être :

 La sortie d'un neurone de la couche cachée qui sera injectée à l'entrée du même neurone, c'est le cas des réseaux dits « *with self-feedback* » (figure II.9) ;

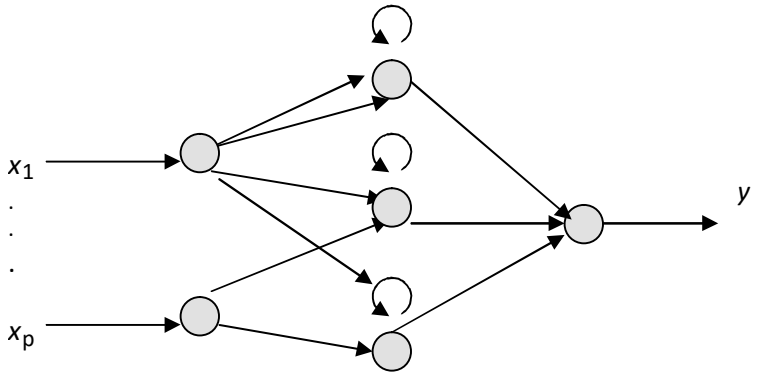


Figure. II.9: Réseaurécurrent «with self-feed-back».

 Lasortie d'un neurone de la couche cachée quisera, dans ce cas, injectée à tous les autres neurones de cette couche. C'est le cas des réseaux dits « réseaux récurrents totalement connectés » (figure **II**.10).

.

Figure. II.10 : Réseau récurrent « fullyconnected ».

 La sortie du réseau qui sera injectée au niveau de son entrée, comme le montre la figure (2.11), ou au niveau des autres couches.

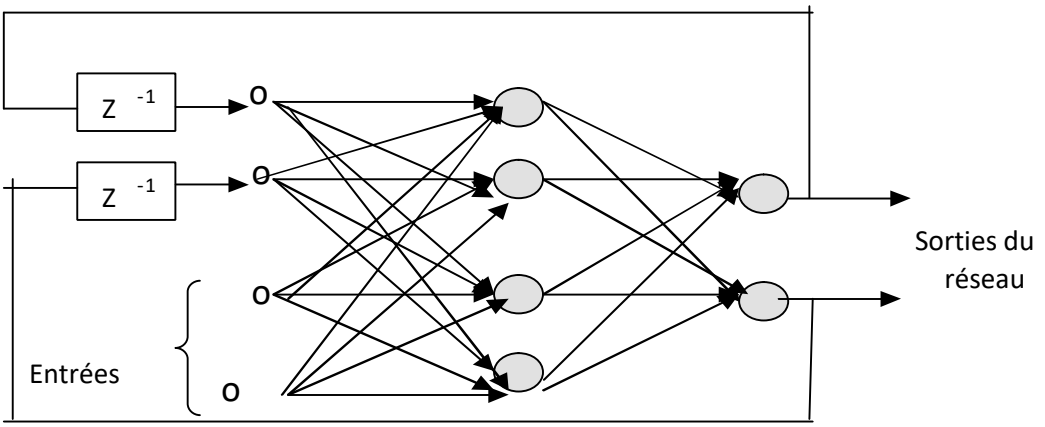


Figure. II.11: Un réseau de neurones récurrent.

II.6 Construction d'un réseau de neurones

Construire un réseau consiste à choisir sa structure et la valeur de ses poids. Choisir une structure consiste à fixer le nombre de couches et leurs tailles. Les tailles des couches d'entrée et de sortie sont généralement imposées par le nombre de paramètres du problème.

Le choix se limite donc à la taille et au nombre de couches cachées. Il fautnoterque :

- L'expérience montre qu'un réseau à plusieurs couches cachées peut se ramener à un réseau équivalent de deux couches cachées de plus grande taille.
- Dans la pratique on constate souvent qu'au-delà de deux couches cachées,

l'apprentissage et l'utilisation du réseau deviennent difficiles.

- La pratique montre que pour un problème donné, il existe un nombre de réseaux optimaux pour le résoudre.

Une fois la structure du réseau choisi, il reste à fixer les valeurs initiales des poids et des biais. Ces valeurs peuvent être aléatoirement choisies par l'utilisateur. L'expérience montre que la valeur initiale des poids et des biais influence considérablement la qualité de l'apprentissage et qu'en général un choix aléatoire donne de moins bons résultats qu'un choix à priori. Toutefois, dans le cadre de la commande,il est difficile de faire cechoix àprioripuisqu'on ignore lafaçon dont le réseau peut utiliser l'état de son entrée pour calculer la sortie. Il convient donc de calculer par apprentissage la valeur optimale des poids et des biais.

II.7 Calcul de la sortie d'un réseau de neurones

C'est la partie dite de programmation. Elle consiste à calculer l'activité de tous les neurones du réseau à partir du vecteur d'entrée qui est ainsi propagé vers la sortie. Il s'avère évident, que le degré de complexité de cette opération est en relation directe avec la structure du réseau.

II.8 L'apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage des réseaux de neurones est la phase de calcul de l'ensemble de ses poids par des algorithmes d'ajustement pour lui permettre une application entre l'espace d'entrée qu'on lui présente et l'espace de sortie. Ceprocessuspeut se résumer en trois étapes:

❖ Le réseau de neurones est stimulé par l'environnement.

❖ Le réseau de neurones subit des changements comme résultat à cette stimulation;

❖ Le réseau de neurone répond d'une manière différente à son environnement à cause des changements produits au niveau de sa structure interne.

Trois classes d'apprentissage sont à distinguer.

II.8.1 Apprentissage supervisé

Le principe de base de ce type d'apprentissage, représenté par la figure II.12 consiste à présenter au réseau de neurones, ignorant initialement l'état de son environnement (de la tâche), un ensemble de couples (entrée, sortiedésirée);l'entrée est utiliséepour stimulerle réseau.La réponse du réseau à cette entrée (la sortie) est calculée et comparée avec la sortie désirée. L'écart entre les deux grandeurs sera utilisé pour l'ajustement des paramètres du réseau.

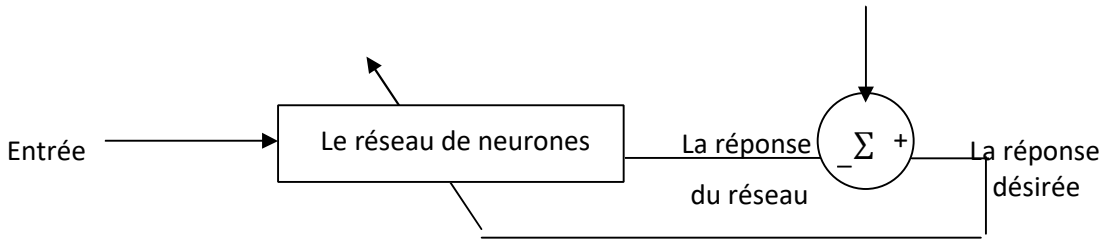


Figure. II.12 : Principe de l'apprentissage supervisé [11].

II.8.2 Apprentissage par renforcement

Appelé aussi semi-supervisé, il ressemble au précédent par la présence d'un critère de jugement sur l'échec ou le succès de la réponse, mais sans connaître exactement la sortie. Cet apprentissage nécessite seulement une évaluation qualitative de la performance désirée, qui est généralement spécifiée sous forme d'une fonction de coût à minimiser [10].

II.8.3 Apprentissage non supervisé

Ce type d'apprentissage consiste à fournir à un réseau autonome une quantité suffisante d'exemples pour que celui-ci en dégage les irrégularités spontanément. Ce type de réseau est appelé aussi auto-organisateur. Cet apprentissage entre dans le cadre des méthodes d'apprentissage automatiques.

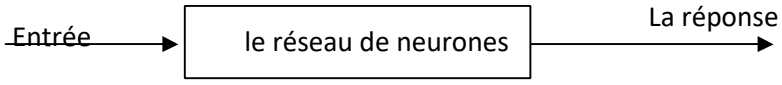


Figure. II.13 : Principe de l'apprentissage non supervisé du réseau

II.9 Techniques d'apprentissage des réseaux de neurones artificiels

La large majorité des réseaux de neuronespossède un algorithme «D'entraînement» qui consiste à modifier les poids synaptiques en fonction d'un jeu de données présentées en entrée du réseau. Le but de cet entraînement est de permettre au réseau de neurones «d'apprendre» à partir des exemples. Si l'entraînement est correctement réalisé, le réseau est capable de fournir des réponses en sortie très proches des valeurs d'origine du jeu de données d'entraînement.

Plusieurs algorithmes sont utilisés pour l'apprentissage des réseaux de neurones artificiels, parmi lesquels nous citons l'algorithme de rétro propagation du gradient, qui demeure l'algorithme le plus utilisé pour l'entraînement des perceptrons multicouches.

II.9.1 L'algorithme de rétro propagation du gradient

L'algorithme de rétro propagation du gradient (back propagation) est une méthode de calcul des poids pour un réseau à apprentissage supervisé qui consiste à minimiser l'erreur quadratique de sortie (somme des carrés de l'erreur de chaque composante entre la sortie réelle et la sortie désirée).

$$\boldsymbol{J = \frac{1}{2} e^2 = \frac{1}{2} + (y - y_d)^2} \qquad \text{(II.10)}$$

Avec

e : l'écart entre la sortie réelle et la sortie désirée.

Le processus de la rétro propagation est constitué de deux phases :

❖ Une propagation des signaux de la couche d'entrée, couche par couche, jusqu'à atteindre la couche de sortie qui délivre les signaux de sortie du réseau.

❖ Une rétro propagation del'erreur, c'est à direl'écart entre la sortie du réseauet lasortie désirée, qui se propage dans le sens inverse, de la couche de sortie vers la couche d'entée et qui sera utilisée pour l'ajustement des paramètres du réseau (figure II.14).

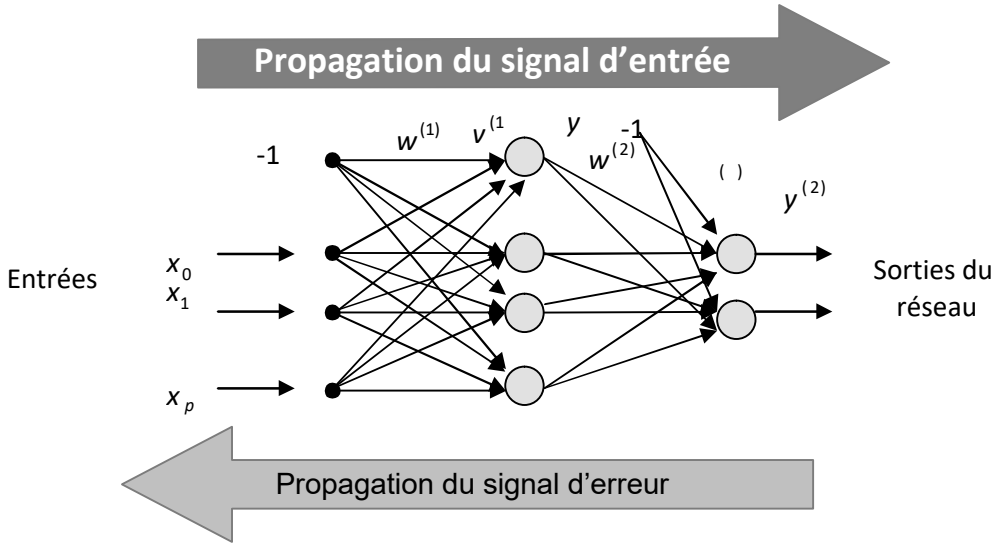


Figure. II.14 : Flux des signaux de la rétro propagation de l'erreur [05].

Principe ***:***

Pour expliquer le principe de la rétro propagation, prenons le réseau multicouche de la figure précédente (figure 2.14).

Soient :

$w^{(L)}$: le vecteur des poids synaptiques d'un neurone appartenant à la couche L ;

$_v(L)$: les vectrices activités des neurones de la couche L ; y

$y^{(L)}$:le vecteur des sorties de la couche L .

φ (.) : la fonction d'activations d'un neurone (qui doit être une fonction dérivable

comme la fonction sigmoïde).

n: le pas d'apprentissage (ou pas d'adaptation).

Le processus d'entraînement du réseau par l'algorithme de back propagation pour qu'il puisse approximer une certaine fonction y = f(x) sur tout ensemble d'apprentissage, va se dérouler en plusieurs étapes :

1. Initialisation : cette étape consiste à attribuer des valeurs aléatoires aux poids du réseau ;

2. Présentation des exemples : présenter les exemples d'entraînement veut dire l'application du vecteur d'entrée x à l'entrée du réseau ;

3. Le calcul direct : calculer les sorties de toutes les cellules dans le sens de propagation direct des variables d'entrée. Sachant que l'activité du neurone j de la couche L pendant l'itération n est :

$$v_j^{(L)} = \sum_{i=0}^{p} w_{ji}^{(L)}(n)_{yi}^{(L-1)}(n) \qquad \text{(II.11)}$$

la sortie du même neurone, en supposant l'utilisationde la fonction sigmoïde, sera :

$$v_j^{(L)} = \varphi\left(v_j^{(L)}\right) = \frac{1}{1+\exp(-v_j^{(L)}(n))} \qquad \text{(II.12)}$$

les sorties du réseau seront notées: en suite on calcule l'erreur :

$$v_j^{(L)} = o_j(n) \qquad \text{(II.13)}$$

$$e_j(n) = d_j(n) - o_j(n) \quad (2.14)$$

avec d ,(n) le j_j ^{ième}élément du vecteur $d(n)$ représentant les sorties désirées.

4. Le calcul rétrograde : qui consiste à calculer les gradients locaux du réseau en rétrogradant couche par couche, sachant que :

- pour un neurone de la couche de sortie :

$$s_j(n) = e_j(n).\varphi'(v_j(n)) \qquad \text{(II.15)}$$

- pour un neurone caché :

$$s_j(n) = \varphi'\left(v_j(n)\right)\sum_k s_k(n).w_{kj}.(n) \qquad \text{(II.16)}$$

La fonction sigmoïde est fréquemment utilisée avec l'algorithme de la rétro propagation, non seulement à cause de sa différentiable, mais également parce que sa dérivée est facile à calculer. En effet la drivée de la fonction d'activation donne :

$$\varphi'\left(v_j(n)\right) = \varphi\left(v_j(n)\right)\left[1-\varphi\left(v_j(n)\right)\right] \quad \text{(II.17)}$$

$$= y_j(n)\left[1-y_j(n)\right] \quad \text{(II.18)}$$

En remplaçant dans les équations (3.15) et (3.16) on aura :

❖ pour un neurone de la couche de sortie :

$$s_j(n) = [d_j(n) - o_j(n)].o_j(n).[1-o_j(n)] \quad \text{(II.19)}$$

❖ pour un neurone caché :

$$s_j(n) = y_j(n) \sum_k s_k(n).w_{kj}.(n) \quad \text{(II.20)}$$

Ajuster les poids synaptiques de la couche L du réseau en employant la loi généralisée suivante (petit):

$$\begin{pmatrix} La\ correction \\ du\ poids \\ \Delta w\ ji\ (n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{le pas} \\ \text{d'apprentissage} \\ n \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} \text{le gradient} \\ \text{local} \\ s_j\ (n) \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} \text{le gradient} \\ \text{du neurone j} \\ y_i\ (n) \end{pmatrix} \quad \text{(II.21)}$$

Qui se traduit par l'équation :

$$w_{ji}^{(L)}(n+1) = w_{ji}^{(L)}(n) + ns_j^{(L)}(n).y_i^{(L-1)}(n) \quad \text{(II.22)}$$

Notons enfin, que l'algorithme de la rétro propagation du gradient n'est pas un algorithme sans problèmes, il présente quelques inconvénients qui rendent l'étape d'apprentissage très lente. Parmi ces problèmes on peut citer à titre indicatif : les minimas locaux, les ravins, les plateaux.

II. 10 Application des réseaux de neurones artificiels

Lesdomainesd'applicationdesréseauxdeneurones sont de plusenplusnombreux.Cecis'explique, probablement, par le fait qu'ils acceptent des données incomplètes, incertaines ou bruitées et par l'absence apparente de la rigueur mathématique pour l'utilisation de leurs algorithmes d'apprentissage.

Le premier domaine d'application des réseaux de neurones est évidemment la classification. La reconnaissance des formes, en particulier la reconnaissance des caractères qui est un exemple typique de ce domaine.

Le traitement des images aussi, depuis la compression d'images, jusqu'à son interprétation en passant par la détection des contours. Cette application s'est généralisée en suite sur le domaine de la télécommunication : analyse du signal, élimination du bruit et la compression des données.

Comme d'autres applications on peut citer :

- La modélisation, l'identification et le contrôle des processus.
- Environnement:évaluation desrisques,analyseetprédictionsdesséries temporelles (modélisation météorologique).
- Finance: prévision et modélisation du marché (cours de monnaie), sélection d'investissement… etc.

II.11 Conclusion

Ce chapitre a rappelé certaines définitions générales concernant les réseaux de neurones: origines, principesdebaseetla méthoded'adaptation de leursparamètresquiconstituel'étape dited'apprentissage. Nous avons présenté l'algorithme de la rétro propagation du gradient et nous avons évoqué brièvement ses problèmes. Nous avons rappelé également les grands domaines d'application des réseaux de neurones. Dans ce qui suit, nous exposerons nos travaux de recherche en ce qui concerne l'exploitation des réseaux de neurones artificiels pour la poursuite du point de puissance maximale.

Chapitre III: convertisseur statique et commande MPPT

III.1Introduction:

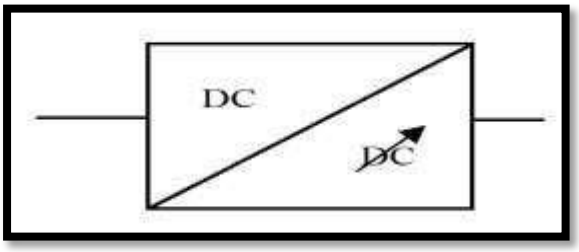
Une étude montre qu'un système PV directement couplé à une charge utilise seulement 31% de sa capacité, cette male adaptation entre le module PV et la charge exige des modules supplémentaires.

Les générateurs PV étant une source continue, l'utilisation des convertisseurs à courant continu (DC_DC) est nécessaire pour maintenir le pointopérationnel du module PVau MPP,l'MPPTpeut extraireplus de 97% dela puissance PV.L'adaptation entre les deux est comme un moyen du MPPT.[2]

III.2 Les types des convertisseurs statiques (DC-DC) :

III.2.1 définition :

Dans la conversion de puissance, il faut assurer un rendement élevé pour éviter la dissipation de la puissanceetleséchauffementsexcessifs dansles composants électroniques,c'est pourcelala conversion de puissance doit être réalisé autour des composant de stockage d'énergie (inductance et condensateur) et les commutateurs.



Les commutateurs de puissance utilisée dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander.

Les MOSFET (transistor à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques KW), et les **IGBT** (transistor bipolaire a gâchette isolée) à des puissances plus élevées, les thyristors ont été généralement utilisés dans les hauts niveaux de puissance.

Il existe deux topologies principales des circuits de convertisseurs (DC/DC) sont :

III.2.2 Hacheur dévolteur (Buck) :

Ce non est lié au fait que la tension moyenne de la sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage commandé, en série avec la source, et une diode de roue libre, le cycle de fonctionnement, de période de hachage (T), comporte deux états :

- Dans l'état passant, l'interrupteur est fermé, le courant traversant l'inductance augmente linéairement, la tension au borne de la diode étant négative, aucun courant la traverse, cette phase dure de (0) à (T).

- Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert, la diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance, le courant traversant l'inductance décroit cette phase dure de (DT) à (T).

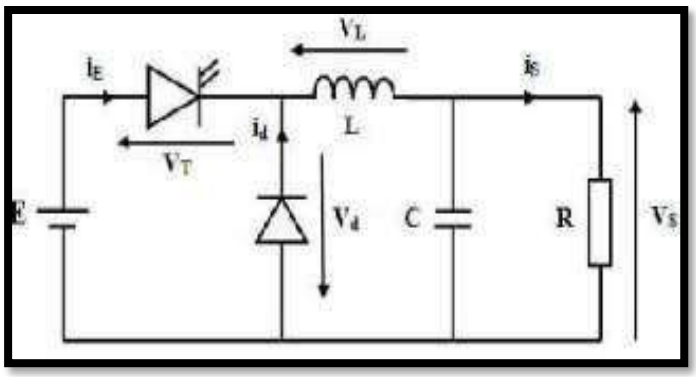


Figure (III.1) : schéma d'un hacheur back (série).

On déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes :

$$Vch = D.E \quad \text{eq09}$$

$$D = \frac{tf}{T} \qquad 0< t <tf \quad \text{eq 10}$$

$$Ich = (1 - D).I \quad \text{eq 11}$$

D : le rapport cyclique, compris entre (0 à 1).

E : la tension d'entrée.

III.2.3 Hacheur survolteur (Boost) :

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la sortie, le cycle de fonctionnement de période d'hachage (T) comporte deux états :

- L'état d'accumulation de l'énergie : lorsque l'interrupteur est fermé (état passant), cela entraine l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique, la diode est alors est bloquée la charge est alors déconnectée de l'alimentation, cette phase dure de (0) à (DT).

- Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa F.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur), le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie, accumulée dans l'inductance vers la capacité, cette phase dure de (DT) à (T).

Les équations de la tension et l'intensité dans la charge sont :

$$Vch = \left(\frac{1}{(1-D)}\right) \quad \text{eq 12}$$

$$Ich = ((1 - D) \quad \text{eq 13}$$

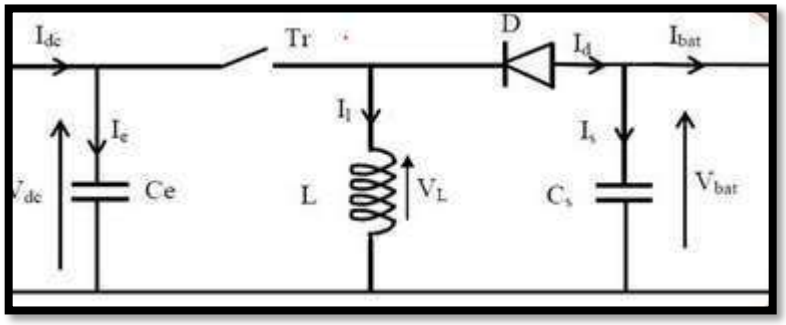


Figure (III.2) ***:*** schéma d'un hacheur Boost.

Remarque :

ce type de convertisseur est plus fréquemment utilise dans les systèmes photovoltaïques, car il sert à produire une tension plus élevée que celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et aussi, la protection anti-retour du courant de la batterie sur le générateur photovoltaïque peut être directement assurée par la diode de convertisseur Boost.

III.2.4 Comparaison entre le convertisseur Buck et Boost :

-Malgré le rendement élevé du convertisseur Buck dans les systèmes des sources conventionnelles, le convertisseur Boost peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point maximal (MPPT), à cause de ces avantages :

- Le convertisseur Boost fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir de générateur photovoltaïque.
- Il a l'avantage d'une ondulation du courant d'entrée limité par l'inductance L.
- Il peut même fonctionne avec une tension d'entrée faible, ce qui dans le cas d'une installation photovoltaïque permet récupérer le peu d'énergie disponible lors des périodes à faible éclairement.

III.2.5 *Hacheur Buck-Booste(mixte) :*

Un autre arrangement possible des commutateurs à semi-conducteur permet d'ajouter un autre type de convertisseur, ce nouveau convertisseur est obtenu en échangeant la diode D et l'inductance L du convertisseur dévolteur.

Dans ce type de convertisseur, le gain de circuit peut être supérieure ou inferieur par apport au changement de polarité, la différence fondamentale de cette classe de convertisseur avec les conver - tisseurs dévolteurs et survolteurs est que la tension de sortie est de singe oppose à celle de la source constante.

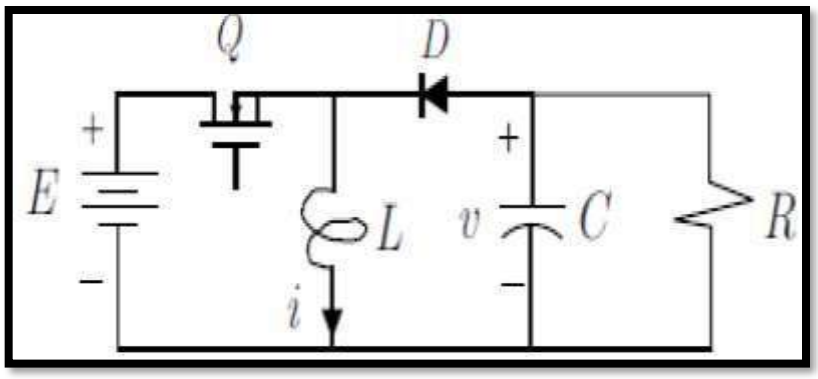


Figure (III.3): hacheur mixte (série-parallèle)

III.3 Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

III.3.1 introduction :

Régulateur MPPT ou un Tracker MPPT est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques, typiquement un panneau solaire. L'énergie délivrée par les cellules photovoltaïques dépend d'une équation complexe mettant en relation le rayonnement solaire, la température, et la résistance totale du circuit, ce qui conduit à une puissance de sortie non linéaire.

Pourquoi un régulateur MPPT : La majorité des panneaux solaires sont conçus pour produire, en théorie, un courant ayant une tension nominale de 12 Volts. En réalité la plupart de ces panneaux peuvent produire un courant dont la tension varie entre 16 Volts et 36 Volts.

Le problème réside dans le fait qu'une batterie fonctionne généralement avec une tension nominale de 12 Volts. Plus précisément entre 10,5 Volts et 12,7

Volts en fonction de son état de charge. Une batterie, lorsqu'elle est en charge, a besoin de 13,2 Volts à 14,2 Volts pour pouvoir se recharger complètement.

Cesvaleurs sontsensiblementdifférentes desvaleurs nominales produitespar laplupartdes panneaux solaires photovoltaïques.

Cas pratique : considérons un panneau qui produit **120 Watts** sous une intensité **7,1 Ampères** et une tension de **16,9 Volts**.

La puissance délivrée sera : $\boldsymbol{P = U.I = 7{,}1x16{,}9 = 120Watts}$

Or, la batterie se charge sous une tension de **12 Volts** et absorbe une puissance :

$\boldsymbol{P = 7{,}1x12 = 85Watts}$… et non **120 Watts**.

Les **35 Watts** manquants ne sont pas partis dans la nature. Ils n'ont tout simplement pas été produits par le panneau. En effet, le panneau et la batterie ne se sont pas calés de façon « intelligente » de manière à fonctionner correctement ensemble (configuration optimale). **[12]**

Cas d'éclairement variable: Un générateur photovoltaïque est un générateur dont la caractéristique I=f(U) est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différenteselonlacharge.Danslecasd'unpanneau solaire,l'intensité maximale possibleIest dépendante de la puissance lumineuse reçue par la cellule photovoltaïque. Tant que la charge ne dépasse pas la capacité de la cellule, l'intensité I est maximisée par l'ensoleillement reçu. Quand la charge augmente trop, l'intensité I baisse, jusqu'à zéro. Dans ce cas, la puissance de sortie est elle aussi nulle. Pour maximiser la puissance P, on va faire varier la tension U circulant dans la cellule, et atteindre la tension U le plus haut possible sans faire baisser l'intensité I.

Où le point de puissance maximale a été mis en évidence, pour différents ensoleillements.

Cas de température variable: Si la température du panneau est élevée on obtiendra moins de 15 Volts dans des régions chaudes et non 17 V. Avec un panneau délivrant moins de 15 Volts, la tension ne sera pas suffisante pour charger la batterie.

Dans des conditions de températures très froides, un panneau de 120 Watts est capable de produire plus de 130 Watts car plus la température est basse plus la puissance produite est élevée. D'un autre côté, dans des conditions de températures très chaudes, plus la température augmente plus la puissance produite par le panneau diminue.

C'est la raison pour laquelle le gain obtenu par l'emploi d'un régulateur MPPT est plus important dans les conditions suivantes: Hiver (basses températures) et/ou temps nuageux ou brumeux. Bref, quand il est possible de récupérer plus de puissance.

- Par temps froid les panneaux solaires délivrent plus de puissance, mais sans l'emploi d'un régulateur MPPT, la quantité de puissance perdue est supérieure à celle récupérée en plus.

- Batterie faiblement chargée. Plus le niveau de charge de votre dispositif batterie n'est bas, plus le régulateur MPPT alimente celui-ci en courant électrique.



Figure (III.4):contrôleur MPPT**.**

III.4 Méthode de poursuite du point de puissance maximale :

La recherche du point de puissance maximum (MPPT) est intégralement réalisée de façon électronique, sans aucun dispositif ou système mécanique.

Le contrôleur ou régulateur MPPT mesure et compare en permanence, la tension délivrée par le panneau avec celle du dispositif batterie. **[**4**]**

Il calcule alors le niveau de puissance maximum que :

- Le panneau peut délivrer à la batterie.
- La batterie est capable de recevoir.

III.5 Les techniques du poursuit de point maximal :

La technique appelée la poursuite de la puissance maximale (MPPT) qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source de l'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter. **[**3**]**

La technique de suivi du point à puissance maximal (**Maximum Power Point Tracking MPPT**) a été développé depuis 1968,Elle doit être utilisée dans toute application utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire et même indispensable selon la théorie du transfert optimal de puissance.

Dans la littérature Il existe différents algorithmes effectuent la recherche de MPP, les trois méthodes les plus couramment rencontres sont :

- **La méthode Hill Climbing.**
- **La méthode perturbe & observe (P&O).**
- **La méthode incrément de conductance (IncCond).**

La méthode la plus utilisé est la méthode perturbe and observe (P&O), si pour cela dans notre travail on s'intéresse par cette méthode**. [**2**]**

III.5.1 Méthode d'Observation et Perturbation "P&O" :

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilise, et comme son nom l'indique il est base sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de **Vpv** ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. **[**2**]**

onpeutdéduire que siune incrémentation positive de la tension VPVengendreun accroissementde lapuissance$P$PV,cela signifieque le pointde fonctionnement setrouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV **(VPV**), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, **[**4**].**

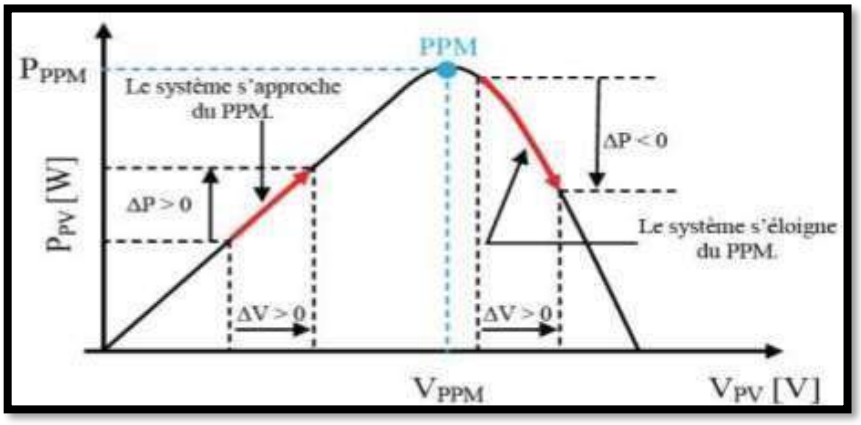


Figure (III.5): caractéristique Ppv(Vpv) d'un panneau solaire.

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale de fonctionnement Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple. Vmp.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues relativement aux conditions stables ou lentement changeantes.

Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les conditions de stabilité ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. **[**4**]**

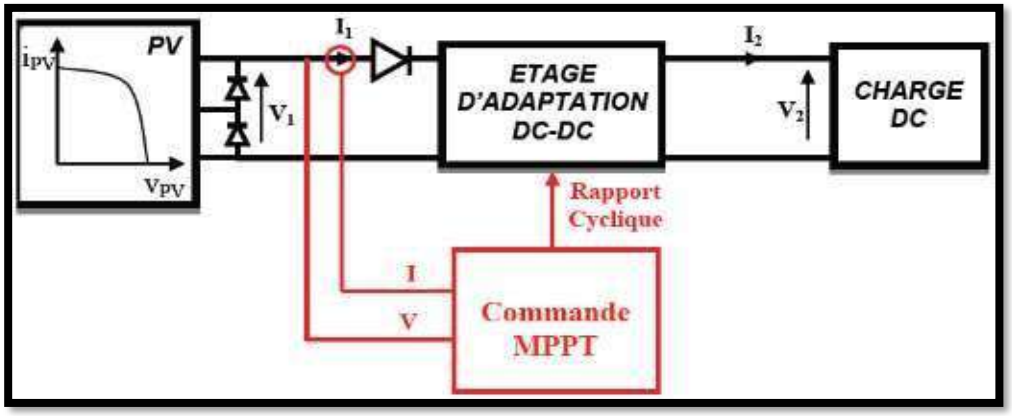
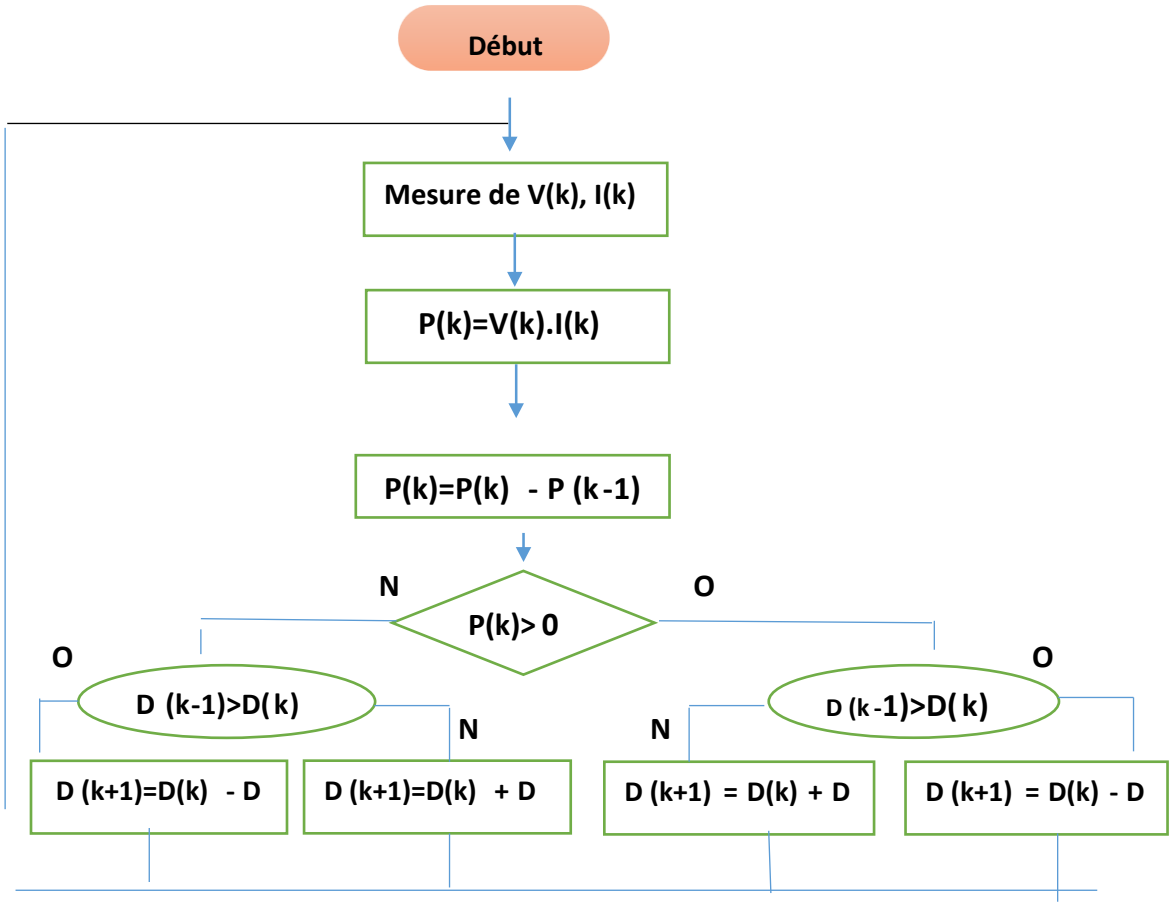


Figure (3.6) : Chahine élémentaire de la production photovoltaïque

5.2) Algorithme de la méthode (P&O) :



III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les convertisseurs statiques (DC-DC), et on a vu leurs rôles importants dans la chaine de production photovoltaïque.

Puis le reste de ce chapitre est consacré à la description du régulateur MPPT, la commande MPPT, et nous avons trouvés, les algorithmes MPPT les plus répondus dans la littérature, (Inc, CoN, P&O).

.

Chapitre IV:

Simulation du systèmephotovoltaïque

IV.1. Introduction:

Ce chapitre, a pour but la simulation d'un système photovoltaïque adapté par un hacheur survolteur avec une commande MPPT, Il existe plusieurs commandes pour la recherche de la puissance maximale d'un module photovoltaïque nous proposons la méthode du réseau de neurone artificielle et la technique classique « perturbation et observation ».

<u>Note :</u> Toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MATLAB 2) Simulation du système photovoltaïque :

Dans cette simulation on a utilisé un module photovoltaïque MSX60 (Tableau 04), et, un Hacheur Booste caractérisé par :

$\boldsymbol{C_1 = 2200.e^{-6}F}$, $\boldsymbol{C_2 = 2200.e^{-6}F}$, $\boldsymbol{L = 250.e^{-6}H}$, $\boldsymbol{R_{ch} = 20homs}$

IV.2 Simulation du système photovoltaïque

La figure (28) présente le schéma Matlab Simulink d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O), composé avec un module PV et un Hacheur commandé en MPPT qui a pointées la tension et le courant de sortie du module.

Caractéristiques	Spécification
Nombre des cellules Ns	36
Puissance maximalPmax	60 W
Tension à PmaxVmpp	17.1 V
Courant à PmaxImpp	3.5 A
Puissance minimum garantie	58 W
Courant de court-circuit Icc	3.8 A
Tension de circuit ouvert	21.1 V
Coefficient de la température de Vco	-80±10Mv/°C
Coefficient de la température de Icc	0.065±0.015%/°C
Coefficient de la température de la puissance	-0.5±0.05%°C

Tableau 02 : caractéristique électrique du module photovoltaïque MSX60

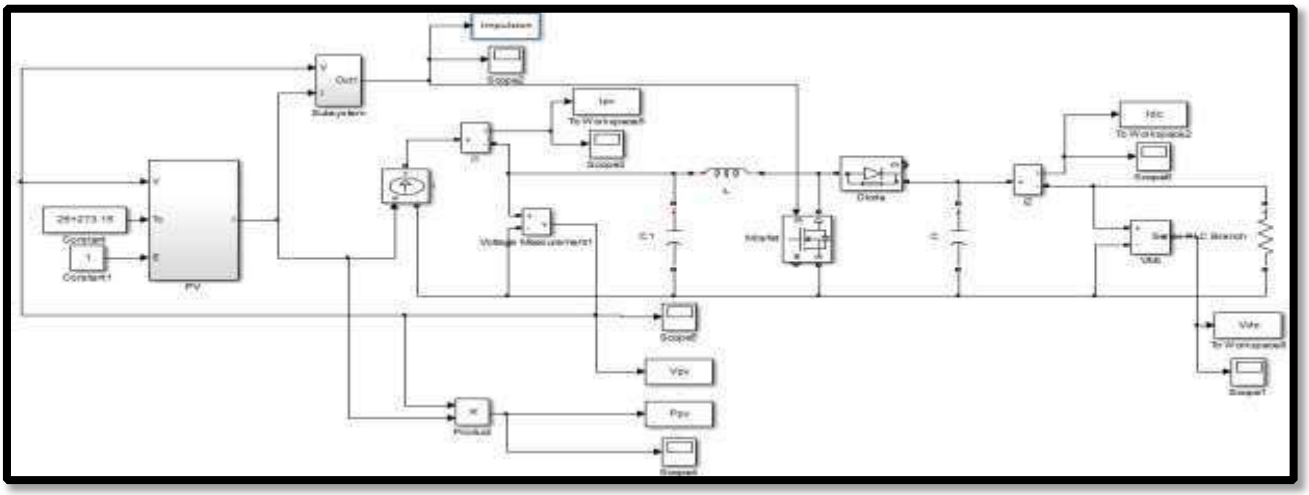


Figure (IV.1) : schéma block d'un système photovoltaïque adapté à la commande MPPT

IV.2.1 Caractéristiques électriques des modules photovoltaïques :

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

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

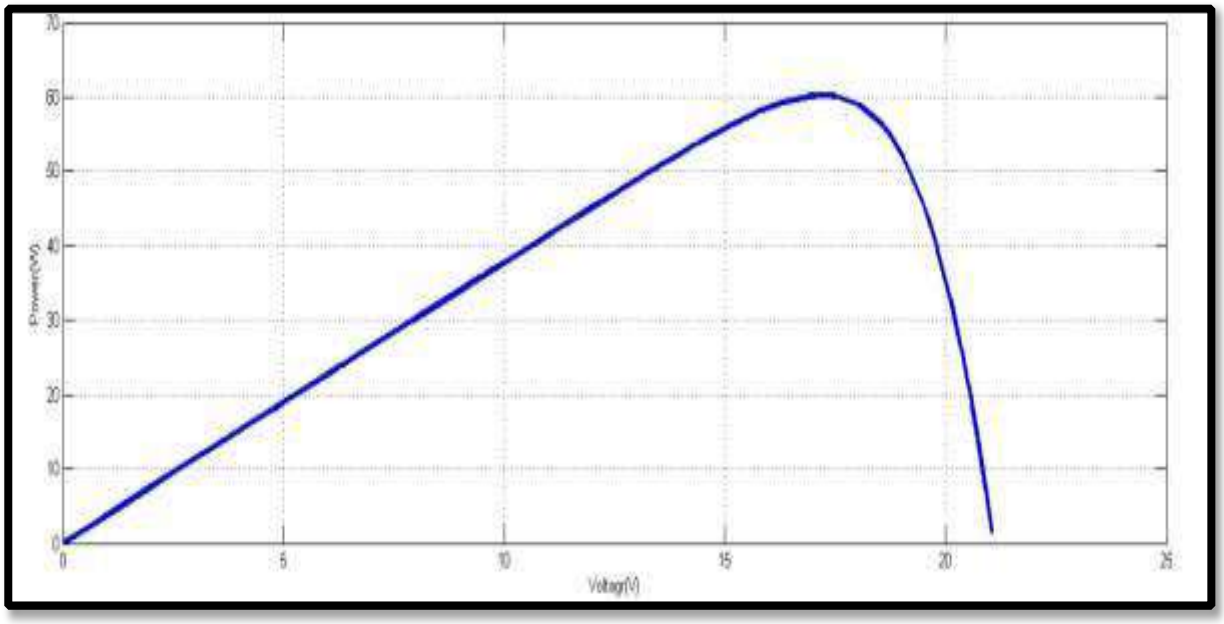


Figure (IV.2) : Allure de la puissance en fonction de la tension à (T=25C° G=1000W/m²).

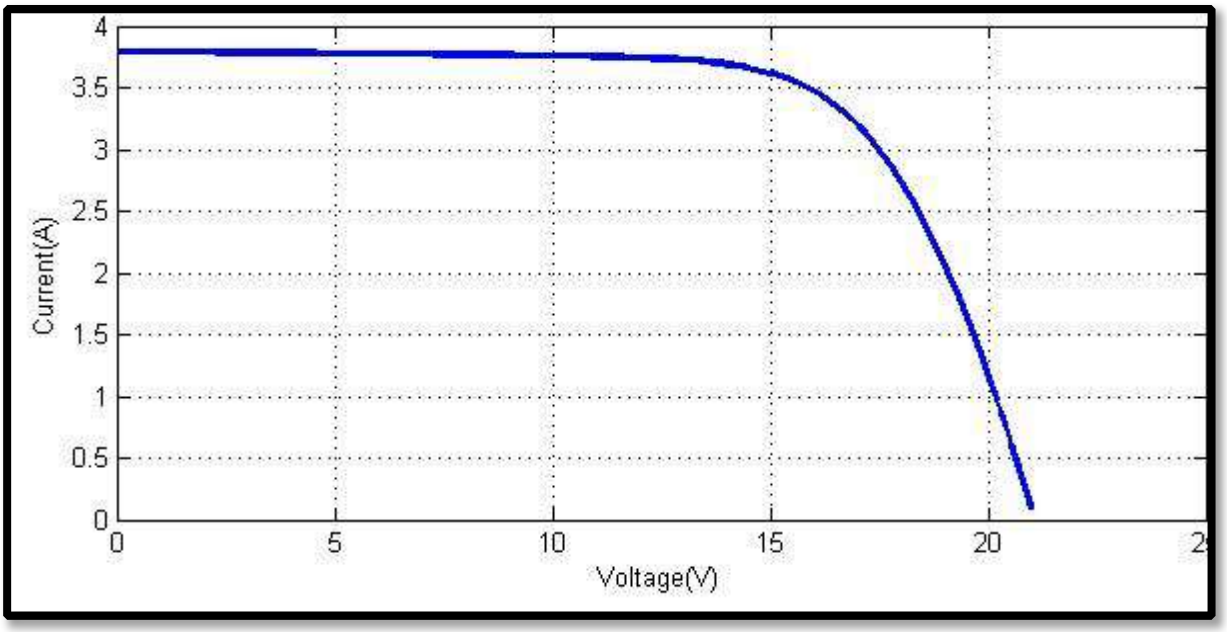


Figure (IV.3) : Allure ducourant en fonction de la tension à (T=25C° G=1000W/m²).

IV.2.2.influence de l'éclairementetlatempérature sur les caractéristiquesélectriquesde GPV:

D'après l'équation (05) on peut dire que Les caractéristiques électriques (I-V et P-V) d'un GPV dépendent fortement de la température et l'éclairement, cela prouve que le courant (Ipv) et la tension (Vpv) sont considérablement influencés par le changement de l'éclairement G et la température T.

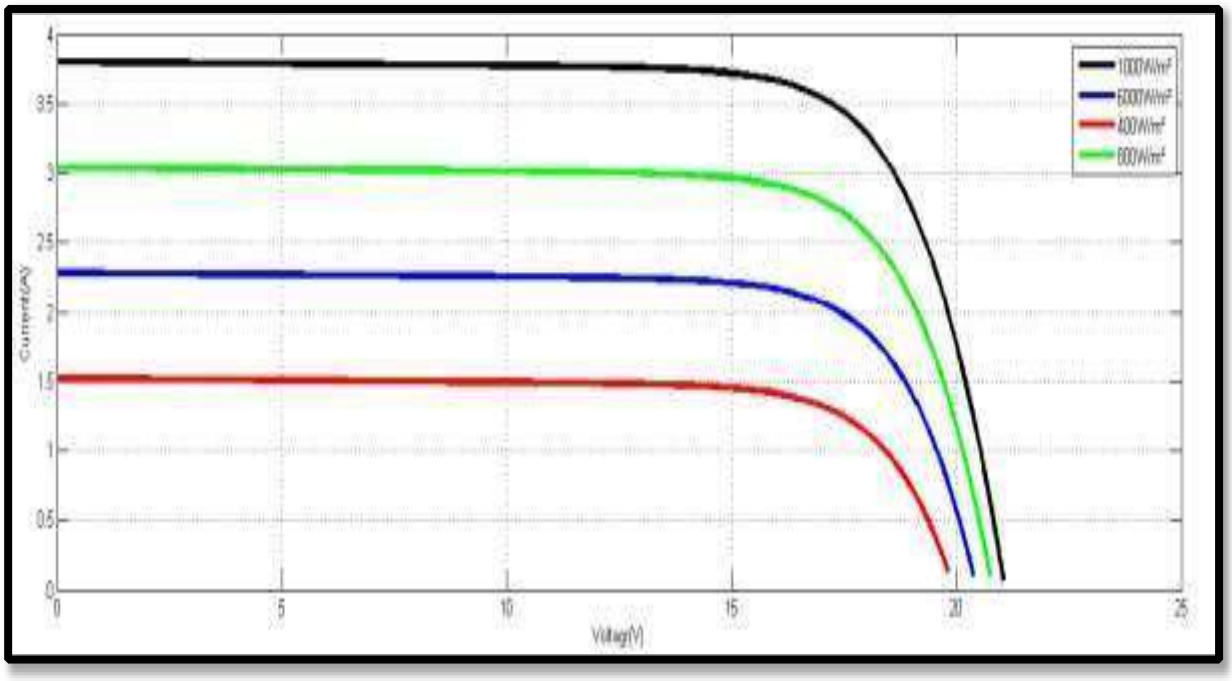


Figure (IV.4): Allure de la caractéristique I-V T=25C° (G=1000W/m²;800W/m²; 600W/m²; 400W/m²)

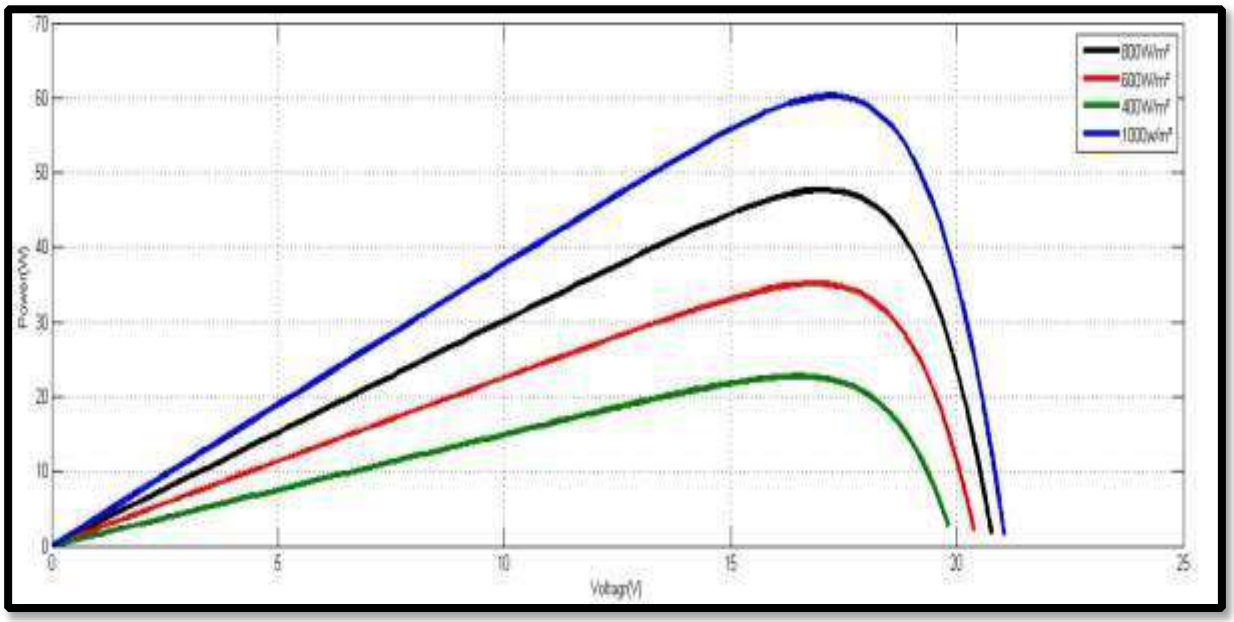


Figure (IV.5): Allure de la caractéristique P-V T=25C° (G=1000W/m²;800W/m²; 600W/m²; 400W/m²)

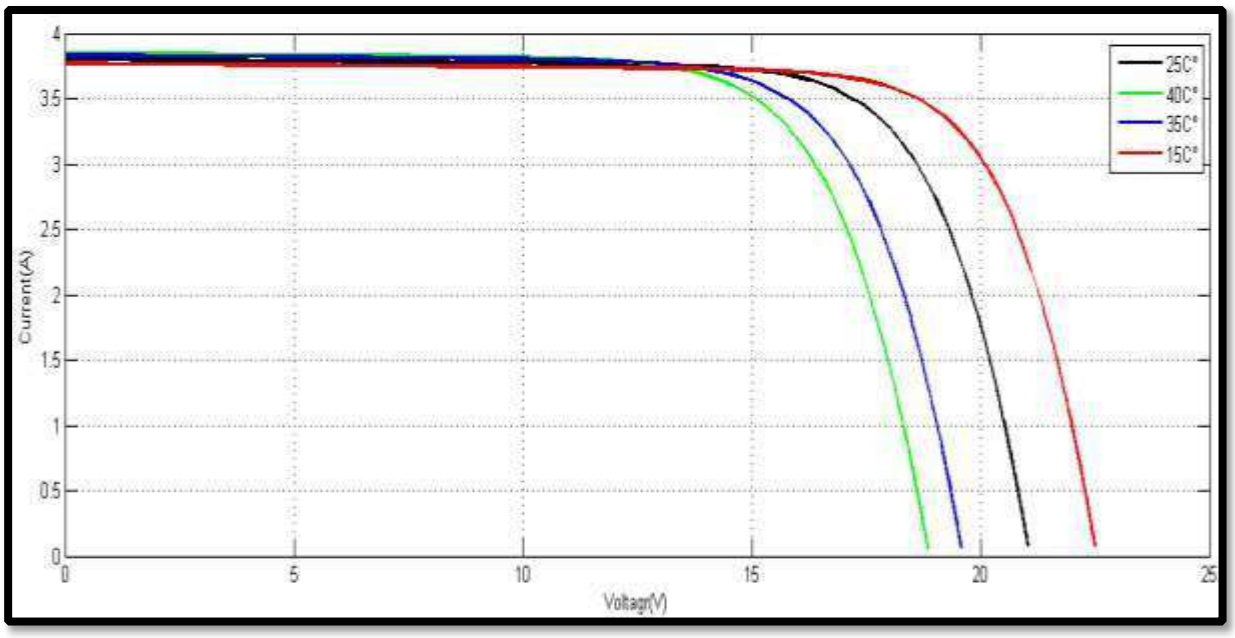


Figure (IV.6): Allure de la caractéristique I-V G= G=1000W/m² (T=25C°; 40C°;35C°;15C°)

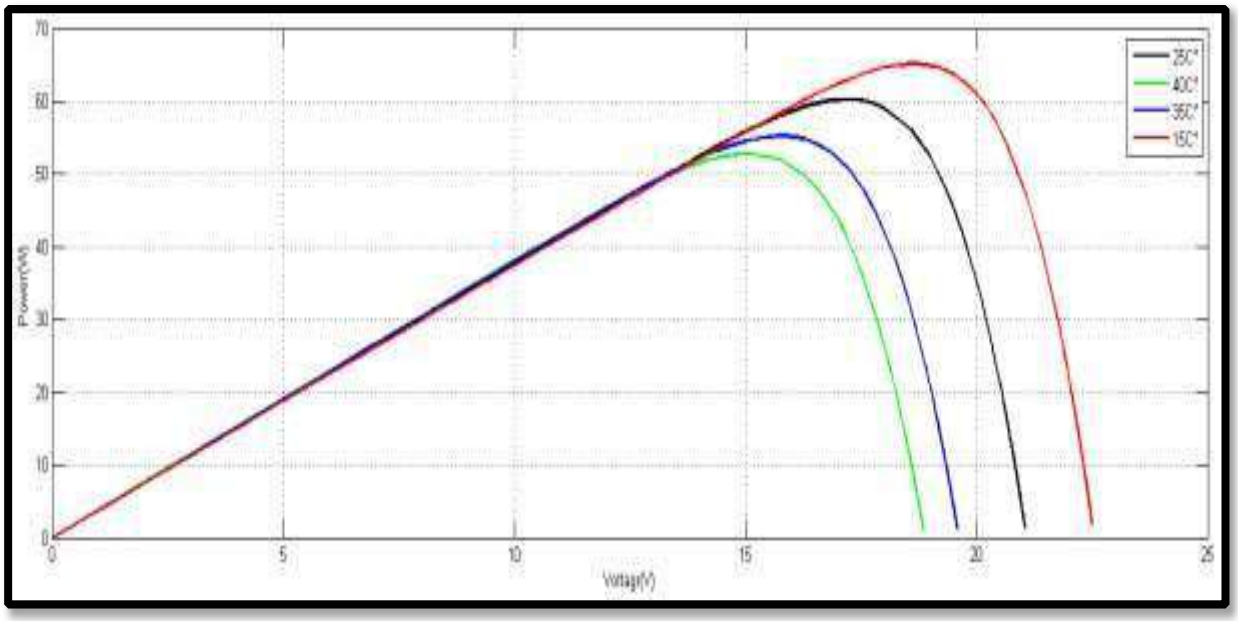


Figure (IV.7): Allure de la caractéristique P-V G= G=1000W/m² (T=25C°; 40C°;35C°;15C°)

- D'après les Figure (IV.2) et (IV.3), On remarque que la tension maximale Vpp correspondante àlapuissance maximale ne varie que très peuen fonction de l'éclairement,contrairement aucourant Im qui augmente fortement avec l'éclairement.

- D'après les Figure (IV.4) et (IV.5), On remarque que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

- Ces figures montrent clairement la dépendance du courant de sortie I et de la tension V de sortie de la température et de l'éclairement et traduisent une dépendance de la puissance de ces deux paramètres.

- La puissance de sortie est considérablement réduite pour une insolation décroissante.

La puissance de sortie est réduite par une augmentation de la température de panneau.

IV.3 Simulation de la commande MPPT (P&O):

Les conditions idéales conventionnelles sont très rarement remplies dans la pratique, et la variation de ces conditions est aléatoire et imprévisible. Le changement de l'ensoleillement et de la température influe directement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. C'est pour celal'intégrationd'unecommande MPPT estobligatoire.

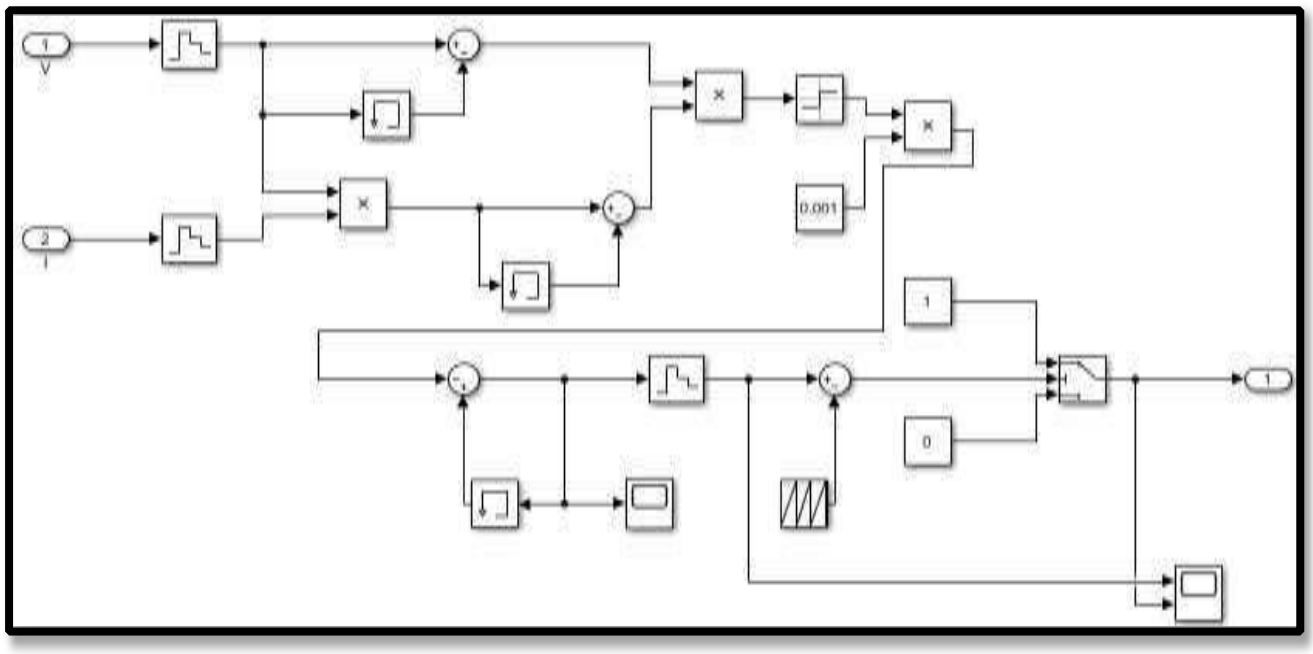


Figure (IV.8) : schéma block de l'algorithme (P&O)

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les Figure (IV.4) à (IV.8) . Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque.

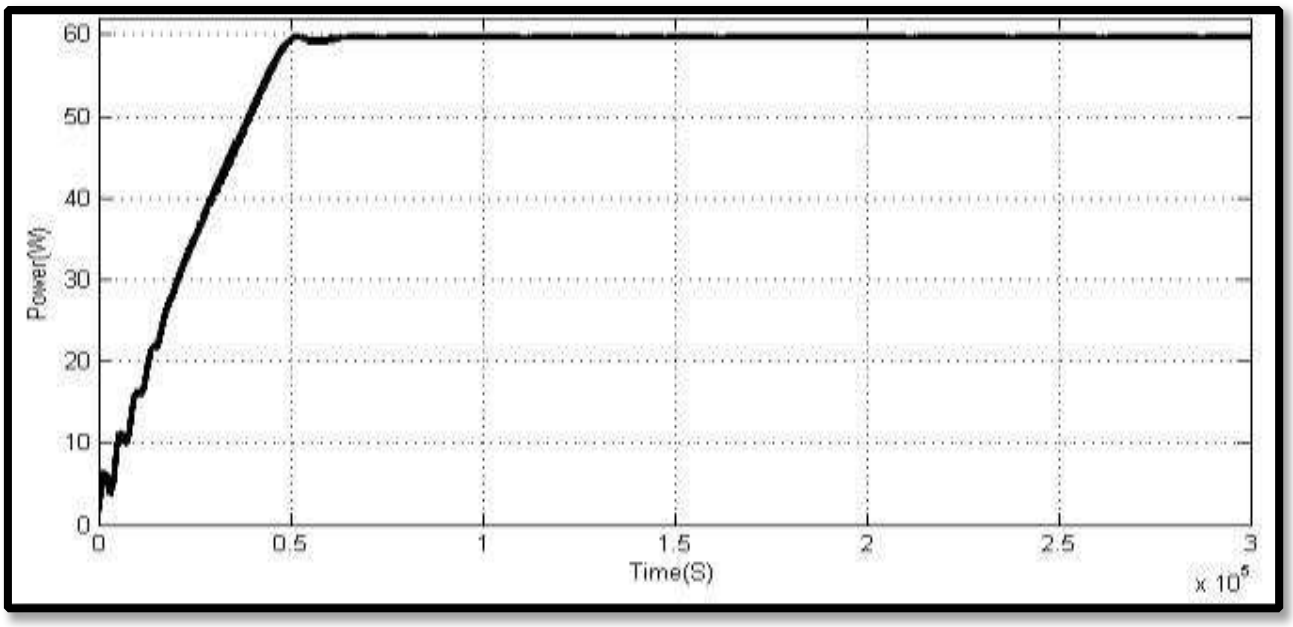


Figure (IV.9) : Allure de la puissance en fonction de temps pour (T=25°C, G=1000W/m²).

De la Figure (IV.9) on remarque que la puissance met un temps de 0.7[S] en régime transitoire, caractérisé par des oscillations faibles pour se stabiliser à la valeur maximale [60W]. Régime permanant.

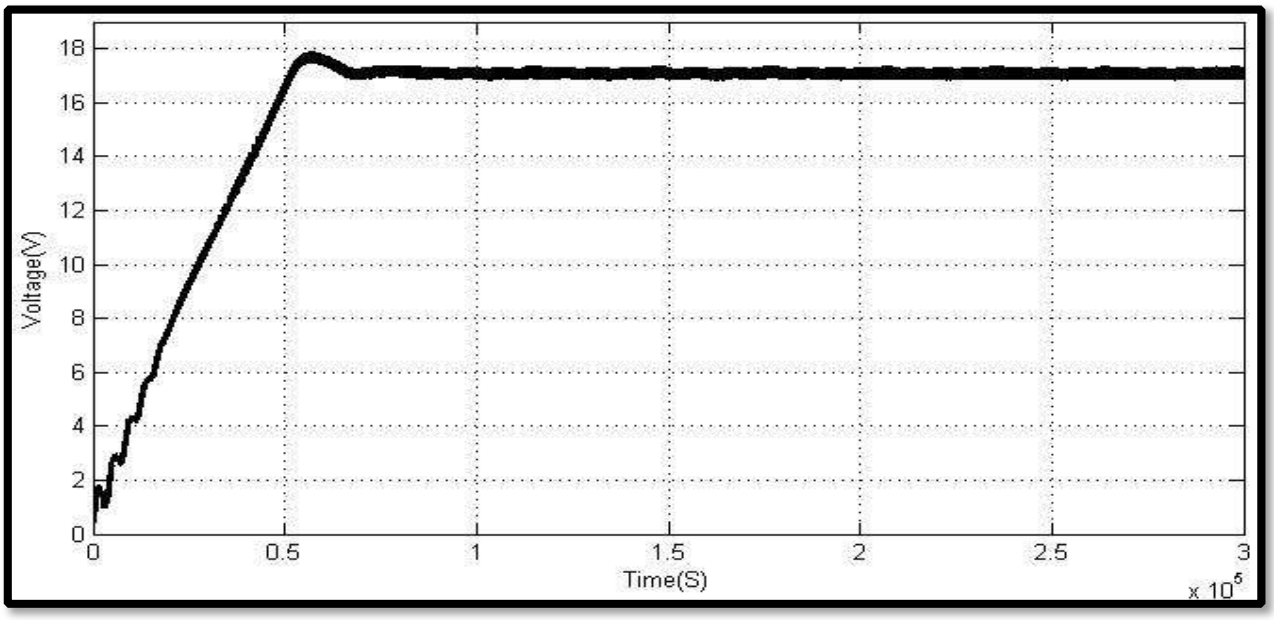


Figure (IV.10): Allure de la tension en fonction de temps pour (T=25°C, G=1000W/m²).

D'après la Figure (IV.10**)**, on remarque que : la tension passe par un régime transitoire dure 0.7 [S], caractériser par une augmentation jusqu'à la valeur 17.8 [V], puis elle se stabilise à la valeur maximale 17.1 [V], dans le régime permanant.

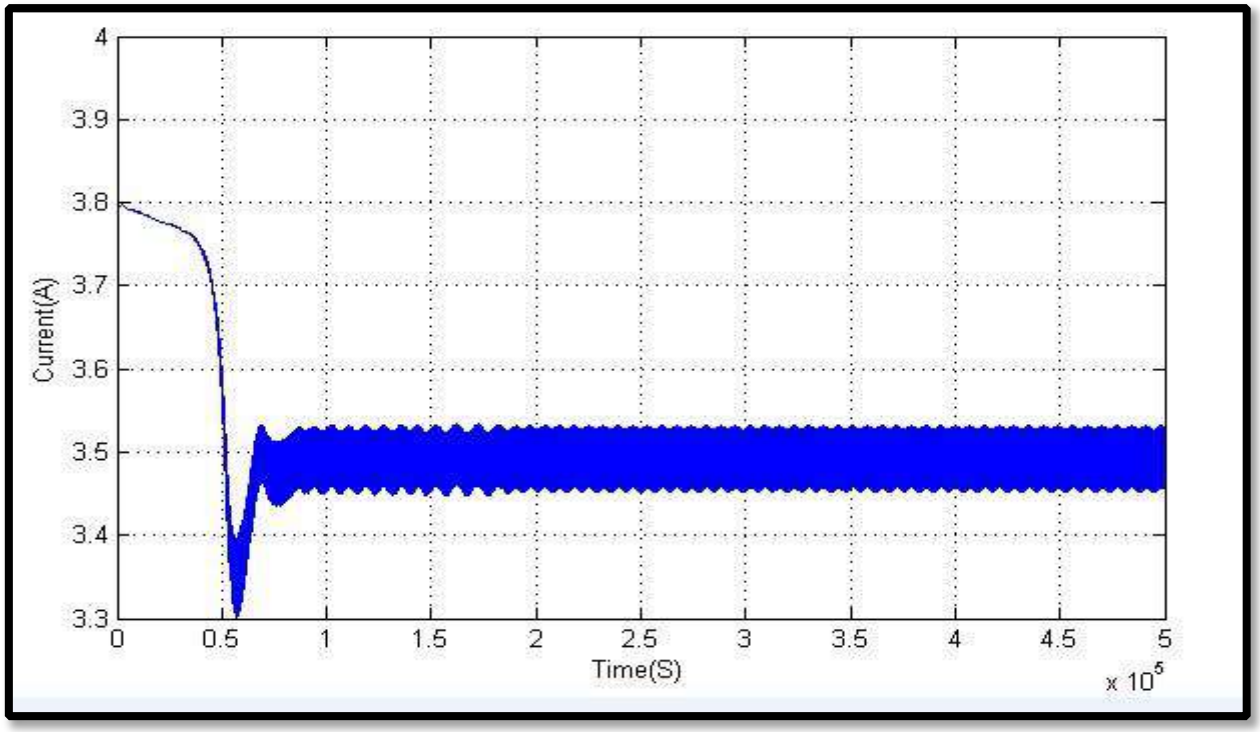


Figure (IV.11) : Allure du courant en fonction de temps pour (T=25°C, G=1000W/m²).

De la Figure(IV.11),on remarque que pendantla période de[**0à0.7**] le courantaugmentebrusquement puis il diminue avec des oscillations importantes, puis il se stabilise à la valeur maximale 3.5 [A]

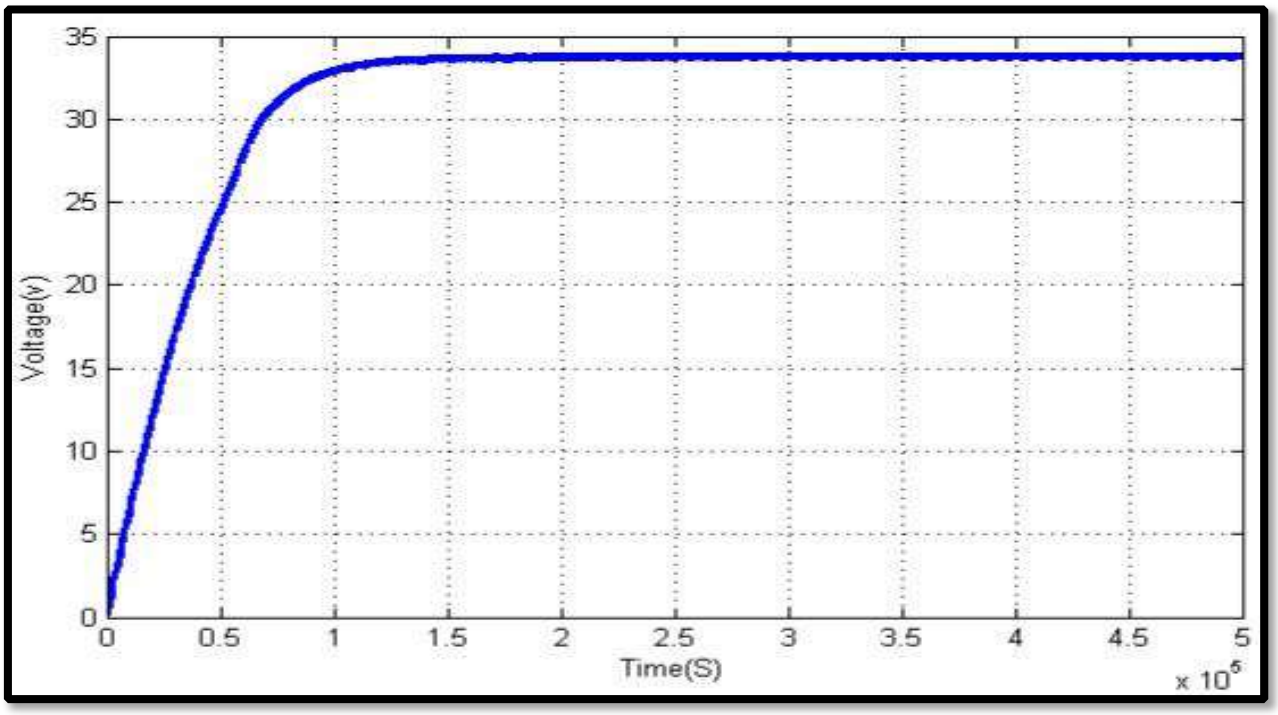


Figure (IV.12) : Allure de la tension à la sortie du système PV (T=25°C, G=1000W/m²).

D'après la Figure (IV.12)**,** on remarque que la tension à la sortie de la Hacheur est supérieure à la tension du panneau.

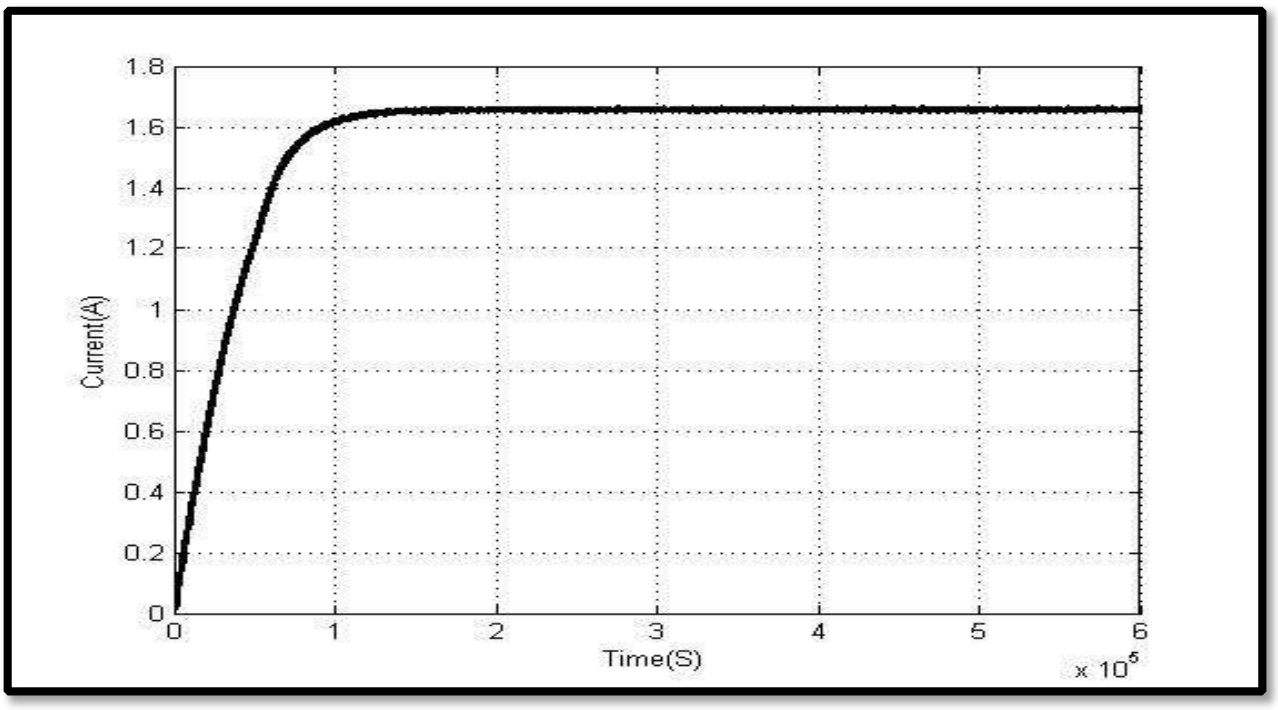


Figure (IV.13) : Alluredu courant à la sortie du système PV (T=25°C, G=1000W/m²).

D'après la figure (IV.13), on remarque que le courant à la sortie de la Hacheur est inférieur au courant du panneau.

IV.4 Simulation de la commande MPPT à base de réseau de neurone :

Lanouvelletechnique choisie pour le poursuit du point maximale est la méthode neuronale,qui consisteentroisétapes, nous allonslesappliquerpour approximer la sortie qui est le rapport cyclique qui corresponde à la puissance maximale, en fonction des changements d'illuminations et de la température, Où notre système doit pouvoir évoluer, rapidement et efficacement.

Alors pour estimer MPPT nous allons utiliser un réseau de neurone de type perceptron multicouches, dont le rôle est d'estime le rapport cyclique qui correspond a la puissance maximale.

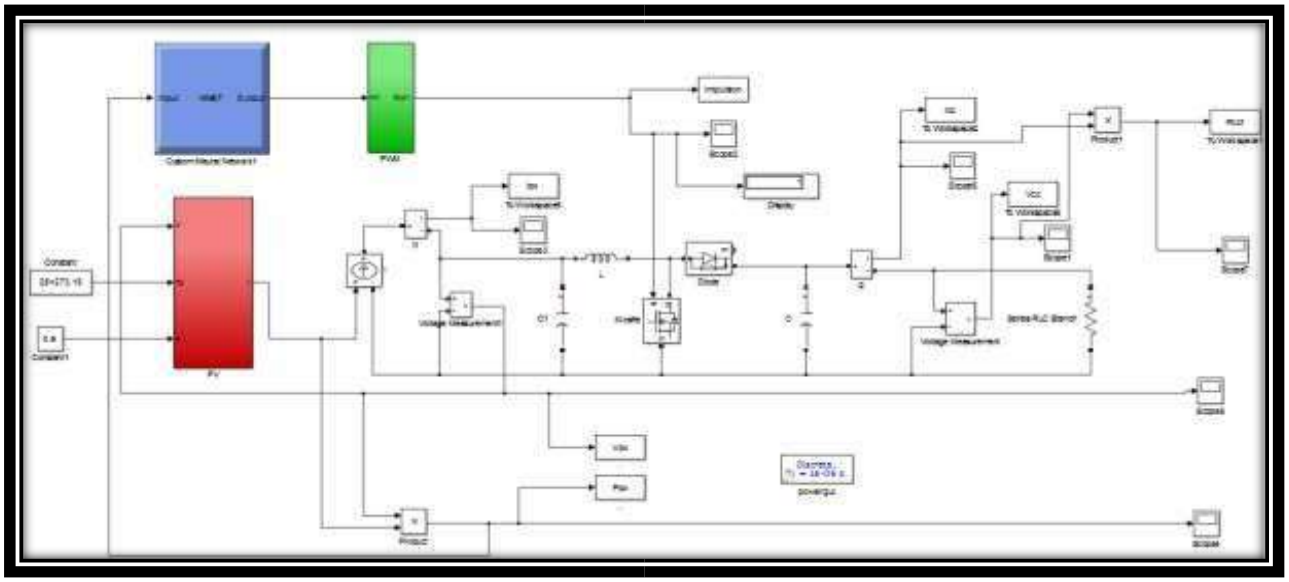


Figure (IV.14) : Modèle de simulation du GPV adapte par la technique MPPT(RNA)

IV.4.1 Procédure de construction d'un réseau de neurones :

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. Entrainement 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.

L'objectif de cette étape est de rassembler un nombre de données suffisant pour construire une base représentative de données, qui servira à l'apprentissage et au test du réseau de neurones, nous avons exploité les résultats de simulation obtenues par la méthode P&O.

IV.4.2 Choix de l'architecture du réseau neurone :

La première chose dans l'implémentation de réseau de neurones est le comptage des variables d'entrée et de sortie du problème. Dans ce cas on a une seul variable d'entrée qui est la puissance maximale en fonction de l'éclairement (G) et la température (T),et une variable de sortie qui est le rapport cyclique (D).

Donc le réseau qui convient a notre besoin est le perceptron multicouches avec :

- Une couche cachée à un seul neurone.
- Une couche cachée a 10 neurones.
- Une couche de sortie a un seul neurone.

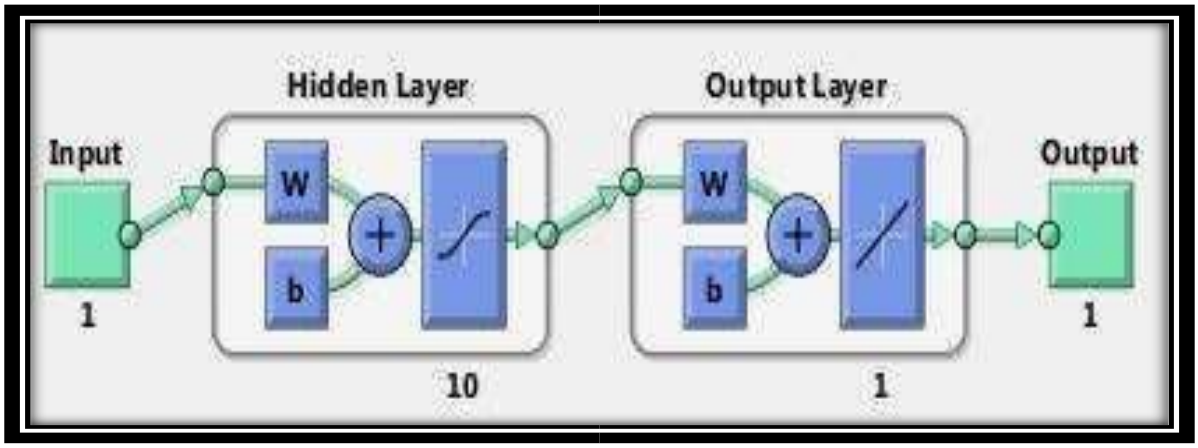


Figure (IV.15) : architecture du RNA pour la commande MPPT

IV.4.3 Comment développer le réseau neuronal artificiel :

Utilisation de la boite à outils Matlab réseaux de neurones-(Neural Network Toolboxnntool).

Il s'agit d'une structure hiérarchique, La fonction de création d'un réseau est spécifique au modèle de réseau utilisé.

- **La fonction newlvq (new learningvectorquantization network)** : pour résoudre les problèmes de classification.

- **La fonctionnewff (feed-forward back propagation network) :**

pour résoudre les problèmes d'optimisations.

Il existe d'autres fonctions pour la création d'un réseau de neurone

(newlm,newcf,etc…), mais comme notre problème est un problème d'optimisation et notre structure du réseau est hiérarchique, la création du réseau est commandée par la fonction newff.

Réseau = newff (P, T, S, TF, BTF, BLF, PF, IPF, OPF, DDF) ;

P: matrice d'entrée (notre cas est la puissance maximale Pmpp).

T: matrice de sortie (notre cas est le rapport cyclique D).

S: nombre de neurone dans la couche caché (notre cas est une seule couche caché avec 10 neurones).

TF: fonction d'activation dans les couches, par défaut est la fonction (tansig) pour les couches cachées, et la fonction purelin pour la couche de sortie.

BTF: algorithme d'apprentissage par paquets du réseau (par default = trainlim).

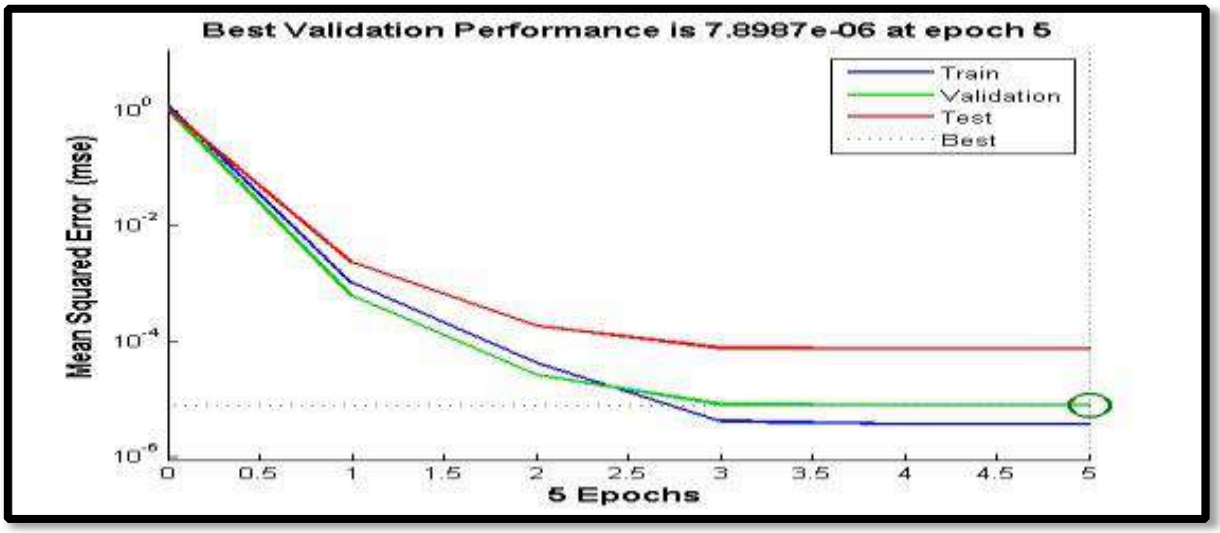
BLF:l'algorithme d'apprentissage incrémental du réseau (par default = learngdm).

PE : fonction de performance (par default = MSE main square error).

DDF: fonction de division des donnes, (par default = dividende).

Résultat de test du réseau:

On a effectué un apprentissage automatique à l'aide du logiciel Matlab jusqu'à l'obtention d'une erreur quadratique très petite. (Figure 4.16).



1 (

Figure(IV.16):résultatd'apprentissage du réseau

Création du block Simulink 2

v

)

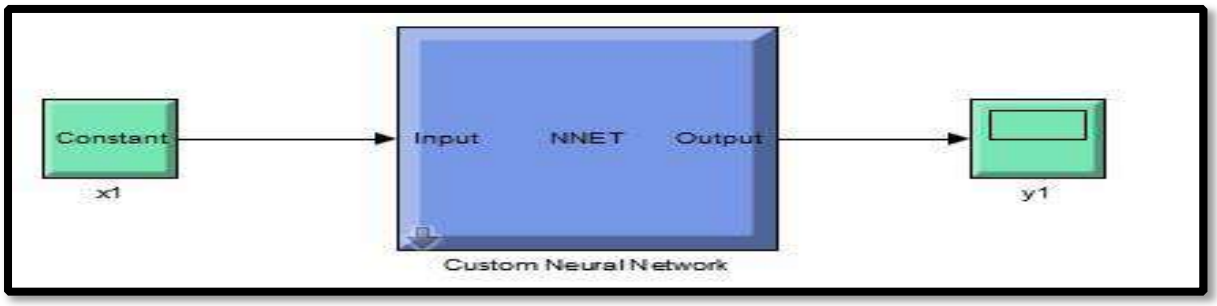


Figure (IV.17) :schéma Bloc du réseau de neurone artificielle dans SIMULIN

Performance du RNA

```
>> perf=perform(net1,outputs,targets)

perf =

    1.7040e-05
```

Résultats de simulation :

Cas: 01

Nous avons fixé la température à 25°C, et on a fixé& l'éclairement a 900W/m², pour voir comment les deux systèmes vont réagir.

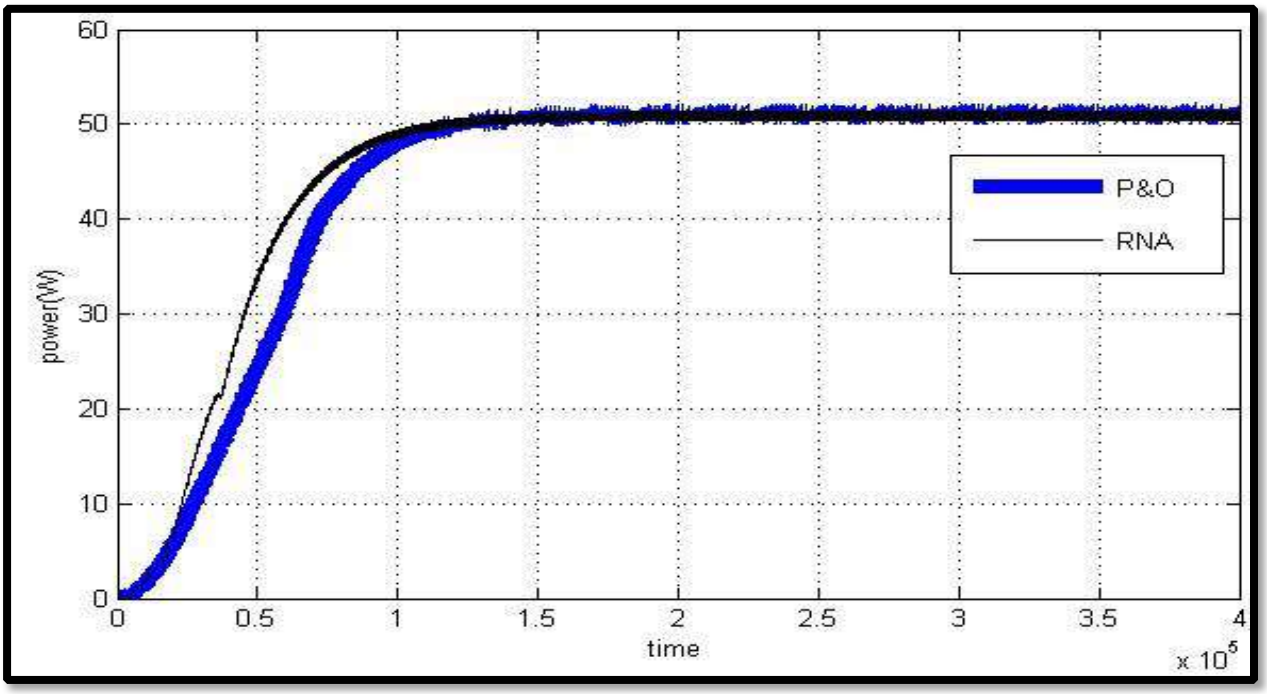


Figure (IV.18) : Allure de la puissance en fonction du temps (T=25°C, G=900W/m²).

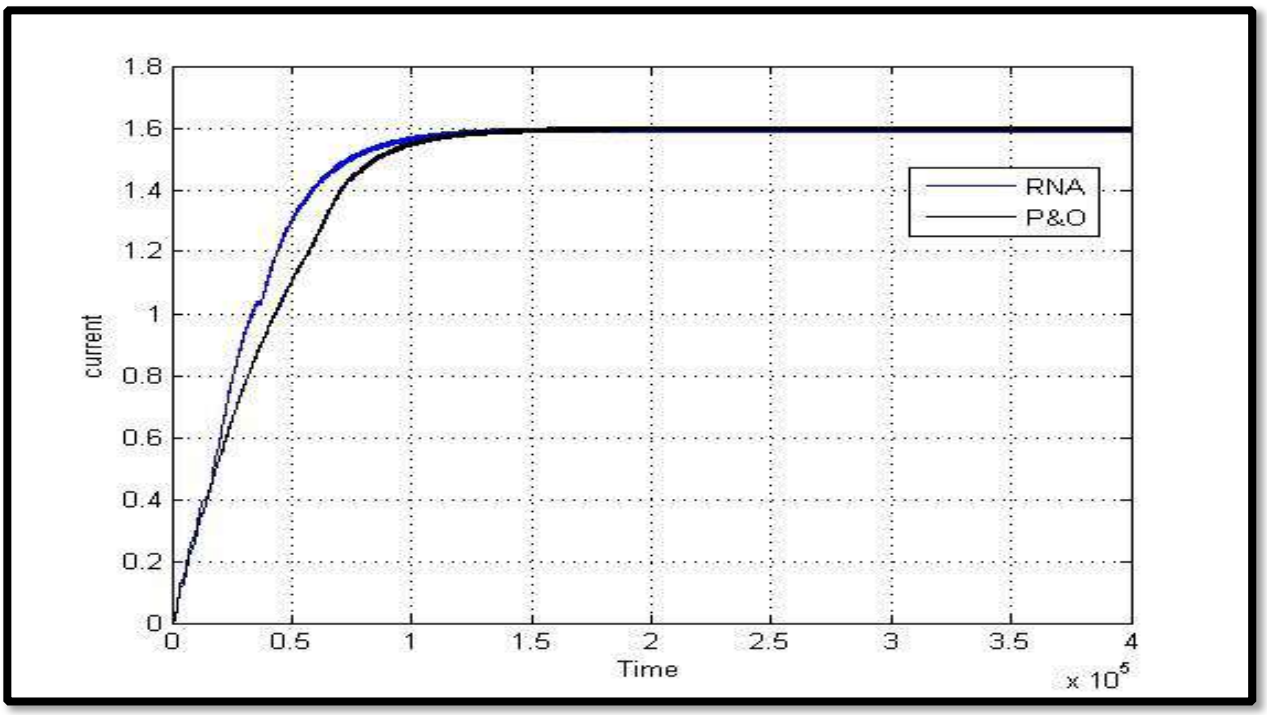


Figure (IV.19) : Allure du courant en fonction du temps (T=25°C, G=900W/m²).

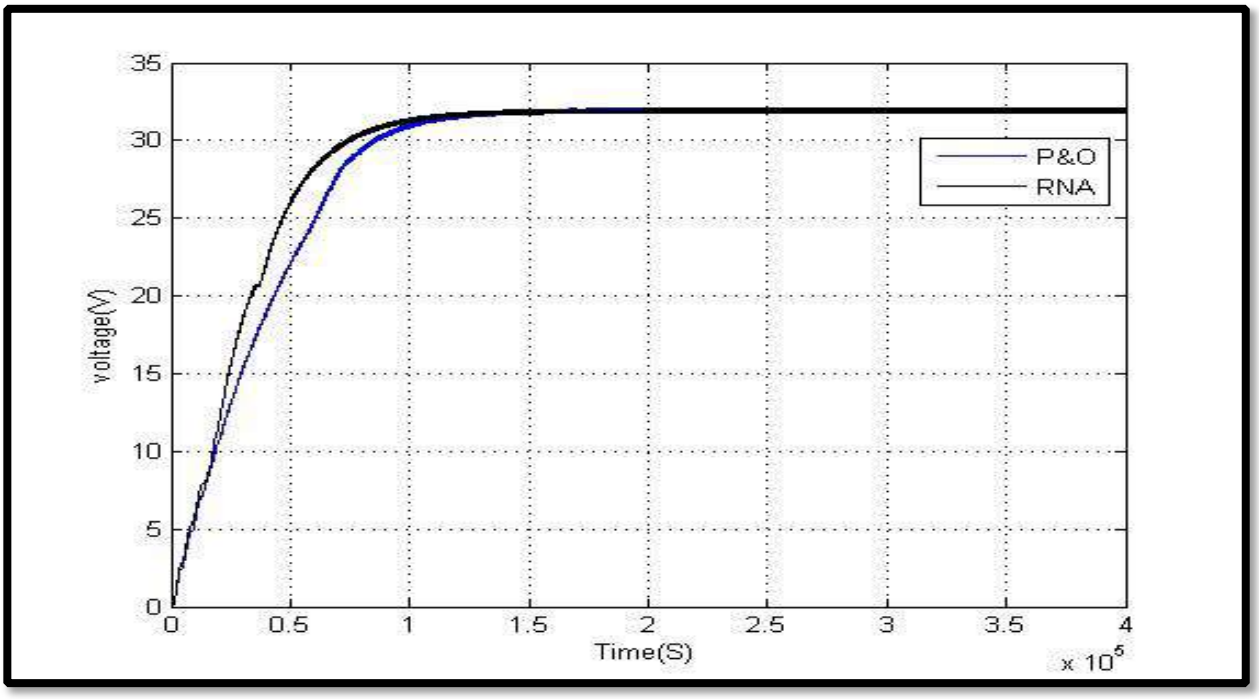


Figure (IV.20) : Allure de la puissance en fonction du temps (T=25°C, G=900W/m²).

D'après les figures (4.18, 4.19,4.20), on peut dire que, le système MPPT avec réseau de neuroneconverge rapidement versle pointde fonctionnement maximalpar apport au systèmeMPPT avec P&O.

Cas : 02

Nous avons fixe la température a 25°C, eton afait une variation brusque de l'éclairemententre [900 W /m², 0, 900 W/m²], pour voir les deux systèmes,comment vont réagir.

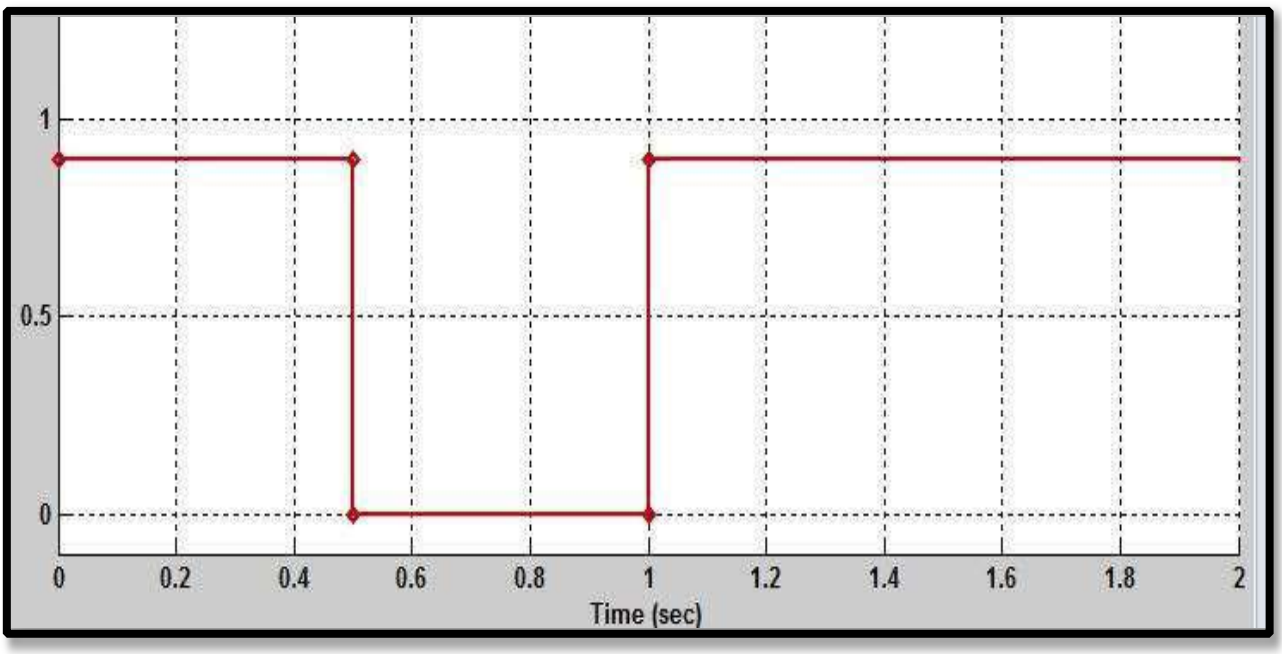


Figure (IV.21) : Signale de l'éclairement à l'entrée du système PV

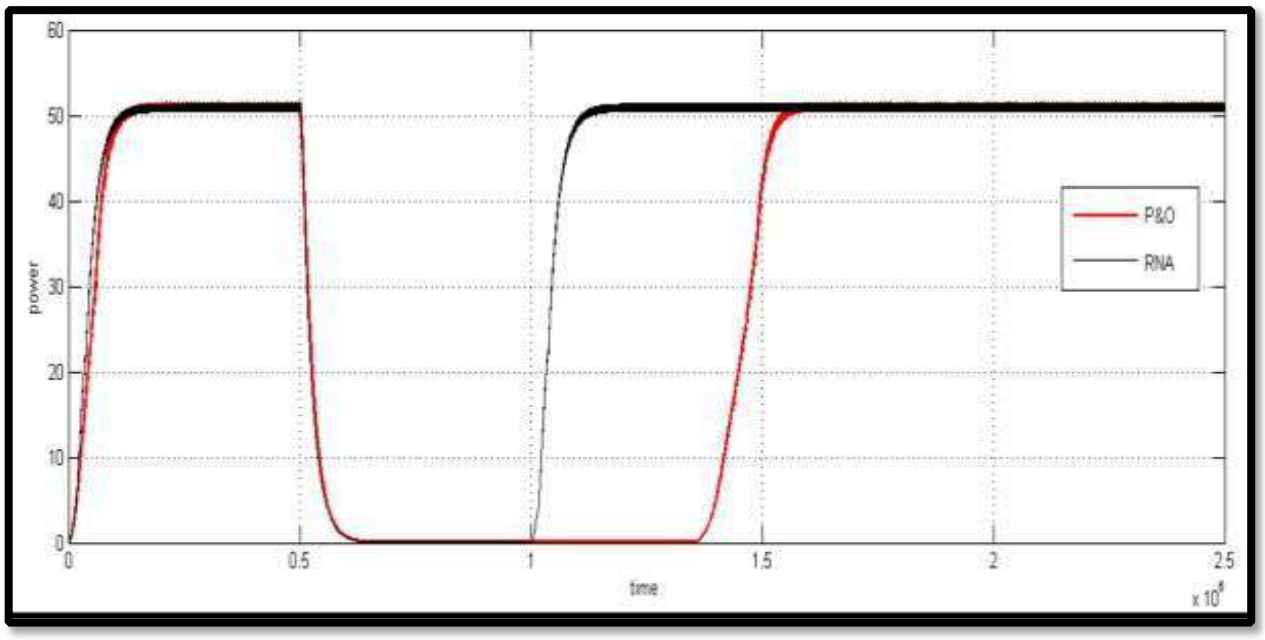


Figure (IV.22) : Allure de la puissance en fonction du temps

D'après la figure (IV.22): le système avec la commande MPPT (RNA), réagie plus rapide (instantanément) à lavariation brusque de l'éclairement, pourse stabilise a la valeurde la puissance maximale,par apport a le système avec la commande MPPT (P&O), qui prend un temps intéressant pour se stabilise a la valeur maximale de la puissance.

Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur P&O mais montrent également un meilleur fonctionnement du contrôleur neuronal. Ce dernier a prouvé qu'il a de

Meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

IV.5 Conclusion:

Pour assurerlefonctionnementd'un générateurphotovoltaïqueàson pointdepuissancemaximale, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés.

Ces contrôleurs sont destinés à la poursuite PPM et à minimiser ainsi l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction de la charge et des conditions climatiques.

Nous avons fini cette chapitre par Une étude comparative entre le contrôleur de puissance RNA à celle du contrôleur classique P&O a été présentée à travers d'une série de simulations.

On peut dire que les réseaux de neurones artificiels sont des outils de modélisation efficaces et puissants, leur robustesse réside dans la possibilité de prédire la sortie du réseau même si la relation avec l'entrée n'est pas linéaire voire inconnue.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Il semble que l'utilisation de l'énergie renouvelable serait une bonne solution pour réduire le niveau supérieure de la pollution mondiale, et de couvrir les besoins en énergie, Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

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 facs résultats obtenus, on peut conclure que le système RNA fait apparaître un bon compris 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.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Chikh Ali, Etude de la Poursuite du Point de Fonctionnement Optimal du Générateur Photovoltaïque (G. PV),* 3rd International Conférence: Sciences of Electronic,Technologies of Information and Télécommunications, March 27-31, 2005 – TUNISIA Unité de Recherche En Energies Renouvelables En Milieu Saharien, URER/MS, Adrar, 01000, Algérie.

[2] A. F. Boehinger., Self Adaptive DC Converter for Solar Spacecraft Power Supply. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, AES-4, n° 1, PP 102-111, 1968.

[3] O. Thameur, Application des Algorithmes Génétiques dans la commande des Hacheurs MPPT, ENP Algérie, Juin 2006.

[4] K. Sobaihi, Etude de Réalisation d'un hacheur MPPT à contre réaction de tension, Magister, ENP Algérie, Juin 2003.

[5] G. F. TchoketchKebir, Commande des Hacheurs MPPT, ENP Algérie, Magister, Février 2006.

[6] B.Amrouche,Commande Adaptative àBasedeRéseauxdeNeuronespourBrasManipulateurs, Magister, Université SAAD DAHLEB de BLIDA, Juin 2003.

[7]] R. Don Hush, Bill Horn, "Progress in Supervised Neural Networks, what's the new Since Lippmann",IEEE, Signal Processing Magawine, January 1993.

[8] M. Caudil, C. Bulter, "understanding Neural Networks", volume 1: Basic Networks, MIT PRESS, USA 1993.

[9] T.Hiyama, S.Kouzuma, T.Imakubo "Identification of Optimal Operating Point using Neural Network for Real Time Maximum Power Tracking Control", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.10, No. 2, June 1995, p. 360-367.

[10] **BENADEL Faiza ''**Etude Et Simulation D'une CommandeMPPTPour Système PV'Mémoire de magister,UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF -M'SILA 2016.

[11] **LASMI Yassine «**Optimisationde lapoursuite du pointde puissancemaximale(MPPT)d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes» Mémoire de Magistère, UNIVERSITE SETIF-1 –ALGERIE,2013**.**

[12] **]BENDJELLOULI Zakaria**,«contributionàlamodélisationd'unecellulesolaire»,Mémoire de magister,UNIVERSITEDE BECHAR,le 28/06/2009.

[13] **T.MARKVARTETL.Castaber**, "Photovoltaic Fundamentals and applications''. PrefaceGuideto Usageof theHandbook byProfessional Groups.2012.

[14] **AAMAROUAYACHEMohamed,**«contributionàl'optimisationd'unechainedeconver sion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014.