

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergies Renouvelables

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

ETUDE DE PERFORMANCE D'UN MODULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE AVEC UN APPROCHE PAR RESEAU DE NEURONE

Présenté par :

- ***KHELIFI WALID***
- ***AIT ABDALLAH KAMEL***

Soutenu le : 10/07/2020 devant le Jury :

<i>M. BENMOHAMMED FAYSSAL</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. TAIBI BRAHIM</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. HABCHI YASSINE</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

REMERCIEMENT

Le travail a été fait dans le laboratoire de l'énergie et des matériaux renouvelables au Centre universitaire Salhi Ahmed dans la ville de NAAMA sous la supervision des professeurs TAIBI Ibrahim et SAADA Zakaria et en aidées travailleurs de laboratoire et la conduite d'un personnel étudiant composé

de nous :

(AIT ABDALLAH Kamel, Khelifi Walid).

A cette occasion, nous voudrions adresser nos sincères remerciements au Professeurs TAIBI Ibrahim et SAADA Zakaria, et à tous les travailleurs du laboratoire des énergies renouvelables, au directeur et aux professeurs du centre universitaire sans exception,

Ce travail est le résultat d'un effort qui s'est accompagné de difficultés, de plusieurs tentatives et d'expériences de, remerciements.

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A ma chère mère et mon cher père,

A mes chers frères et sœurs,

A toute ma famille,

A tous mes amis, -

A tous mes collègues de la promotion

2020.

Je ne peux pas clore mes dédicaces, sans

rendre un grand hommage au « Dr.

SAADA Zakaria» Pour m'avoir tout

simplement donné une grande partie de

l'énergie nécessaire pour conclure ce travail

RÉSUMÉ

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

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

ABSTRACT:

A photovoltaic generator can operate in a wide range of output voltage and current, but it can only deliver maximum power for particular values of current and voltage. Indeed, the characteristic I (V) of the generator depends on the solar illumination and the temperature.

These climatic variations cause the maximum power point to fluctuate. Because of this fluctuation, there is often interposed between the generator and the receiver one or more controlled static converters making it possible to pursue the point of maximum power. These commands are known as MPPT (Maximum Power Point Tracking) associated with the chopper, which ensures the coupling between the PV generator and the receiver by forcing the first to deliver its maximum power. In this work, we studied the modeling and simulation of the electrical functioning of a photovoltaic system, and vaguely its adaptation by an MPPT command "disturbance and observation and RNA" and ensuring the pursuit of the maximum power supplied by the PV generator. .

ملخص:

يمكن أن يعمل المولد الكهروضوئي في نطاق واسع من الجهد والتيار ، ولكن يمكنه فقط توفير الطاقة القصوى لقيم معينة من التيار والجهد. في الواقع، تعتمد خاصية تيار(توتر) للمولد على الإضاءة الشمسية ودرجة الحرارة. هذه التغيرات المناخية تتسبب في تقلب نقطة الطاقة القصوى. بسبب هذا التذبذب ، غالبًا ما يتم التداخل بين المولد ومستقبل محول الثابت أو أكثر والمتحكم فيها مما يتيح إمكانية متابعة نقطة الطاقة القصوى. تُعرف هذه الأوامر باسم تتبع الحد الأقصى لنقطة الطاقة المرتبط بالفرامة ، والذي يضمن الاقتران بين المولد الكهروضوئي وجهاز الاستقبال من خلال إجبار الأول على توصيل أقصى طاقته.

في هذا العمل ، درسنا نمذجة ومحاكاة الأداء الكهربائي لنظام كهروضوئي ، وهذا عن طريق ادراج خوارزميات متخصصة في البحث عن النقطة القصوى للطاقة

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
CHAPITRE 1 : Le soleil, l'énergie solaire et des généralités sur le système photovoltaïque	
I.1. Introduction	03
I.2. Historique	03
I.2.1. Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque	03
I.3. Le soleil	04
I.3.1. Le rayonnement solaire	05
I.3.2. Mouvement de la terre autour du soleil	06
I.3.3. Trajectoire apparente du soleil	07
I.4. Orientation et inclinaison d'une surface	08
I.4.1. Azimute α	08
I.4.2. Angle d'inclinaison β	08
I.5. Energie solaire	08
I.6. Système photovoltaïque	09
I.6.1. Production d'énergie.....	10
I.6.2. Contrôle d'énergie	10
I.6.3. La partie utilisation	11
II.7. Les différents types de systèmes photovoltaïques	12
II.7.1. Système PV autonome	12
II.7.2. Système PV non autonome.....	12
II.7.2.1. Les systèmes hybrides	12
II.7.2.2. Système PV connecté directement au réseau	13
II.8. Conclusion.....	14
CHAPITRE 2 : Les cellules photovoltaïques et sa Modélisation	
II.1. Introduction	16
II.2. Cellule photovoltaïque	16
II.3. Technologies des cellules solaires	16
II.3.1. Le silicium monocristallin.....	17
II.3.2. Le silicium poly cristallin.....	17
II.3.3. Silicium amorphe.....	18
II.4. Principe de fonctionnement	19
II.5. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque	20
II.5.1. Modèle simplifié	20
II.5.2. Modèle à une diode	21
II.5.3. Modèle à deux diodes	22
II.6. Paramètres des cellules photovoltaïques	23
II.6.1. Caractéristique courant tension et schéma équivalent	24
II.6.2. Courant de court-circuit, ICC	25
II.6.3. Tension à circuit ouvert, VOC	25

II.6.4. Facteur de forme, ff	26
II.6.5. Rendement de conversion η	26
II.7. Structure des panneaux photovoltaïques	27
II.7.1. Une série de cellules photo voltaïques (sous module ou branche)	27
II.7.2. Module (panneau) photovoltaïque	27
II.7.3. String et champ photovoltaïque	28
II.8. Identification des paramètres des panneaux photovoltaïques	30
II.8.1 Approche globale pour l'identification des paramètres inconnus des cellules et des panneaux photovoltaïques	30
II.8.2 Identification en utilisant le Modèle à une diode	30
II.8.2.1 Méthode de Détermination des cinq paramètres	32
II.8.2.1.1 Le facteur d'idéalité A	32
II.8.2.1.2 Le photo-courant I_{ph}	32
II.8.2.1.3. Le courant de saturation de la diode I_s	33
II.8.2.1.4. La résistances série R_s et la résistance shunt R_{sh}	34
II.9. Conclusion	36

CHAPITRE 3 : Convertisseur statique et MPPT

III.1. Introduction	38
III.2. Convertisseur statique	38
III.3. Convertisseur DC/ (DC (Hacheur)	38
III.3.1. Types d'hacheurs.....	39
III.4. Point de puissance maximale et sa Principe De Commande	45
III.4.1. Les Algorithmes MPPT	47
III.4.1.1. Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)	47
III.4.1.2. Approche Du Courant Constant (Constant Current)	48
III.4.1.3. Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)	49
III.4.1.4. Les réseaux de neurones artificiels	53
III.5. Conclusion	53

CHAPITRE 4 : Simulations et analyses de MPPT neural (P&O et RNA)

IV.1. Introduction	55
IV.2. Historique	55
IV.3. Les réseaux de neurones artificiels	55
IV.3.1. Définition	55
IV.3.2. Le modèle mathématique (neurone artificiel)	56
IV.4. Modélisation	57
IV.4.1. Comportement	57
IV.5. Architecture des réseaux de neurones	59
IV.5.1. Les réseaux non bouclés	59
IV.5.2. Réseaux bouclés	60
IV.6. L'apprentissage des réseaux de neurones	60
IV.6.1. Apprentissage supervisé	61
IV.6.2. Apprentissage non supervisé	61
IV.6.3. L'apprentissage renforcé	62
IV.7. Règles d'apprentissage	62

IV.8. Structure d'interconnexion	63
IV.9. La simulation.....	65
IV.9.1. Schéma bloc d'un générateur PV	66
IV.9.2. Influence de l'éclairement	66
IV.9.3. Influence de la température	67
IV.9.4. Schéma bloc d'un MPPT de P&O	68
IV.9.5. Bloc du système avec MPPT	69
IV.9.6. Simulation de la méthode MPPT.....	69
IV.9.7. PROCEDURE DE CONSTRUCTION D'UN RESEAU DE NEURONES.....	71
IV.9.8.CREATION DU BLOC SIMULINK.....	71
IV.9.9. Résultat de la simulation	72
IV.10. Conclusion	73
CONCLUSION GENERALE.....	75

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source (le Soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain. En fin de vie, le panneau photovoltaïque aura produit 20 à 40 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage.

Les réseaux de neurones, fabriqués de structures cellulaires artificielles, constituent une approche permettant d'aborder sous des angles nouveaux les problèmes de perception, de mémoire, d'apprentissage et de raisonnement. Ils s'avèrent aussi des alternatives très prometteuses pour contourner certaines des limitations des ordinateurs classiques. Grâce à leur traitement parallèle de l'information et à leurs mécanismes inspirés des cellules nerveuses (neurones), ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner des problèmes qualifiés de complexes.

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

- ✓ Le premier chapitre expose des généralités sur le système photovoltaïque.
- ✓ Dans deuxième chapitre, on présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on fait un rappel sur les générateurs PV et leurs performances.
- ✓ Dans le chapitre trois, on étudie le convertisseur DC/DC et ces types avec une démonstration de MPPT ca principe de commande el ces algorithmes
- ✓ Dans Le quatrième chapitre, on présente les réseaux de neurones artificiels et ces structures d'interconnexion avec une simulation par MATLAB-SIMULINK d'un système PV réalisé (générateur photovoltaïque, convertisseur DC/DC et commande MPPT [perturbation et observation, et RNA]).
- ✓ A la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

*Le soleil, l'énergie solaire et des
généralités sur le système
photovoltaïque*

I.1. Introduction :

Les besoins énergétiques ne cessent de croître dans le monde. Malgré son énorme potentiel, l'énergie solaire ne correspond qu'à une partie négligeable de la production et de la consommation d'énergie en Algérie. Pourtant, l'exploitation du rayonnement solaire est compétitive à plusieurs niveaux par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables. Il s'agit de la source d'énergie la plus répandue et la plus accessible sur terre. « Chaque jour, le soleil envoie vers la Terre 10 000 fois la quantité totale d'énergie consommée à l'échelle de la planète ». Aussi, la quantité d'énergie libérée par le soleil pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. [1]

Dans ce premier chapitre, nous aborderons ainsi en premier temps quelques notions indispensables sur le gisement solaire. A savoir les coordonnées équatoriale et terrestre. Nous décrirons ensuite, le rayonnement solaire et sa composition. Puis, l'estimation de l'irradiation solaire sur une surface horizontale et inclinée et les modèles de température ambiante et de jonction et enfin, des généralités sur les systèmes photovoltaïque. [2]

I.2. Historique :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil. [3]

La science qui traite la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Mais ce n'est qu'en 1954 avec la réalisation des premières cellules PV au sélénium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone Laboratoires, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie, les premiers générateurs ont été utilisés en 1958 pour les satellites Vanguard. Au cours des années 1980, la technique PV terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. [4]

I.2.1. Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839: le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875: Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954: trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958: une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973: la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983: la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. [5]

I.3. Le soleil :

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14×10^5 km de diamètre, sa masse est de l'ordre de 2×10^{20} kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments [6] [7].

Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme d'ondes électromagnétiques ; 30% de cette puissance est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation précipitation de l'atmosphère [6], [7].

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau ci-dessous [8] :

Diamètre (km)	14×10^5
Masse (kg)	2×10^{30}
Surface (km^2)	6.09×10^{12}
Volume (km^3)	1.41×10^{18}
Masse volumique moyenne (kg/m^3)	1408
Vitesse (km/s) 217	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5×10^{17}

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil [8].

I.3.1. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K, il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm et se décompose approximativement sur 3 bandes :

- ✓ 9% dans la bande des Ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$).
- ✓ 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm).
- ✓ 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$).

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370 W/m^2 cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les 1000 W/m^2 à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu. [9]

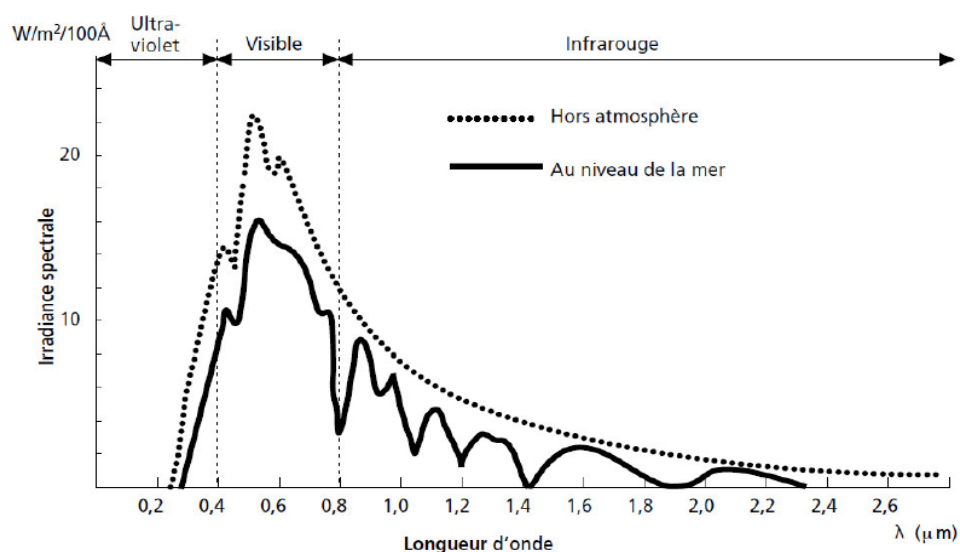


Figure I.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire. [7]

Étant absorbé et diffusé en traversant l'atmosphère, seule une fraction modifiée du rayonnement solaire parvient à la surface de la terre, se composant de 3 différents types de rayonnements :

- ✓ Le rayonnement direct : Rayonnement provenant du soleil en ligne droite du seul disque solaire, il est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages.
- ✓ Le rayonnement diffus : Radiation solaire arrivant sur la surface de la terre après déviation de la lumière par les nuages et les molécules diverses, elle est donc nulle que la nuit.
- ✓ Le rayonnement réfléchi (albédo) : Radiation solaire incidente réfléchi par une surface.
- ✓ Le rayonnement global est donc la somme des 3 rayonnements directs, diffus, et réfléchi comme illustrer dans la figure ci-dessous :

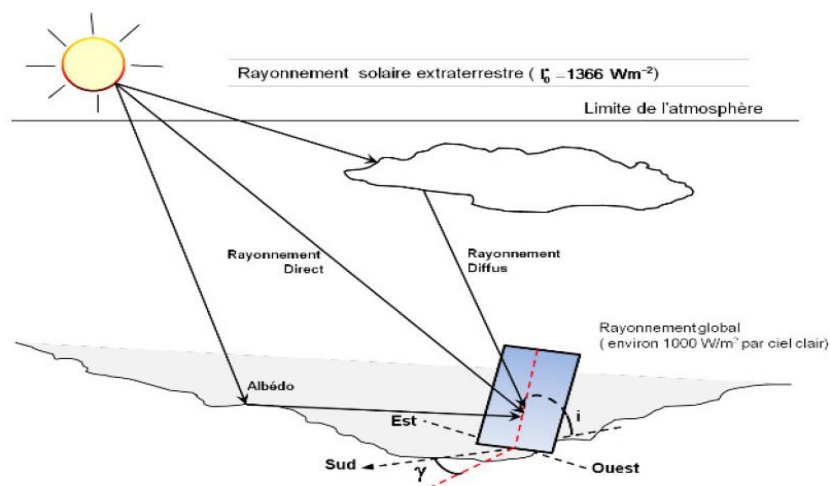


Figure I.2 : Composantes du rayonnement solaire au sol.

1.3.2 Mouvement de la terre autour du soleil :

Le mouvement de la terre autour du soleil s'effectue dans un plan nommé le plan de l'écliptique. L'axe des pôles, autour duquel s'effectue le mouvement de rotation de la Terre, n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique. Le centre de gravité de la terre décrit une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers **Figure 1.3**.

La terre tourne sur elle-même autour de l'axe des pôles et le plan équatorial, perpendiculaire à cet axe. Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Elle tourne autour du soleil en 365 jours 5h 48 mn 40s $\approx 365,25$ jours.

La terre tourne avec une vitesse moyenne 29,77 Km/s (vitesse maximale en hiver 30,27 Km/s et minimale en été 29,77 Km/s). Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons. [10]

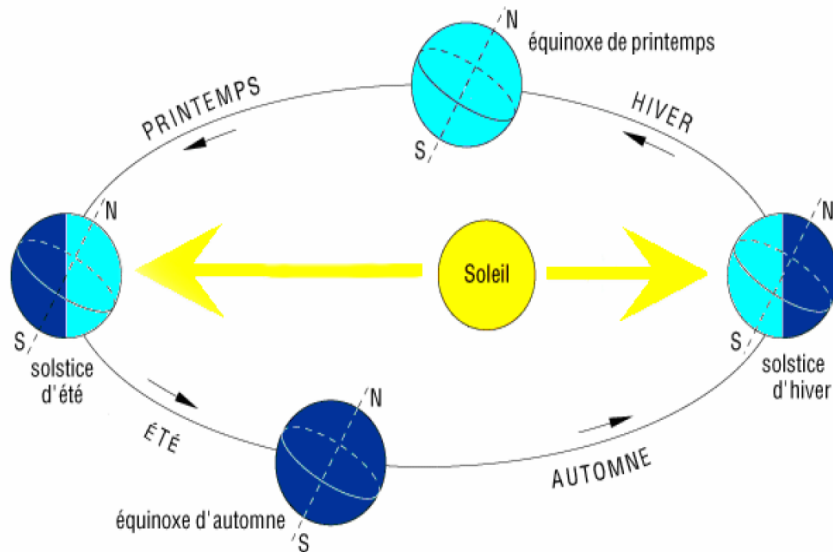


Figure 1.3: Le mouvement de la terre autour du soleil. [11]

1.3.3. Trajectoire apparente du soleil :

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve, voir **Figure.1.4**.

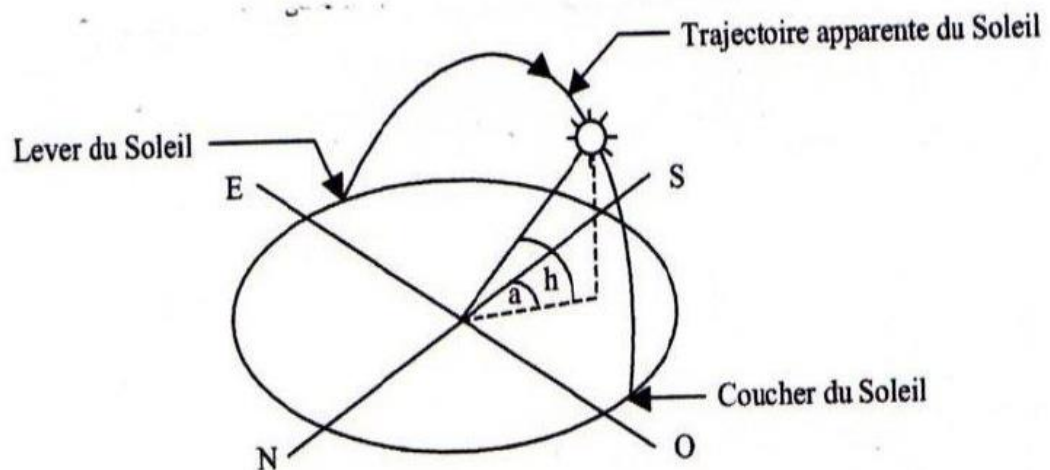


Figure.1.4: Repérage de la position du soleil. [11]

I.4. Orientation et inclinaison d'une surface :

I.4.1. Azimute α :

C'est l'angle que fait la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction du Sud et il désigne l'orientation de la surface de telle sorte que:

$\alpha = -90^\circ$ pour une orientation Est

$\alpha = 0$ pour une orientation Sud

$\alpha = 90^\circ$ pour une orientation Ouest

$\alpha = 180^\circ$ pour une orientation Nord

1.4.2. Angle d'inclinaison β :

C'est l'angle que fait la surface avec le plan horizontal. L'inclinaison de la surface est désignée par la variable b , choisie de telle sorte que :

$\beta = 0$ pour une surface horizontale

$\beta = 90^\circ$ pour un plan vertical

$\beta = 180^\circ$ pour un plan horizontal tourné vers le bas.

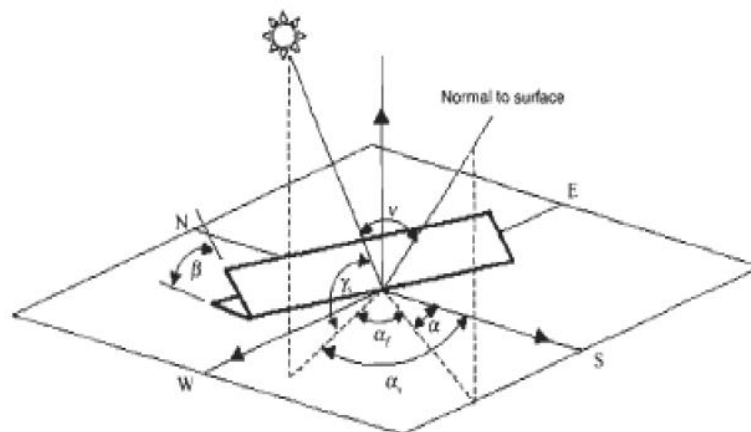


Figure.1.5: Orientation et inclinaison d'une surface. [12]

I.5. Énergie solaire :

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367 W/m^2 . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 . [13]

En résumé, la constante solaire est le flux énergétique reçu par une surface unité. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue en 1980 est: $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$. I_0 est variable autour de l'année puisque la distance terre soleil est elle-même variable.

(Trajectoire elliptique). La correction terre soleil est donnée par:

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(j - 2)\right) \quad (\text{I.1})$$

Où :

j : Angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu.

La constante solaire corrigée est:

$$I = I_0 C_{t-s} \quad (\text{I.2})$$

I.6. Système photovoltaïque :

Tout système photovoltaïque peut se composer, comme il est montré sur la **Figure.I.6**, en trois parties :

- ✓ Une partie de production d'énergie.
- ✓ Une partie de contrôle de cette énergie.
- ✓ Une partie d'utilisation de l'énergie produite.

On peut ajouter encore des moyens d'entretien du système photovoltaïque comme outil de nettoyage des modules [14]

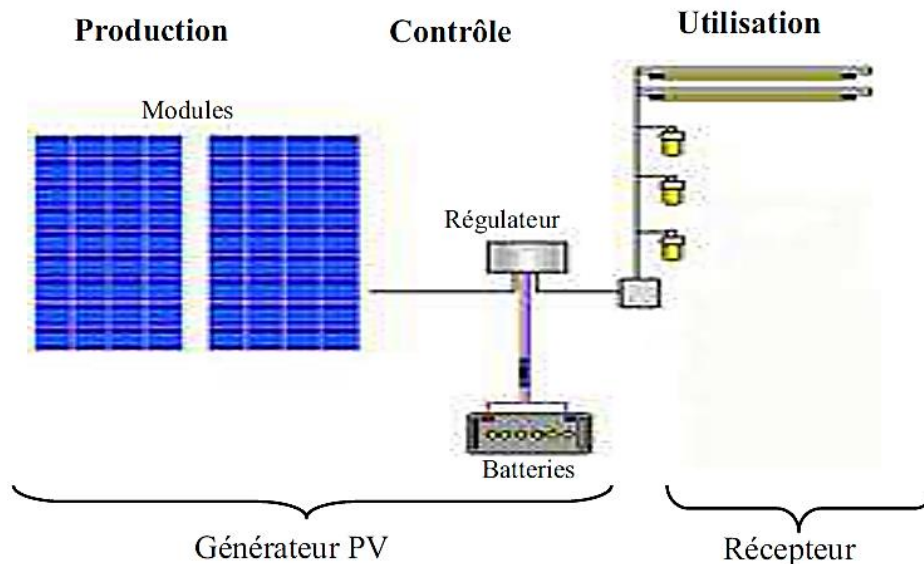


Figure.I.6: Eléments d'un système photovoltaïque.

I.6.1 Production d'énergie

La partie production d'énergie est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules, qui réalisent la conversion d'énergie solaire en électricité d'après la cellule photovoltaïque qui se comporte comme une source de courant lorsque conduit par un flux de rayonnement solaire du soleil. Le champ électrique existe en permanence dans les carrefours ou inhomogénéités dans les cellules solaires qui peuvent être qualifiées de silicium des dispositifs à semi-jonction. Une jonction de dispositif semi-conducteur silicium contient une jonction P-N similaire à celle d'une diode, mais dans une cellule solaire, il existe une plus grande surface. [14]

I.6.2 Contrôle d'énergie : [15]

La partie contrôle d'énergie est composée d'un système de stockage avec ou sans régulation, plus les câbles de connexion.

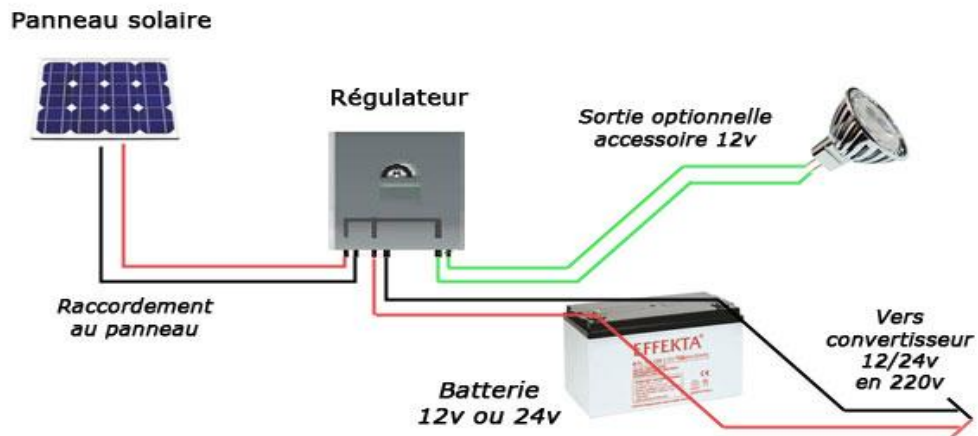


Figure.I.7: Conversion d'énergie solaire. [16]

I.6.3 La partie utilisation :

La partie utilisation se compose de plusieurs récepteurs (utilisateurs), (exemple : éclairage, pompage, ...).

Il existe plusieurs utilisations des panneaux photovoltaïques, certaines actuelles, et d'autres en projet. Celles d'aujourd'hui sont principalement utilisées pour alimenter les satellites en énergie, dans le cadre domestique ou pour des industries, des petits gadgets de tous les jours, ainsi que des centrales solaires, et pour quelques transports. Les projets actuels concernent surtout les transports, et des projets de grandes centrales solaires, là où le Soleil est abondant.

Les projets de l'utilisation photovoltaïque dans le futur sont la généralisation de son emploi dans les foyers. Pour cela, il faut réduire les coûts de production pour permettre à d'autres acheteurs de pouvoir se munir de panneaux. Les scientifiques recherchent aussi des moyens pour améliorer le rendement des panneaux. Ceci permettra qu'avec la dimension aujourd'hui exploitée les foyers en auront une plus grande utilité. Ils pourront donc facilement devenir autonomes en production d'énergie électrique. L'étendue aussi de l'utilisation des panneaux photovoltaïques dans le domaine de l'infrastructure publique n'est pas négligeable. En effet, les parkings se munissent d'abris en panneaux photovoltaïques ce qui permet la production de l'électricité pour une zone. L'utilisation des cellules photovoltaïques dans les gadgets et les outils du quotidien comme les chargeurs se développe. Les toits des bâtiments publics se voient vêtus de ces panneaux qui produisent l'électricité aux bâtiments. [17]

II.7. Les différents types de systèmes photovoltaïques :

II.7.1. Système PV autonome :

Autonomes ou « stand-alone », ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge. Aussi, l'autonomie du système est assurée par un système de stockage d'énergie. [18] En général ces installations comprennent quatre éléments :

- Un ou plusieurs modules PV.
- Le système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries.
- L'onduleur.

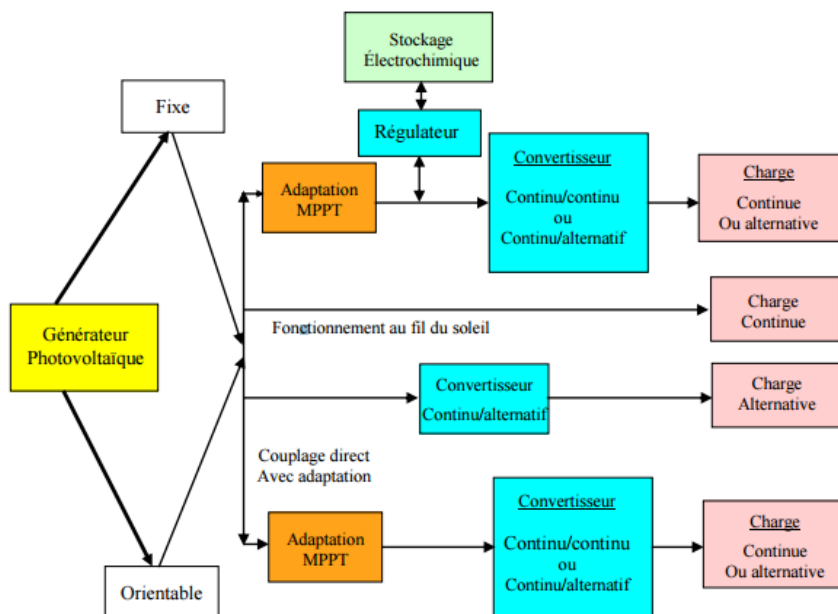


Figure.I.8: Installation photovoltaïque autonome.

II.7.2. Système PV non autonome :

II.7.2.1. Les systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs

complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif. [19] [20]

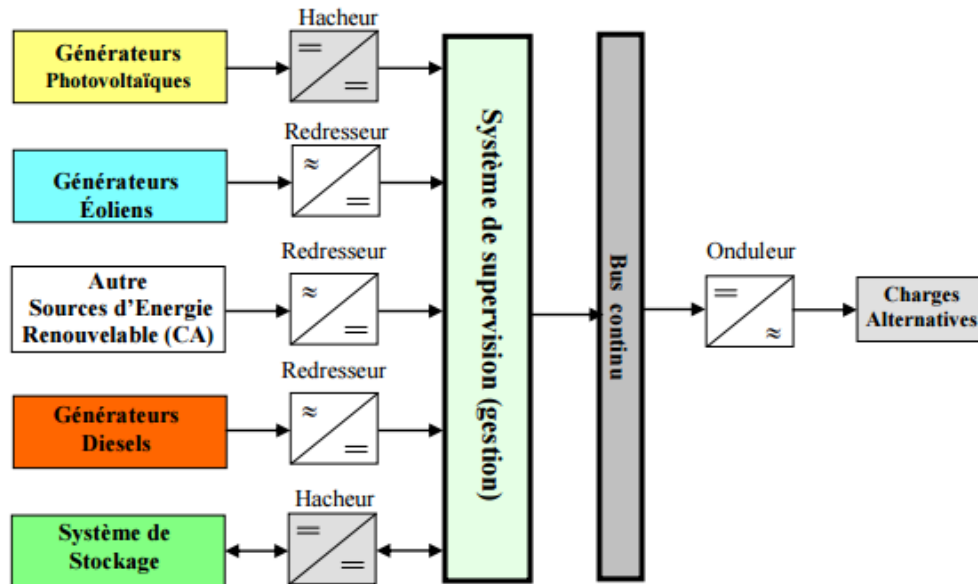


Figure.I.9: Configuration du système hybride à bus continu.

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu (voir **Figure.I.9**). Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative.

II.7.2.2. Système PV connecté directement au réseau :

Les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau permettent la décentralisation de la production sur ce réseau électrique **Figure.I.10**. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation et non pas seulement par de grandes centrales nucléaires, thermiques ou

hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes PV connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution en ayant besoin d'acheminer uniquement son excédent d'énergie vers les zones en manque de production.

Cette mise en commun des productions permet aussi un sous-dimensionnement des équipements de production complémentaire. Ces transferts éliminent la nécessité d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau. [21]

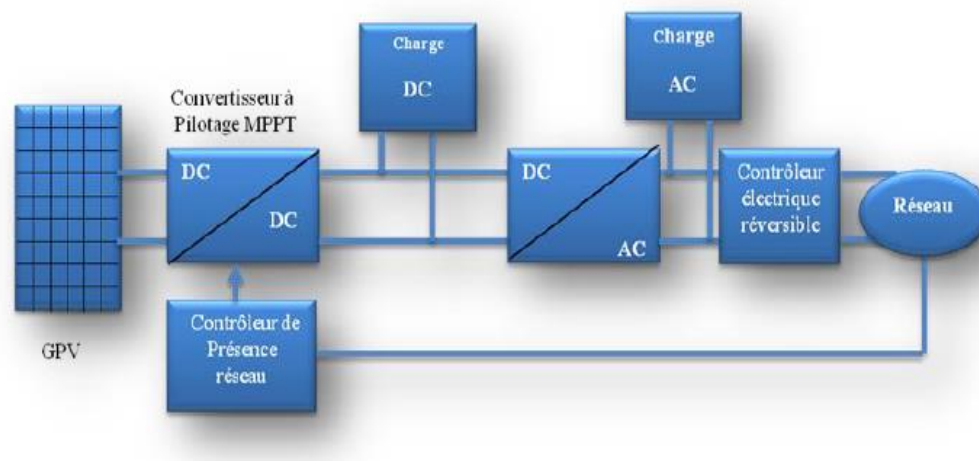


Figure.I.10: Installation photovoltaïque couplée au réseau

II.8. Conclusion

L'énergie électrique peut être générée gratuitement d'une source d'énergie inépuisable (renouvelable) grâce au générateur photovoltaïque à travers les cellules solaires. Dans ce chapitre, nous avons défini le système photovoltaïque, les paramètres de ce système et le principe de fonctionnement de ce système.

CHAPITRE 2

*Les cellules photovoltaïques et sa
Modélisation*

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous nous intéressons plus particulièrement à la modélisation et l'identification des cellules photovoltaïques (PV). Nous présentons tout d'abord des généralités sur l'énergie et les systèmes photovoltaïques tout en décrivant les différents éléments constituant ces systèmes allant des cellules jusqu'à l'injection au réseau. Aussi, nous présentons les différents modèles de la cellule photovoltaïque en rappelant leurs différentes associations en vue de l'obtention d'une puissance suffisante. [22]

II.2. Cellule photovoltaïque :

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte deux couches Sublimes d'un semi-conducteur. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. [23]

II.3. Technologies des cellules solaires :

Les technologies les plus utilisées sont en silicium car le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzéux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes (wafers). Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (P, As, Sb ou B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion d'éléments dopants (bore, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (wafers), ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière. La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de deux ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication. Les cellules monocristallines et poly cristallines sont fragiles. Elles sont donc placées entre deux plaques de verre (encapsulation) afin de former un module. [24]

II.3.1 Le silicium monocristallin:

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement, il est à la base des panneaux «terrestres» les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium. [25]



Figure II.1:Module en silicium monocristallin.

a) Avantages :

- Rendement électrique des panneaux: 15 % STC.
- Puissance des panneaux: 5 à 150 Wc.
- Gamme d'éclairement: 100 à 1000 W/m².
- Usage: tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat...).

b) Inconvénients :

- Première génération de photopiles.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

II.3.2 Le silicium poly cristallin:

Cousin germain du précédent (composés de multi cristaux), il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairagements modérés, et également moins onéreux. [25]



Figure II.2: Cellule en silicium poly cristallin.

a) Avantage :

- Rendement électrique des panneaux: 12-14 % STC.
- Puissance des panneaux: 5 à 150 Wc.
- Gamme d'éclairement: 200 à 1000 W/m².
- Usage identique à celui du silicium cristallin.

b) Inconvénient :

- Rendement faible sous un faible éclairement.

II.3.3. Silicium amorphe:

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe. [25]



Figure II.3: Cellule silicium amorphe.

- Rendement des panneaux: 5-7 % STC (jusqu'à 9 % pour les «multi-jonctions »).
- Puissance des photopiles intérieures: 0 à 1 Wc.
- Gamme d'éclairement: 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m² (en extérieur).
- Usage: électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...).
- Électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi transparentes.

II.4. Principe de fonctionnement :

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivants **Figure II.4**:

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

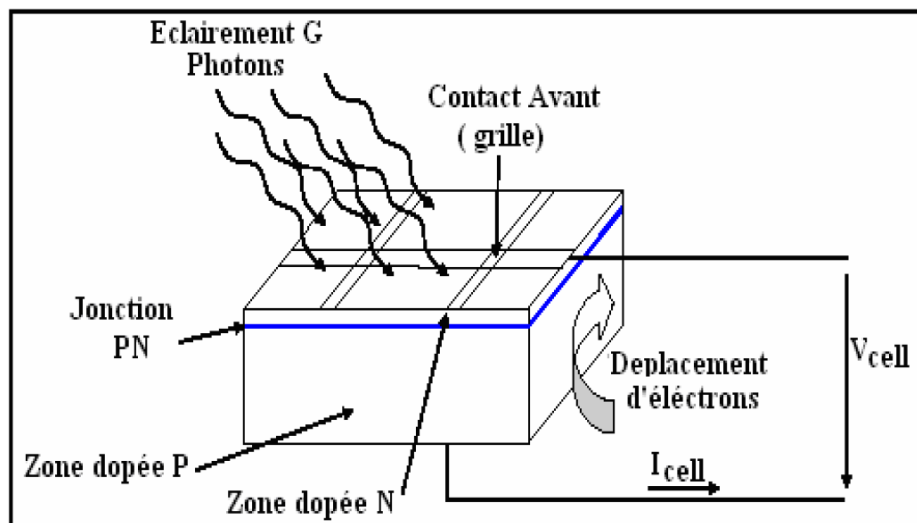


Figure II.4: fonctionnement d'une cellule PV. [26]

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier le pair électron / trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la **Figure II.5**:

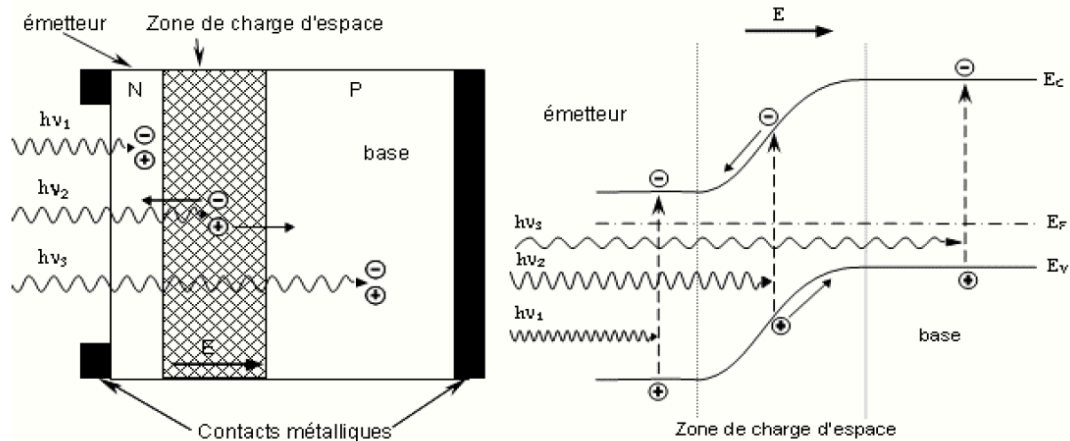


Figure II.5: Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photons porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion ;
- Dans la zone de charge d'espace, le pair électron / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura une photo courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner une photo courant résultant I_{ph} . Il est proportionnel à l'intensité lumineuse. [27]

II.5. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque :

Il existe plusieurs modèles électriques caractérisant le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, et ils ont comme facteur commun la considération de la cellule PV comme générateur du courant idéal. Généralement on a trois modèles différents selon la modélisation électrique des comportements physiques de la cellule.

II.5.1. Modèle simplifié :

La cellule sera modélisée par une source du courant I_{ph} en parallèle avec une diode et pour optimiser la modélisation de quelques phénomènes au niveau de la cellule, le modèle

comme le montre la **Figure II.6** contient une résistance série R_s qui modélise les pertes ohmiques [28] [29].

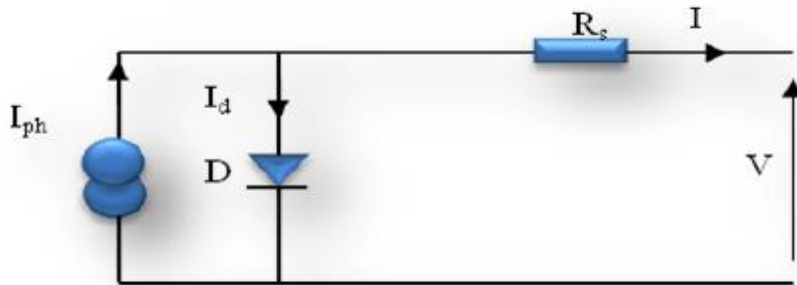


Figure II.6: Modèle simplifié d'une cellule PV.

Ce modèle électrique modélise la cellule en un générateur du courant idéal, selon la loi des nœuds, le courant résultant I est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- I_{ph} : Constant pour un ensoleillement donné.

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{A V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.7})$$

Avec :

- A : Facteur d'idéalité de la diode.

Le courant fourni par ce modèle est donc donné par :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{A V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.8})$$

Le modèle de l'expression **II.8** est nommé aussi « modèle à quatre paramètres » (I_{ph}, I_s, R_s, A). [30]

II.5.2. Modèle à une diode :

C'est un modèle semblable au modèle simplifié. Comme le montre la **Figure II.7**, une source de courant et une diode en parallèle avec une résistance en série, mais dans ce modèle une résistance shunt R_{sh} est ajoutée ayant une grande influence sur le courant généré par le modèle et qui est proche du courant d'une cellule réelle. Physiquement, la résistance shunt sert à la modélisation des pertes autour de la jonction dues aux impuretés et sur les coins de la cellule [31] [32].

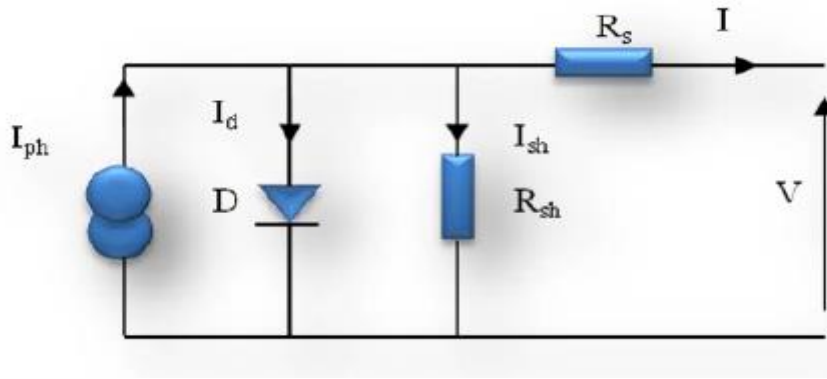


Figure II.7: Modèle à une diode d'une cellule PV.

Ce modèle est le plus utilisé dans de nombreuses recherches grâce à son comportement qui est plus proche à une cellule PV par rapport au modèle à résistance série (simplifié) d'une part, et sa simplicité pour le calcul mathématique par rapport au modèle à deux diodes (décrit ci-après) d'une autre part.

Le courant généré par ce modèle est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$I_{sh} = \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.10})$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{A V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.11})$$

Le modèle de l'expression **II.11** est nommé aussi « modèle implicite avec cinq paramètres » (I_{ph} , I_s , R_s , R_{sh} , A) [33].

II.5.3. 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 tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, comme les modèles précédents, ce modèle est complété par les deux résistances série R_s et parallèle R_{sh} comme le montre le schéma électrique équivalent de la **Figure II.8**. [34] [35]

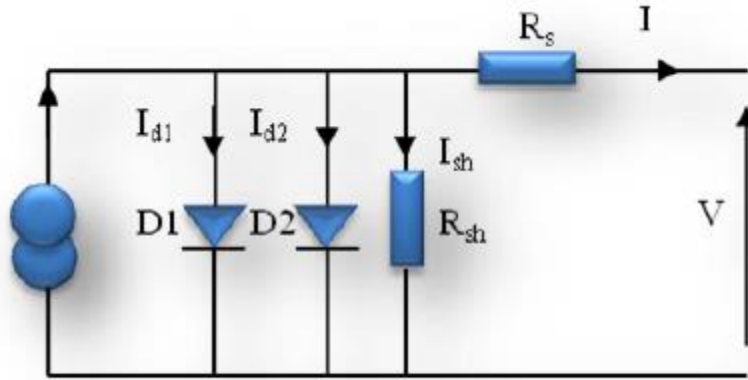


Figure II.8: Modèle à deux diodes d'une cellule PV.

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

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

Donc :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{A_1 V_t}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{A_2 V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- A1 et A2 : Facteurs d'idéalité des diodes D1 et D2 respectivement.
- Is1 et Is2 : Courants de saturation des diodes D1 et D2 respectivement.

II.6. Paramètres des cellules photovoltaïques :

Une cellule solaire est constituée par une jonction PN, lorsque la surface libre est éclairée les photons d'énergies supérieures à la largeur de la bande interdite E_g peuvent exciter des paires électron-trou dans les régions quasi neutres P et N **Figure II.9.** [36] Les électrons et les trous créés respectivement dans les régions P et N diffusent et atteignent la zone de charge d'espace, accélérer par le champ électrique interne, ils traversent la zone de transition.

La région N reçoit des électrons et se charge négativement ; la région P accepte des trous et se charge positivement. Si on relie les côtés de la jonction à une charge R_c , un courant I la parcourt et une différence de potentiel apparaît:

$$I = I_{ph} - I_d(V) \quad (\text{II.1})$$

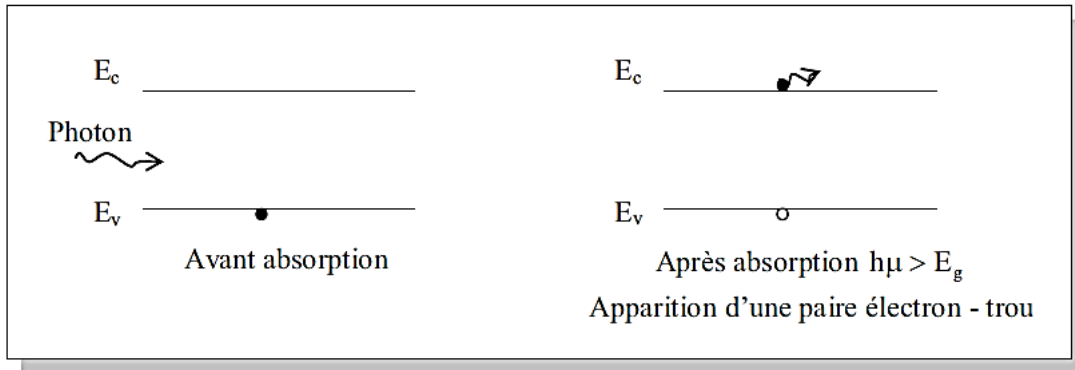


Figure II.9: création de pair électron trou par photo excitation

Avec :

- I_{ph} : La photo courante.
- $I_d(V)$: Courant d'obscurité de la diode.

Cette relation entre les trois grandeurs, I , I_{ph} et $I_d(V)$ représente la caractéristique courant tension idéale permettant de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires :

- Le courant de court-circuit I_{cc} ;
- La tension en circuit ouvert V_{oc} ;
- Le facteur de forme FF ;
- Le rendement de conversion d'énergie η . [36]

II.6.1. Caractéristique courant tension et schéma équivalent :

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point P_m où la puissance se trouve être maximale. Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation

d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)). [37]

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la **Figure II.10**. Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle.

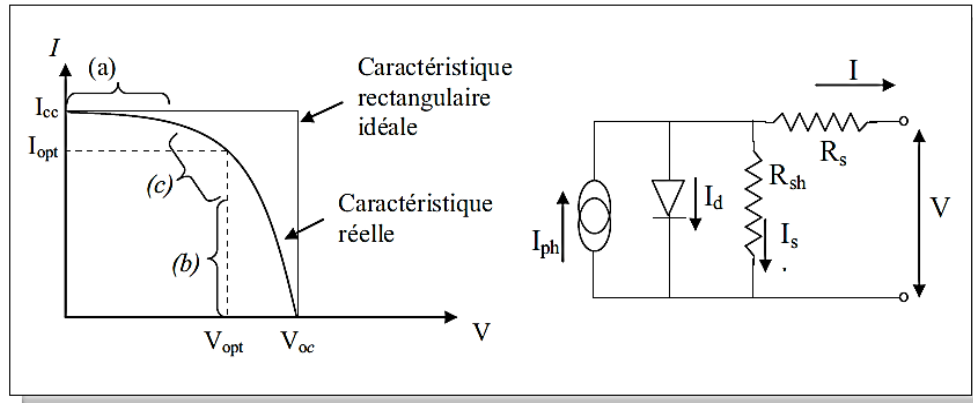


Figure II.10: Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc} ,
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement. [38]

II.6.2. Courant de court-circuit, ICC :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la Mobilité des porteurs et de la température.

II.6.3. Tension à circuit ouvert, VOC :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{co} = \frac{KT}{e} \ln\left(\frac{I_{oc}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{II.2})$$

II.6.4. Facteur de forme, ff :

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

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

$$ff = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (II.3)$$

La puissance maximale délivrée à la charge est présentée par le rectangle hachuré

$$P_m = V_m \times I_m \quad (II.4)$$

II.6.5. Rendement de conversion η :

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

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{oc}}{P_{in}} \quad (II.5)$$

Avec :

- P : Puissance incidente = $P_{solaire} = 100 \text{ W/cm}^2$
- La densité de puissance incidente égale à $\frac{P_{in}}{A}$
- A : section de la cellule.

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

II.7. 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 II.11** 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. [39]

II.7.1. Une série de cellules photo voltaïques (sous module ou branche) :

On dénomme sous module ou bien branche l'ensemble de cellules en séries connectées en parallèle avec une diode de protection **Figure II.11**, [39].

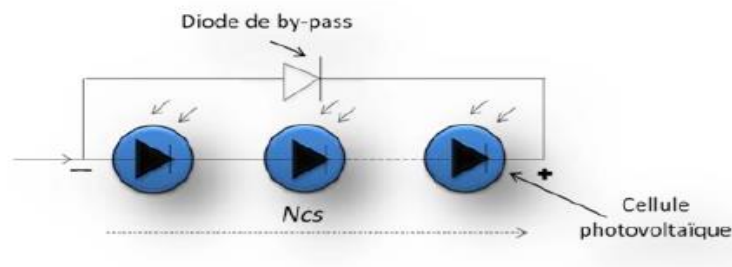


Figure II.11: Sous module constitué de N_{cs} cellules connectées en séries

Avec : N_{cs} nombre de cellules en séries.

II.7.2. Module (panneau) photovoltaïque :

Le module est constitué d'un groupe de sous modules connectés en série pour avoir une tension plus ou moins élevée [40] [41],

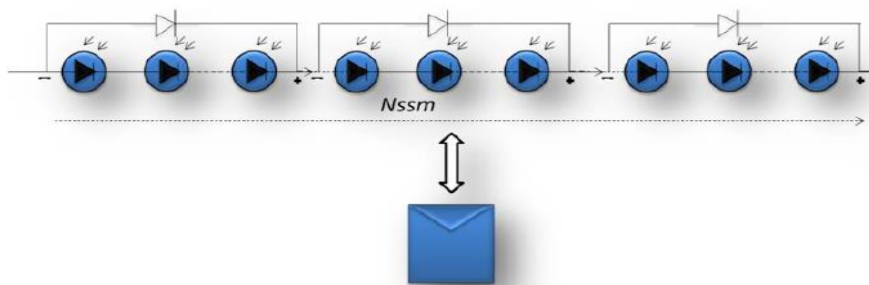


Figure II.112: Module constitué de N_{ssm} sous modules montés en séries.

Avec : N_{ssm} : Le nombre total des sous-modules connectés en série.

II.7.3. 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 II.13**.

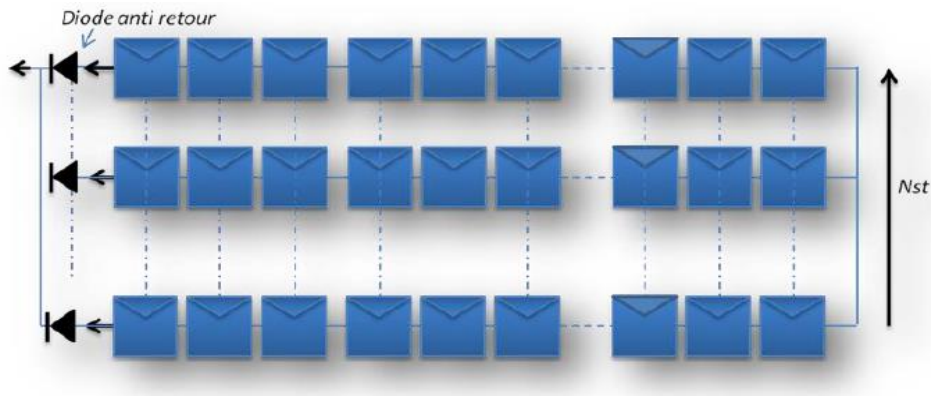


Figure II.13: champ photovoltaïque composé de N_{st} strings en parallèle

Avec :

N_{st} : le nombre de strings branchés en parallèle.

La figure suivante représente les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ pour l'association en série de N_{ps} panneaux, avec N_{ps} est le nombre de modules connectés en séries.

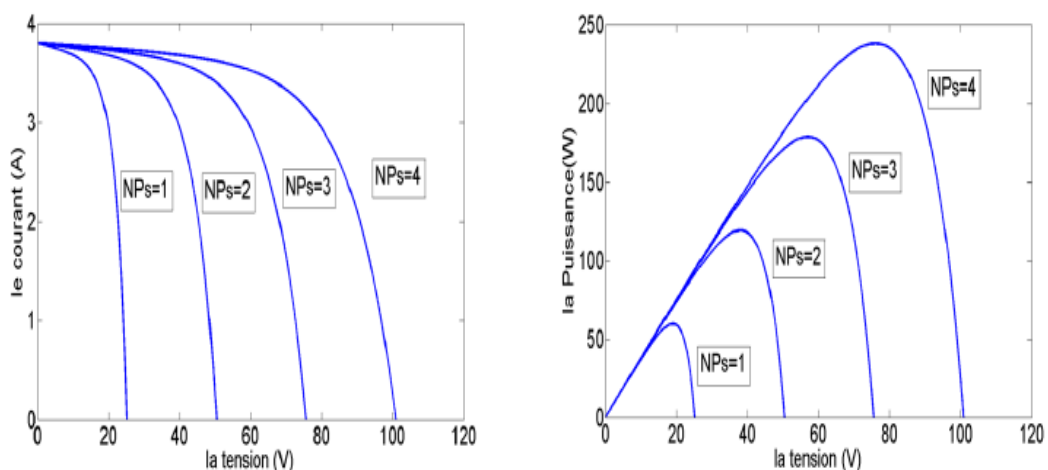


Figure II.14: Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ pour N_S module(s) en série.

La **Figure II.15** représente les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ relatives à l'association en parallèle de NP_p panneaux.

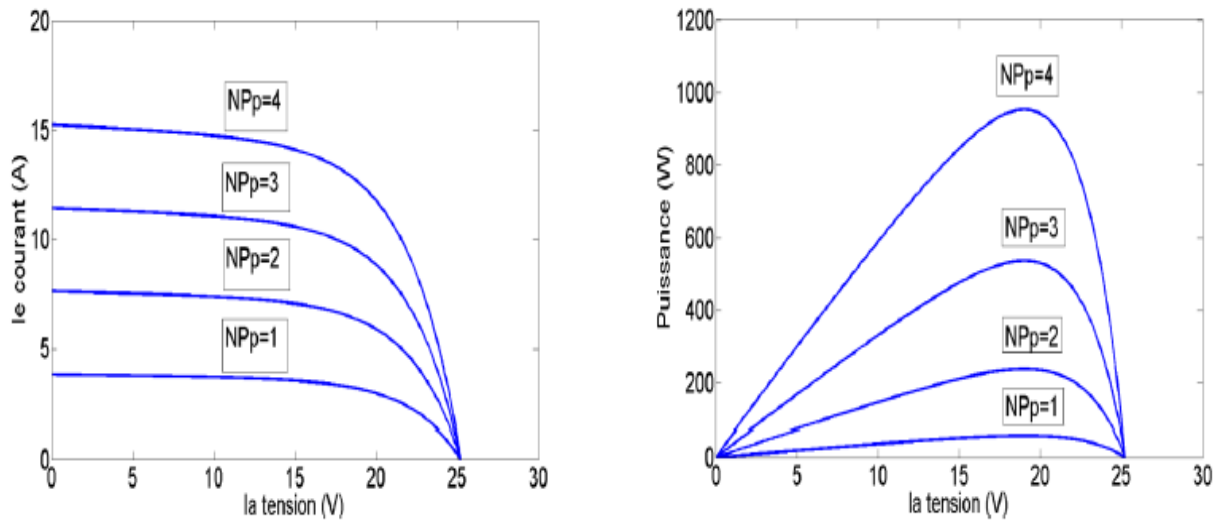


Figure II.15: Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ pour NS module(s) en série.

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est parfois obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire série-parallèle, la **Figure II.16** montre les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ pour un branchement mixte :

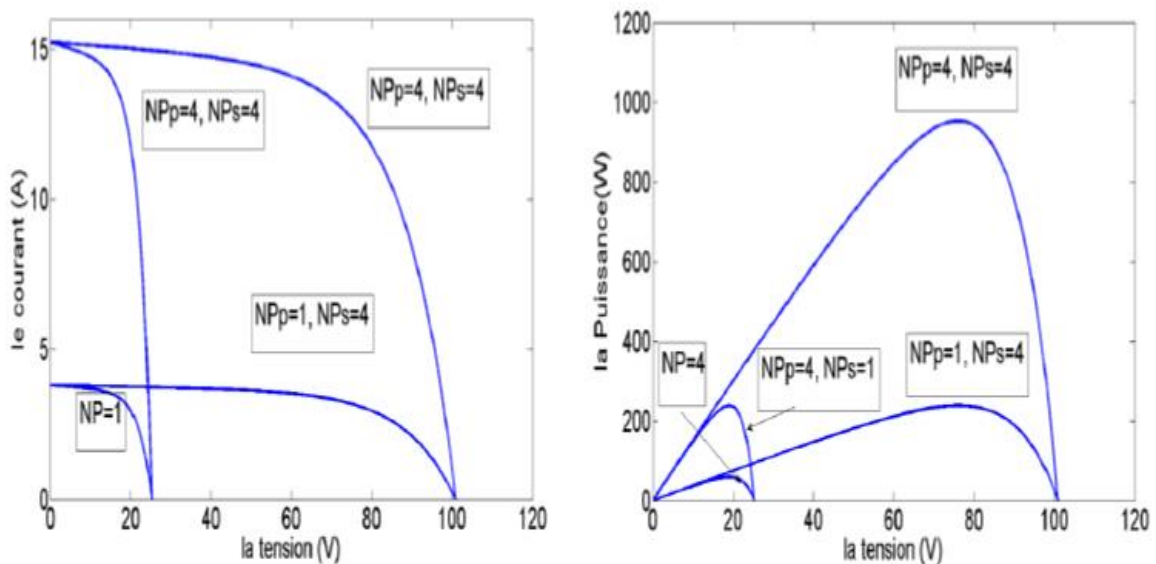


Figure II.16: Caractéristique IV et PV d'une connexion mixte série et parallèle Avec : NP_p le nombre de panneaux en parallèles.

II.8. Identification des paramètres des panneaux photovoltaïques :

Il est bien connu que l'étape d'identification des paramètres de n'importe quel système est une étape déterminante aussi bien pour la simulation que pour la pratique. Donc comme tout système, une connaissance précise des paramètres des modules photovoltaïques est indispensable pour la conception, le contrôle de qualité et pour des estimations de leurs performances. Ces paramètres sont souvent déterminés à partir de données expérimentales sous un éclairage et une température bien contrôlés.

II.8.1 Approche globale pour l'identification des paramètres inconnus des cellules et des panneaux photovoltaïques :

L'objectif principal de cette méthode, est de trouver les cinq paramètres de l'équation non linéaire I(V). Compte tenu des valeurs données par toutes les fiches techniques fournies par les constructeurs des modules PV.

La méthode permet de trouver à la fois, la meilleure solution de l'équation I(V) pour le modèle photovoltaïque à une diode, y compris l'effet des résistances, série et parallèle, et garantir que la puissance maximale du modèle PV correspond à la puissance maximale du modèle réel.

Cette méthode permet d'obtenir les cinq paramètres de l'équation non linéaire I(V) à partir de données obtenues dans les fiches techniques (datasheet) des modules PV. La modélisation des cellules, des panneaux, ou des réseaux composés de plusieurs panneaux photovoltaïques élémentaires peut être faite avec les mêmes procédures citées précédemment.

II.8.2 Identification en utilisant le Modèle à une diode :

Prenons le modèle mathématique à une diode donné par la **Figure II.17**.

D'après l'équation (II.6) on a :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V+R_s I}{A.Vt}\right) - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.14})$$

Cette équation exige la connaissance des cinq paramètres (I_{ph} , I_s , R_s , R_{sh} , A).

Les cellules connectées en parallèle augmentent le courant et les cellules connectées en série fournissent de plus grandes tensions de sortie. Si le panneau PV est composé de

connexions des cellules PV en parallèle N_p , le photo-courant et le courant de saturation peuvent être exprimés par : $I_{ph}=I_{ph\ cellule} \cdot N_p$, $I_s=I_{s\ cellule} \cdot N_p$.

Cette équation est à l'origine de la courbe I(V) montré dans la **Figure II.17**, où trois points remarquables sont mis en évidence : court-circuit ($0, I_{sc}$), P_{max} (V_{mp} , I_{mp}) et circuit-ouvert ($V_{oc}, 0$) [42].

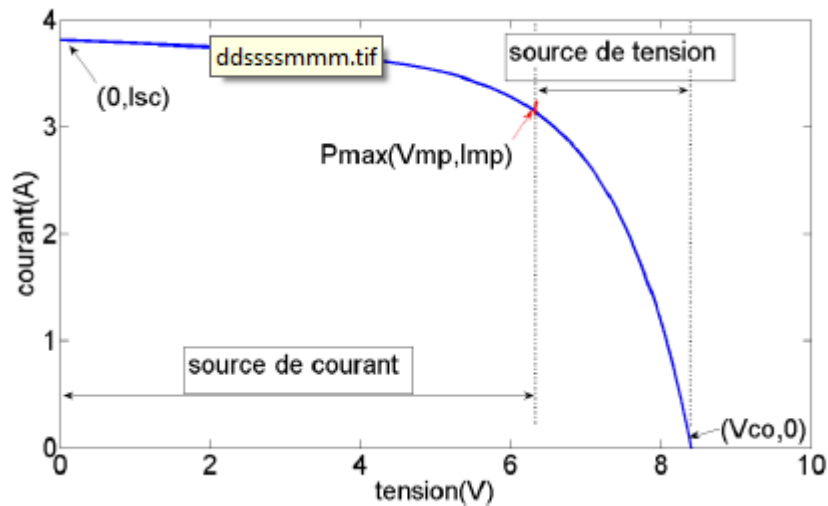


Figure II.17: Caractéristique I-V d'un module PV, et les trois points remarquables : court-circuit ($0, I_{sc}$), P_{max} (V_{mp} , I_{mp}) et circuit-ouvert ($V_{oc}, 0$).

Concernant le modèle d'une cellule PV, certains auteurs ont proposé des modèles plus exacts qui présentent une meilleure précision et servent à différentes fins. Par exemple, dans [43] [44] une diode supplémentaire est utilisée pour représenter l'effet de la recombinaison des porteurs. Un modèle à trois diodes est proposé dans [45] pour comprendre l'influence des effets qui ne sont pas pris en compte par les modèles précédents. Pour sa simplicité, le modèle à une diode est étudié dans cette partie. Ce modèle offre un bon compromis entre simplicité et précision. [46] De plus il a été utilisé par plusieurs auteurs dans des travaux antérieurs, parfois avec des simplifications telles qu'il est montré plus haut, mais toujours avec la structure de base composée d'une source de courant et une diode parallèle.

Grâce à la simplicité du modèle à une seule diode, avec la méthode d'ajustement des paramètres et les améliorations proposées dans cette méthode, ce modèle est parfait pour les concepteurs en électronique de puissance qui sont à la recherche d'un modèle simple et efficace pour la simulation des modules photovoltaïques avec des convertisseurs de puissance...

II.8.2.1 Méthode de Détermination des cinq paramètres :

Toutes les fiches techniques des modules PV apportent essentiellement les informations suivantes :

- ✓ La tension en circuit-ouvert, Voc nominal : Voc,n ;
- ✓ Le courant de court-circuit, Isc nominal : Isc,n ;
- ✓ La tension au point Pmax : Vmp ;
- ✓ Le courant au point Pmax : Imp ;
- ✓ Le coefficient, tension de circuit-ouvert / température : KV ;
- ✓ Le coefficient, courant de court-circuit / température : KI ;
- ✓ La puissance de sortie de crête expérimentale maximale : Pmax,e.

Ces informations sont toujours données en référence aux conditions nominales (STC) de la température et du rayonnement solaire (1000 W/m² et 25 °C).

Certains fabricants fournissent des courbes I(V) pour plusieurs conditions de températures et du rayonnement. Ces courbes facilitent l'ajustement et la validation de l'équation mathématique souhaitée. Fondamentalement, ce sont toutes les informations qu'on peut obtenir à partir de la fiche technique du module PV.

II.8.2.1.1 Le facteur d'idéalité A :

Ce paramètre est appelé aussi paramètre d'ajustement. De nombreux auteurs discutent des façons pour estimer la valeur correcte de cette constante [47] [48]. Habituellement, $1 \leq A \leq 1,5$ et le choix dépend d'autres paramètres du modèle PV. Certaines valeurs de A se trouvent dans [49] basées sur des analyses empiriques. Comme il est donné dans [50], il existe différentes opinions sur la meilleure façon de choisir A. Parce que A exprime le degré d'idéalité de la diode, et il est tout à fait empirique, une valeur initiale de A peut être choisie pour ajuster le modèle PV. Cette valeur de A peut être modifiée par la suite afin d'améliorer le modèle, si nécessaire. Cette constante affecte la courbure de la courbe I(V) et peut ramener une légère amélioration de la précision du modèle.

II.8.2.1.2 Le photo-courant I_{ph} :

L'hypothèse $I_{ph} \cong I_{sc}$ est généralement utilisée dans la modélisation des modules PV, parce que dans les modules pratiques la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée. Le photo-courant généré par la cellule PV à partir de la lumière dépend linéairement

de la radiation solaire et est également influencé par la température selon l'équation suivante [51] :

$$I_{ph} = (I_{ph,n} + KI \cdot dT) \frac{G}{G_n} \quad (\text{II.15})$$

Où : A partir de l'équation (II. 4) on peut écrire :

$$I_{ph,n} = I_{sc,n} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) \quad (\text{II.16})$$

Et aussi :

$$dT = T - T_n \quad (\text{II.17})$$

Avec :

- $I_{ph,n}$: Photo-courant dans les conditions nominales.
- G : Insolation (radiation solaire en W/m²).
- G_n : Insolation nominale (1000 W/m²).
- T : Température de la cellule PV en Kelvin.
- T_n : Température nominale (25 °C).

En plus, la température de la cellule PV est calculée à partir de la température ambiante T_a par la relation suivante [52] :

$$T_c = T_a + \left(0.2 \frac{G}{G_n}\right) \quad (\text{II.18})$$

Avec :

- T_a : température ambiante en °C.
- T_c : température de la cellule PV en °C.

Donc :

$$T = T_c + 273.15 \quad (\text{II.19})$$

II.8.2.1.3. Le courant de saturation de la diode I_s :

Le courant de saturation I_s , est donné par l'équation suivante :

$$I_s = \frac{I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_{th}}\right) - 1} \quad (\text{II.20})$$

- V_{th} : Tension thermique en j/k°.

II.8.2.1.4. La résistances série R_s et la résistance shunt R_{sh} :

Pour déterminer R_s et R_{sh} , quelques auteurs ont proposé plusieurs façons pour déterminer mathématiquement ces résistances. D'autres proposent différentes R_s dans un processus itératif, par l'incrémention de R_s jusqu'à ce que la courbe I-V s'intègre visuellement avec les données expérimentales et ensuite varier R_{sh} de la même façon. Il s'agit d'une méthode d'ajustement assez pauvre et imprécise.

Bien qu'il puisse être utile d'avoir une formule mathématique pour déterminer ces paramètres inconnus, toute expression de R_s et R_{sh} reposera toujours sur des données expérimentales. Mais principalement R_s et R_{sh} ne peuvent pas être réglées séparément si un bon modèle I-V est souhaité.

Dans cette méthode, on peut utiliser une approche pour régler R_s et R_{sh} basée sur le fait qu'il existe une seule paire (R_s , R_{sh}) garantit qu'au point (V_{mp} , I_{mp}) de la courbe I(V) :

$$P_{\max,m} = P_{\max,e} = V_{mp} I_{mp} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

- $P_{\max,m}$: De modèle.
- $P_{\max,e}$: Expérimentale.

C'est-à-dire la puissance maximale calculée par le modèle **II.21**, ($P_{\max,m}$) est égale à la puissance expérimentale maximale de la fiche technique ($P_{\max,e}$) au point P_{\max} .

Les méthodes de modélisation classiques de la littérature prennent soin de la courbe I(V), mais oublient que la courbe P(V) (puissance en fonction de la tension) doit correspondre également aux données expérimentales. Des travaux comme [53] et [54] donnant de l'importance à la nécessité de faire correspondre la courbe de puissance mais avec des modèles différents ou simplifiés. Par exemple, dans [53], la résistance série du modèle PV est négligée.

En utilisant l'équation **II.21**, l'équation liant R_s et R_{sh} peut être obtenue:

$$P_{\max,m} = V_{mp} \left(I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{V_{th}}\right) - 1 \right) - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_{sh}} \right) = P_{\max,e} \quad (\text{II.22})$$

Donc on obtient :

$$R_{sh} = \frac{V_{mp}(V_{mp} + R_s I_{mp})}{V_{mp} I_{ph} - V_{mp} I_s \exp\left(\frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{V_{th}}\right) + V_{mp} I_s - P_{\max,e}} \quad (\text{II.23})$$

L'équation **II.23** signifie que pour toute valeur de R_s lui correspond une valeur de R_{sh} qui permet à la courbe de la caractéristique $I(V)$ d'atteindre le point expérimentale (V_{mp}, I_{mp}) .

L'étape suivante est de déterminer la valeur de R_s et celle de R_{sh} de sorte que le point max de la courbe $P(V)$, trouvé mathématiquement, coïncide avec le point de la puissance maximale expérimentale au point (V_{mp}, I_{mp}) .

Cela exige plusieurs itérations jusqu'à ce que : $P_{\max,m} = P_{\max,e}$

Dans le processus itératif, R_s doit être incrémentée lentement à partir de $R_s = 0$. Ajustant la courbe $P(V)$ pour correspondre aux données expérimentales, il faut trouver la courbe pour plusieurs valeurs de R_s et R_{sh} . En fait, tracer la courbe n'est pas nécessaire, car seule la valeur de la puissance maximale est requise.

L'équation **II.1** n'a pas de solution directe. Cette équation non linéaire doit être résolue par une méthode numérique (exemple : Newton-Raphson), ce qui n'impose aucune difficulté.

Les points de la courbe $I(V)$ sont facilement obtenus par la résolution numérique de l'équation : $g(V, I) = I - f(V, I) = 0$, Pour un ensemble de valeurs V et l'obtention de l'ensemble de points I . L'obtention des points $P(V)$ est simple.

L'équation **II.16** utilise les résistances R_s et R_{sh} pour déterminer I_{ph} qui n'égal pas pratiquement I_{sc} . Les valeurs de R_s et R_{sh} sont initialement inconnues, mais tant que la solution de l'algorithme est raffinée le long des itérations successives des valeurs de R_s et R_{sh} ont tendance à la meilleure solution et par conséquent, l'équation **II.16** devient valide et détermine effectivement la photo courant I_{ph} en prenant en compte l'influence des résistances série et parallèle du module PV.

Une estimation initiale pour R_s et R_{sh} est nécessaire avant le démarrage du processus itératif. La valeur initiale de R_s peut être nulle. La valeur initiale de R_{sh} peut être donnée par :

$$R_{sh,min} = \frac{V_{mp}}{I_{sc,n} - I_{mp}} - \frac{V_{oc,n} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (\text{II.24})$$

Où :

$$R_{s,min} = \frac{V_{oc,n} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (\text{II.25})$$

II.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné les définitions et les mécanismes de base du principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ainsi, nous avons présenté les modèles électriques d'une cellule PV.

Les schémas de modèles présentés sont basés sur une analogie électrique définie à partir d'une source de lumière (photons), une diode (cellule ou panneau PV) et des résistances (pertes), cette analogie est une représentation parfaite pour une modélisation et identification d'une cellule et d'un panneau photovoltaïque.

CHAPITRE 3

Simulations et analyses de MPDT

(PDO et RNA)

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons définir le convertisseur statique en générale et spécialement convertisseur DC/ (DC (Hacheur) et ces types et leur principe de fonctionnement.

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

III.2. Convertisseur statique :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors etc...Les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques. [55]

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques:

- ✓ Continu (DC)/Continu(DC) (Hacheur).
- ✓ Continu (DC) / Alternatif(AC) (Onduleur).
- ✓ Alternatif(AC) /Alternatif (AC) (Gradateur).
- ✓ Alternatif(AC) /Continu (DC) (Redresseur).

III.3. Convertisseur DC/ (DC (Hacheur) :

Ce sont des convertisseurs continu-continu, permettant la variation d'une tension continue pour l'adapter à la care ou pour varier la vitesse d'un moteur à courant continu ou pour régler le degré de luminosité d'une lampe. Le découpage se fait à une fréquence élevée. C'est l'analogie, pour les sources de tensions continues, du gradateur utilisé en régime alternatif.

Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (ou abaisseur ou Buck). Dans le cas contraire, il est dit survolteur (ou éleveur ou Boost). Il existe des hacheurs capables de travailler des deux manières (Boost-Buck). [56]

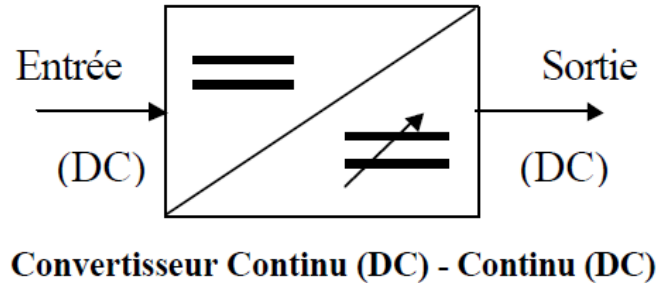


Figure III.1 : Schéma de principe du hacheur.

III.3.1. Types d'hacheurs:

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui sont alimentés par des sources de tension continue et produisent aux bornes d'une charge une tension unidirectionnelle de valeur moyenne réglable. On peut imaginer un grand nombre de dispositifs électroniques réalisant cette fonction. [57]

On se contentera ici d'indiquer les types de montages les plus utilisés ainsi que quelques applications. Ces montages utiliseront des interrupteurs unidirectionnels statiques qui seront représentés par le symbole de la **Figure III.2**

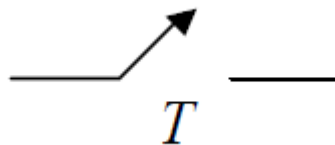


Figure III.2 : Symbole de l'interrupteur unidirectionnel. T est la période du signal de commande.

1.1. Hacheur série (abaisseur de tension) :

Le schéma de principe du hacheur série est donné à la **Figure III.3**. On considère l'interrupteur I et la diode D parfaits. La charge est par exemple un moteur à courant continu.

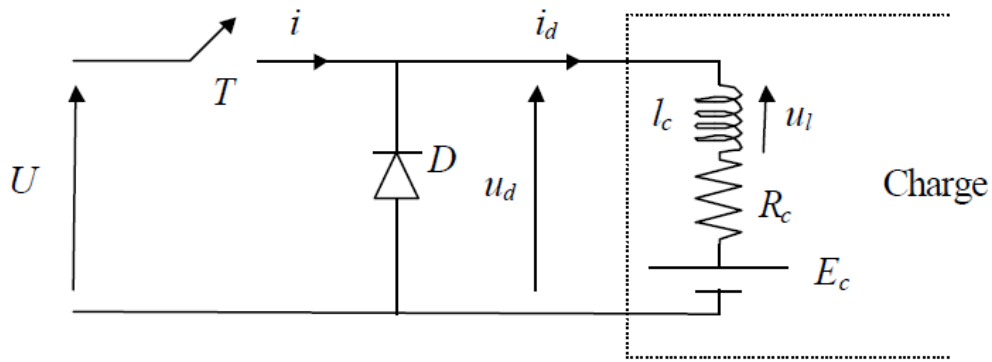


Figure III.3 : Hacheur série.

Le fonctionnement du convertisseur se déduit de l'analyse du comportement de l'interrupteur I .

- ✓ A $t=0$, I est enclenché (passant) pendant un temps αT , alors : $u_d(t) = U$
- ✓ Entre αT et T ($\alpha T < t < T$), I est ouvert.

On a alors : $i=0$ et le courant i_d circule à travers la diode D (diode de « roue libre »).

Donc : $u_d(t) = 0$ tant que la diode D conduit, soit tant que le courant $i_d(t)$ est non nul.

- ✓ Lorsque $i_d(t)$ s'annule, la diode D se bloque et : $u_d(t) = E_c$

On distingue donc deux types de fonctionnement selon que le courant $i_d(t)$ est interrompu ou non. [57]

1.1.1. Fonctionnement à courant ininterrompu (Figure III.4)

La valeur moyenne de $u_d(t)$ vaut : $U_{d0} = \int_0^{\alpha T} U \cdot dt = \alpha U$

Remarque : la FEM (E_c) de la charge et la valeur moyenne I_{d0} du courant $i_d(t)$ sont liés par :

$$U_{d0} = E_c + R_c I_{d0} \quad (\text{III.1})$$

- ✓ Si la charge est une batterie (E_c est imposé par la charge), cette relation définit I_{d0} .
- ✓ Si la charge est un moteur à courant continu, cette relation fixe E_c (et donc la vitesse du moteur car $E_c = K\Omega$ (Ω en rad/s)), sachant que I_{d0} dépend du moment du couple du moteur M ($M = KI$ si l'on néglige les pertes mécaniques et les pertes par hystérésis et courants de Foucault).

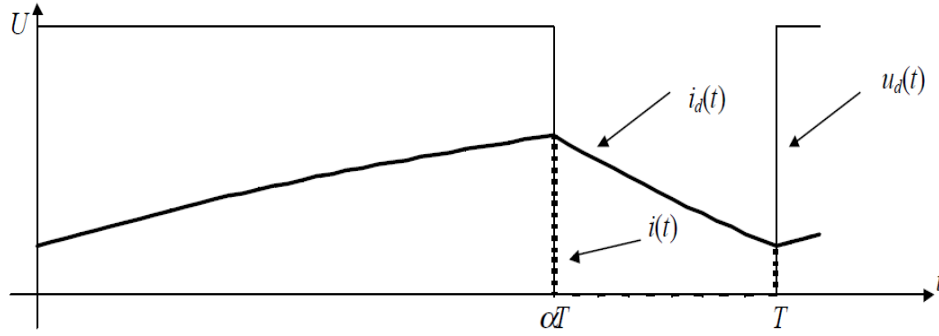


Figure III.4 : Hacheur série. Fonctionnement à courant ininterrompu dans la charge.

1.1.2. Fonctionnement à courant dans la charge interrompu (Figure III.5)

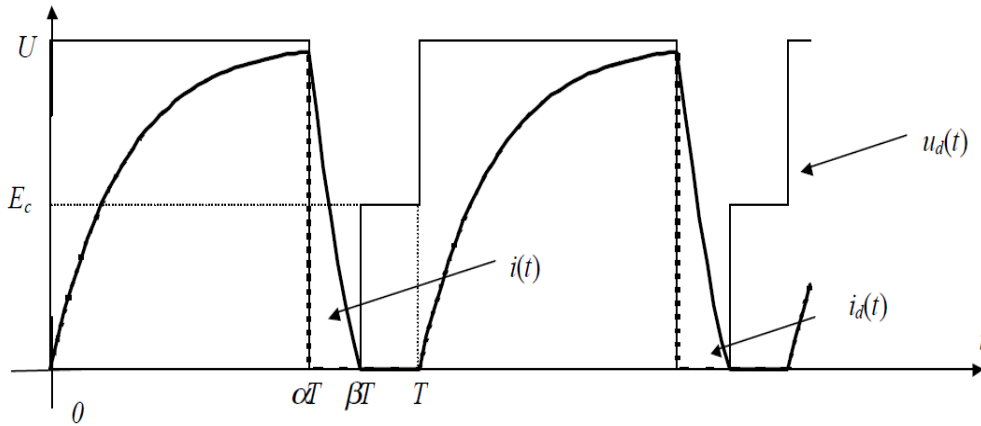


Figure III.5 : Hacheur série. Fonctionnement à courant interrompu dans la charge.

Lorsque l'interrupteur s'ouvre, à $t = \alpha T$, le courant $i_d(t)$ décroît. Si la constante de temps $\tau = \frac{l_c}{R_c}$ est suffisamment faible devant T , ce courant s'annule avant que l'interrupteur ne redevienne passant à $t=T$.

En considérant (voir Figure III.6) que le courant $i_d(t)$ est nul entre les instants βT et T , la valeur moyenne de $u_d(t)$ vaut alors :

$$U_{d0} = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{\alpha T} U \cdot dt + \int_{\beta T}^T E_c \cdot dt \right\} = \alpha U + (1 - \beta) E_c \tag{III.2}$$

Dans les deux types de fonctionnement, on voit que la valeur moyenne U_{d0} de la tension disponible aux bornes de la charge est fonction du rapport cyclique α . On réglera la valeur de U_{d0} en modifiant le rapport cyclique α :

- ✓ Soit en modifiant la durée de conduction de l'interrupteur I sans modifier la période T de commande (Modulation de Largeur d'Impulsion, MLI).

- ✓ Soit en modifiant la fréquence de commande ($f = \frac{1}{T}$) sans modifier la durée de conduction de l'interrupteur.

La solution 1. Est de loin la plus utilisée en pratique car elle permet un filtrage aisé de la tension $u_d(t)$ par un filtre passe-bas comme le décrit la **Figure III.6**. Ce filtre passe-bas permet d'éliminer les harmoniques élevés de $u_d(t)$ l'étude de ce circuit sera effectuée en TP.

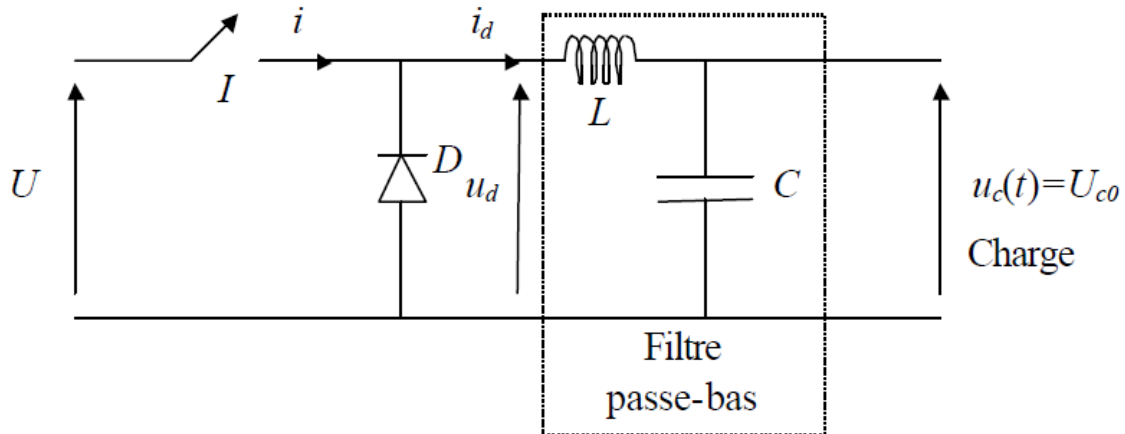


Figure III.6 : Hacheur série avec filtre passe-bas en sortie permettant d'obtenir une tension $u_c(t)$ quasi constante et égale à U_{c0}

1.2. Hacheur parallèle (élevateur de tension)

Le hacheur parallèle est aussi appelé hacheur survolteur. Ce montage permet de fournir une tension moyenne $U_d > U$ à partir d'une source de tension continue $U < U_{d0}$. Le montage étudié est donné à la **Figure III.7**.

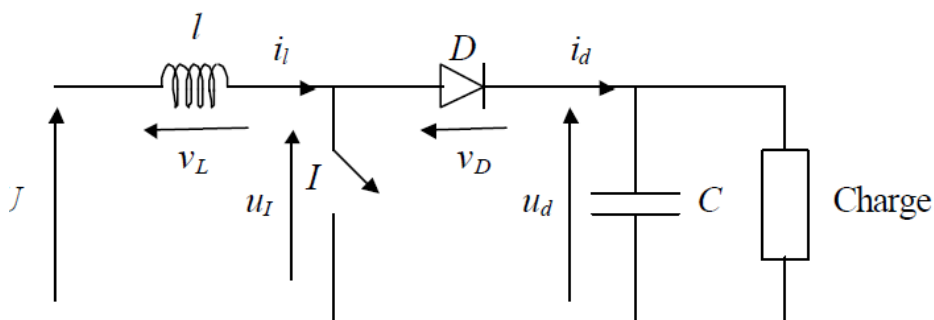


Figure III.7 : Hacheur parallèle.

Les applications principales du hacheur parallèle sont les alimentations de puissance régulées et le freinage par récupération des moteurs à courant continu. On distingue 2 phases de fonctionnement:

- ✓ Lorsque l'interrupteur I est fermé, la diode est polarisée en inverse ($v_D = -u_d$); la charge est donc isolée de la source. La source fournit de l'énergie à l'inductance l .
- ✓ Lorsque l'interrupteur I est ouvert, l'étage de sortie (C+ charge) reçoit de l'énergie de la source et de l'inductance l .

Pour l'analyse en régime permanent présentée ici, le condensateur de filtrage C a une valeur de capacité suffisamment élevée pour que l'on puisse considérer la tension disponible en sortie constante :

$$u_d(t) = U_{d0} \quad (\text{III.3})$$

Enfin on distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance l ($i_l(t)$) est interrompu ou non. [57]

1.2.1. Fonctionnement à courant de source ininterrompu

- ✓ Pour $0 < t < \alpha T$, l'interrupteur I est fermé et l'intensité $i_l(t)$ croît linéairement :

$$U = l \frac{di_l}{dt} \quad \text{Donc : } i_l(t) = \frac{1}{l} \int U \cdot dt = \frac{U}{l} t + i_l(0) \quad (\text{III.4})$$

On a : $u_l = 0$; $i_d = 0$; $v_l = U$

- ✓ Pour $\alpha t < t < T$, l'interrupteur I est ouvert, l'inductance l se démagnétise et le courant $i_l(t)$ décroît :

$$U = l \frac{di_l}{dt} + U_{d0} \quad \text{Donc : } i_l(t) = \frac{U - U_{d0}}{l} (t - \alpha T) + i_l(\alpha t) \quad (\text{III.5})$$

Avec : $i_l(\alpha t) = \frac{U}{l} \alpha T + i_l(0)$

Et : $U < U_{d0}$ car $i_l(t)$ doit décroître.

On a : $u_l = U_{d0}$; $i_d = i_l$; $v_l = U - U_{d0}$

On déduit les caractéristiques de la **Figure III.8**.

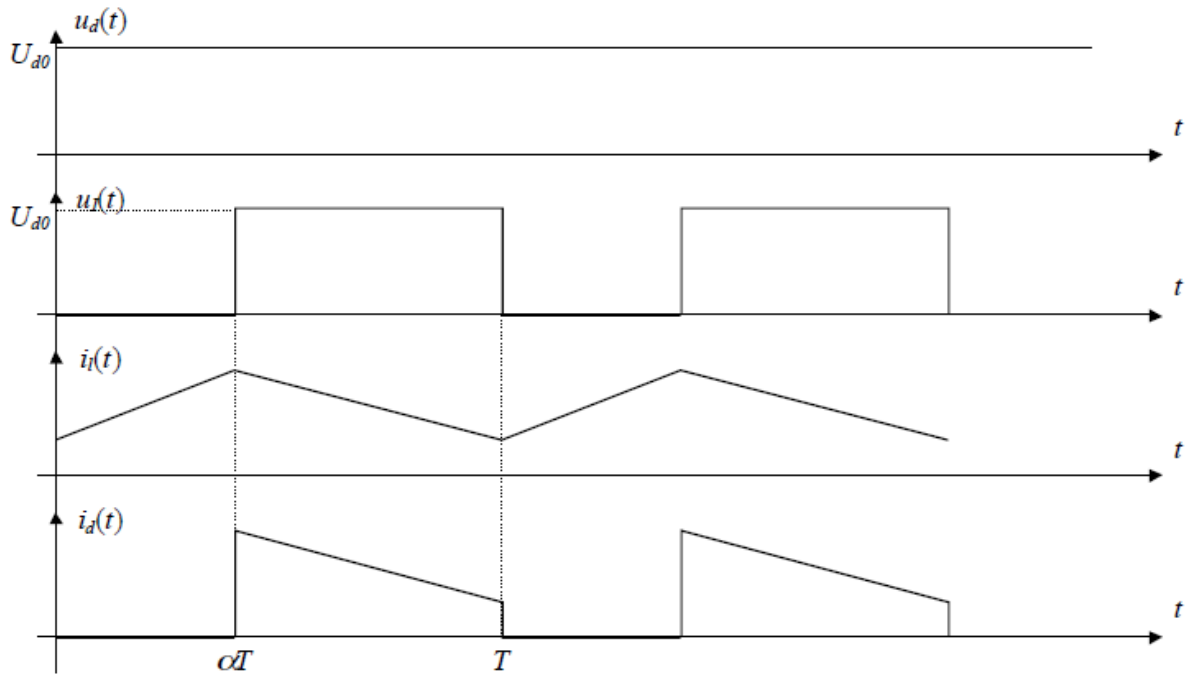


Figure III.8 : Hacheur parallèle. Fonctionnement à courant de source ininterrompu.

On détermine facilement la relation liant U à U_{d0} .

On a : $U = v_L + u_i$

Donc en moyenne sur une période, compte tenu du fait que la valeur de la moyenne de $v_i(t)$ est nulle, on obtient : [58]

$$U = U_{I0} = (1 - \alpha) \frac{T}{T} U_{d0} = (1 - \alpha) U_{d0} \quad (\text{III.6})$$

Donc : $U_{d0} = \frac{1}{1 - \alpha}$

En considérant un circuit sans pertes, la puissance moyenne délivrée par la source est égale à la puissance moyenne disponible en sortie :

$$P_{source} = U \cdot I_{l0} = U_{d0} \cdot I_{d0} \quad \left(\begin{array}{l} I_{l0} = \text{moyenne de } i_l(t) \\ I_{d0} = \text{moyenne de } i_d(t) \end{array} \right) \quad (\text{III.7})$$

Et donc : $\frac{I_{d0}}{I_{l0}} = 1 - \alpha$ Cette relation permet de dimensionner les conducteurs à utiliser.

Remarque: on obtient très simplement la relation liant U_{d0} à U en considérant $V_{l0} = 0$

$$\text{En effet : } V_{l0} = \frac{U \cdot \alpha T + (U - U_{d0})((1 - \alpha)T)}{T} = 0$$

$$\text{D'où directement : } \frac{U_{d0}}{U} = \frac{1}{1 - \alpha}$$

1.2.2. Limite entre le fonctionnement interrompu et le fonctionnement ininterrompu :

La forme des courant et tension $i_l(t)$ et $v_l(t)$ est donnée sur la **Figure III.9**.

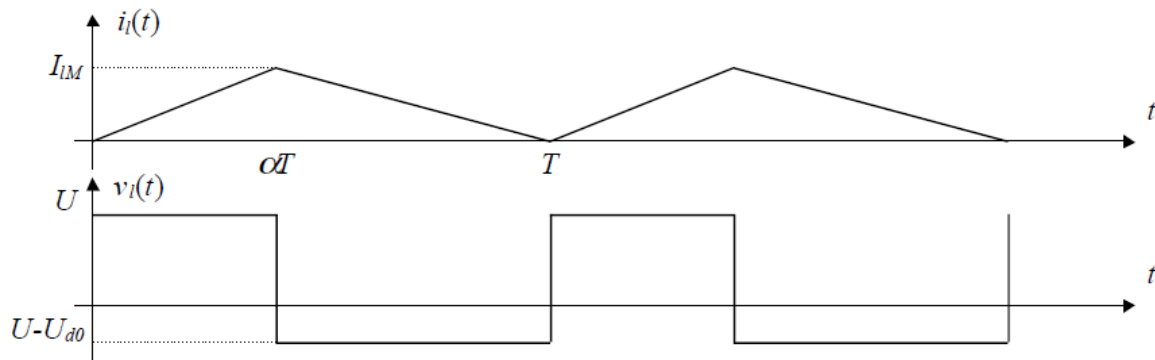


Figure III.9 : Hacheur parallèle. Limite du fonctionnement à courant de source ininterrompu.

La valeur moyenne du courant $i_l(t)$ s'écrit:

$$I_{l0} = \frac{I_{lM}}{2} = \frac{1}{2} \frac{U}{l} \alpha T \quad (\text{Car } i_l(0) = 0) \quad (\text{III.8})$$

Donc la valeur moyenne du courant disponible en sortie I_{d0} s'écrit :

$$I_{d0} = (1 - \alpha) I_{l0} = \frac{1}{2} \frac{U}{l} \alpha T (1 - \alpha) = \frac{1}{2} \frac{U_{d0}}{l} T \alpha (1 - \alpha)^2 \quad (\text{III.9})$$

1.2.3. Fonctionnement à courant de source interrompu :

Ce type de fonctionnement intervient lorsque U_{d0} devient tel que le courant $i_l(t)$ s'annule durant la phase où l'interrupteur est ouvert.

Ce type de fonctionnement étant peu utilisé, il ne sera pas développé dans ce cours. [58]

III.4. Point de puissance maximale et sa Principe De Commande :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la

commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [58]. Il peut être représenté par le schéma de la **Figure III.10**.

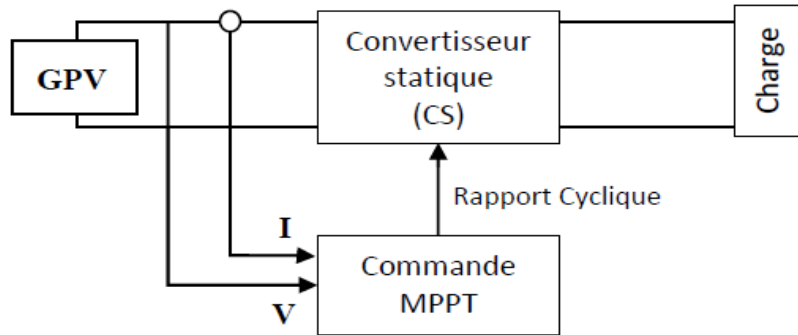


Figure III.10 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [58].

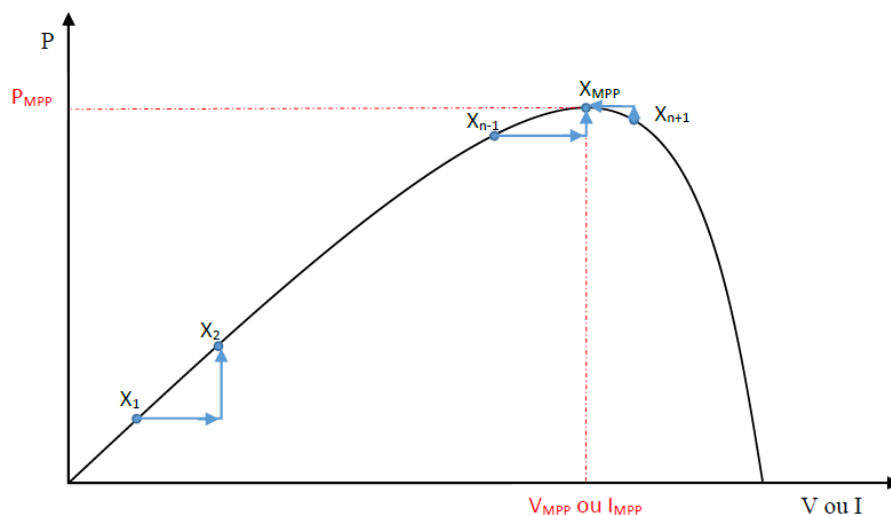


Figure III.11 : Principe de la commande MPPT

III.4.1. Les Algorithmes MPPT :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Nous mentionnons parmi eux les suivants.

III.4.1.1. Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)

La méthode de tension constante également appelée la méthode de circuit ouvert (open circuit voltage) est basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert V_{oc} et la relation linéaire approximative (III.10) liant cette tension avec la tension de point maximal V_{MPP} du GPV [60-61] :

$$V_{MPP} = k_1 \times V_{oc} \quad (\text{III.10})$$

Où k_1 est une constante de proportionnalité. Il est généralement compris entre 0.71 et 0.86. Une fois que k_1 est déterminé, le VMPP peut être calculé à l'aide de l'expression précédente (III.10) avec V_{oc} mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension VMPP est alors prise comme tension de référence. Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle V_{PV} et la tension de référence V_{ref} (V_{MPP}). Le signal d'erreur est traité pour rendre $V = V_{ref}$. (Figure III.12)

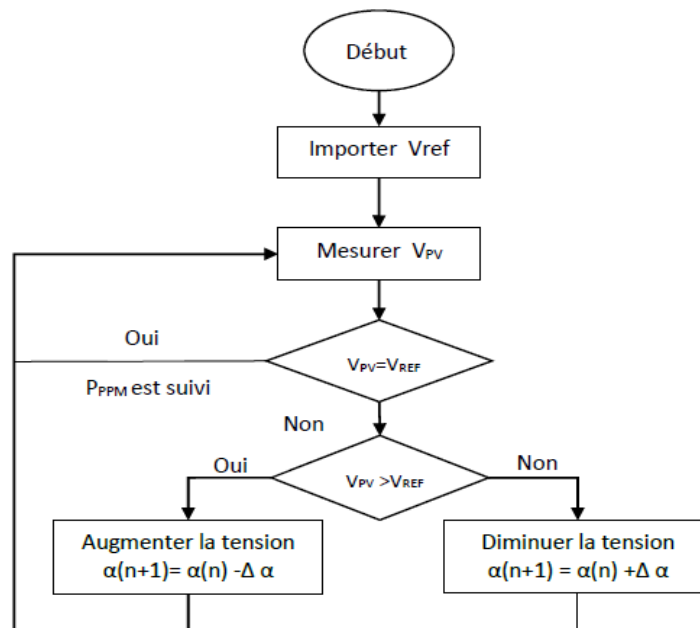


Figure III.12 : Algorithme de la Tension Constante

Cette méthode présente deux avantages : la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations (même infimes) en état stationnaire [60]. Cependant, ces points forts ne peuvent cacher leurs défauts, à cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année Aussi, le MPP n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension Voc. et ne oublier pas la perte de la puissance disponible lors de la déconnection de la charge du GPV [62].

III.4.1.2. Approche Du Courant Constant (Constant Current) :

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit I_{SC} (short-circuit current) et la relation linéaire approximative (III.11) liant cette courant avec le courant de point maximal I_{MPP} du GPV [61] :

$$I_{MPP} = k_2 \times I_{SC} \quad \text{(III.11)}$$

Avec k_2 constante de proportionnalité. Comme pour la méthode CV, k_2 est déterminée pour le GPV utilisé. La constante k_2 est généralement comprise entre 0.78 et 0.92. [63]

La mesure du courant ISC durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant ISC à l'aide d'un capteur de courant.

Pour cette valeur constante du courant, la puissance est calculée pour des tensions différentes. Si la différence entre la puissance calculée et la puissance de crête est supérieure à la valeur de tolérance, alors la valeur de la tension est soit incrémenté ou décrémenté en fonction de la puissance obtenue. Pour que la tension et le courant MPP (I_{MPP}) correspondant, ce procédé est répété jusqu'à ce que la différence se situe dans la plage de tolérance [60]. **Figure III.13.**

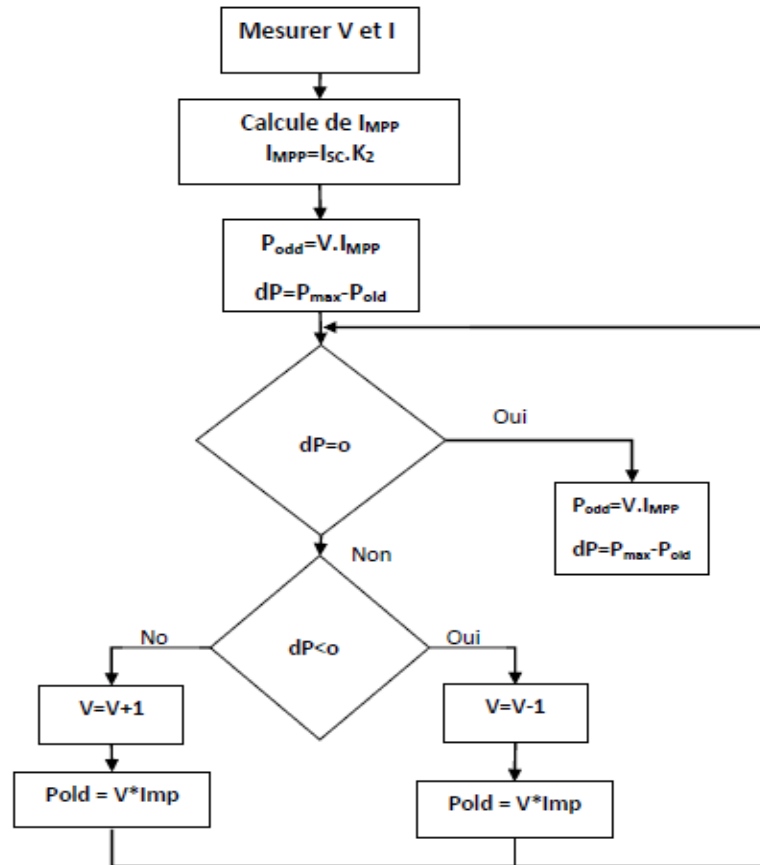


Figure III.13 : Algorithme du constant courant

III.4.1.3. Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$) [64]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV. [65]

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension VPV, ce qui engendre une variation de la puissance [66]. **Figure III.14** montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à

gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

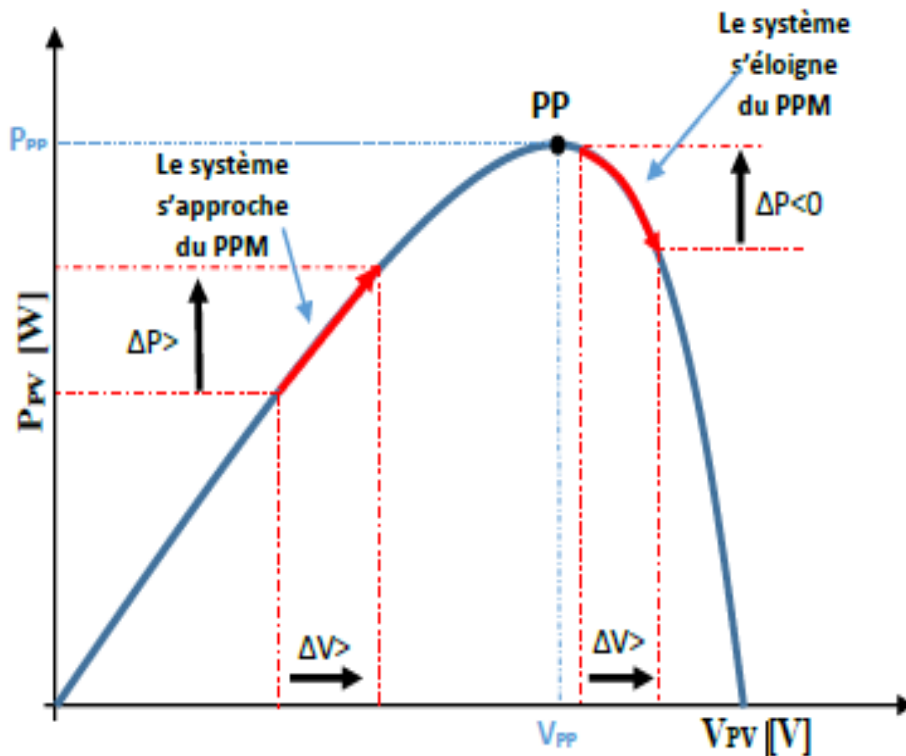


Figure III.14 : Recherche du PPM par la méthode (P&O)

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [63].

La **Figure III.15** représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

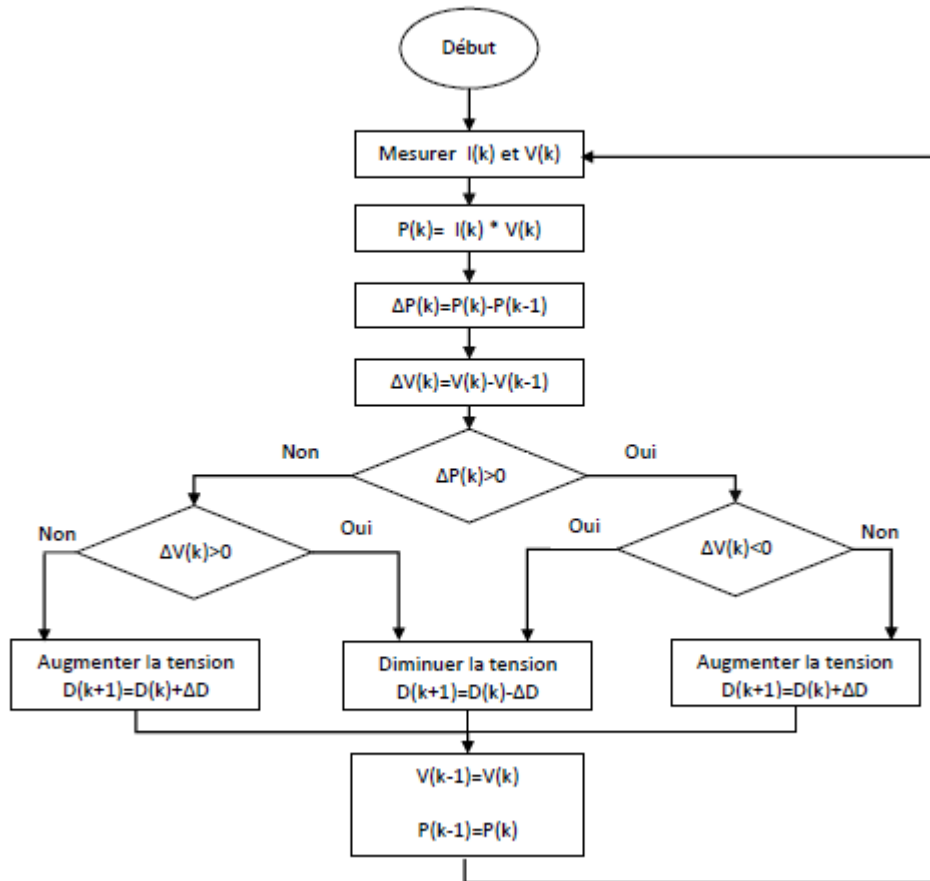


Figure III.15 : l'algorithme de P&O classique

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint[58]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [67] :

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

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un

changement rapide des conditions atmosphériques. **Figure III.16** Commençant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2, sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance. [62]

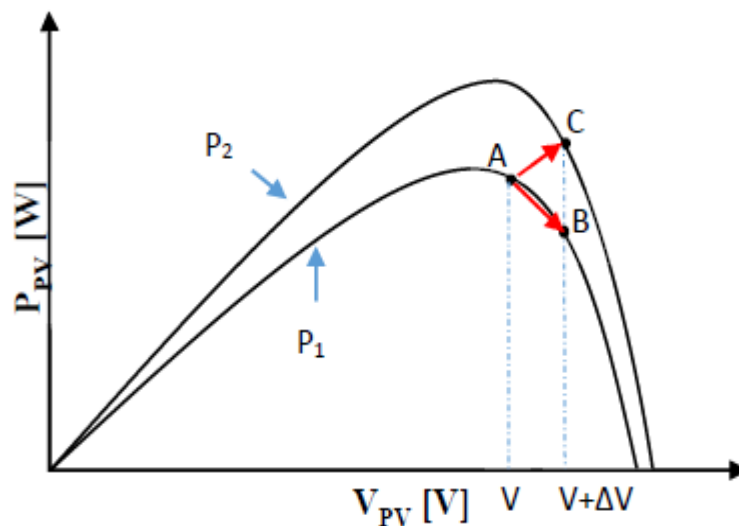


Figure III.16 : Divergence de la méthode P&O

Pour remédier à l'inconvénient de la méthode P&O simple, des versions améliorées de l'algorithme P&O sont proposées :

On pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation. L'algorithme de cette méthode (the three-point weight comparison) a été présenté dans la **Figure III.17** avec les trois points sont point actuel A, un point B perturbé d'un point A et un point C doublement perturbée dans le sens opposé du point B [59].

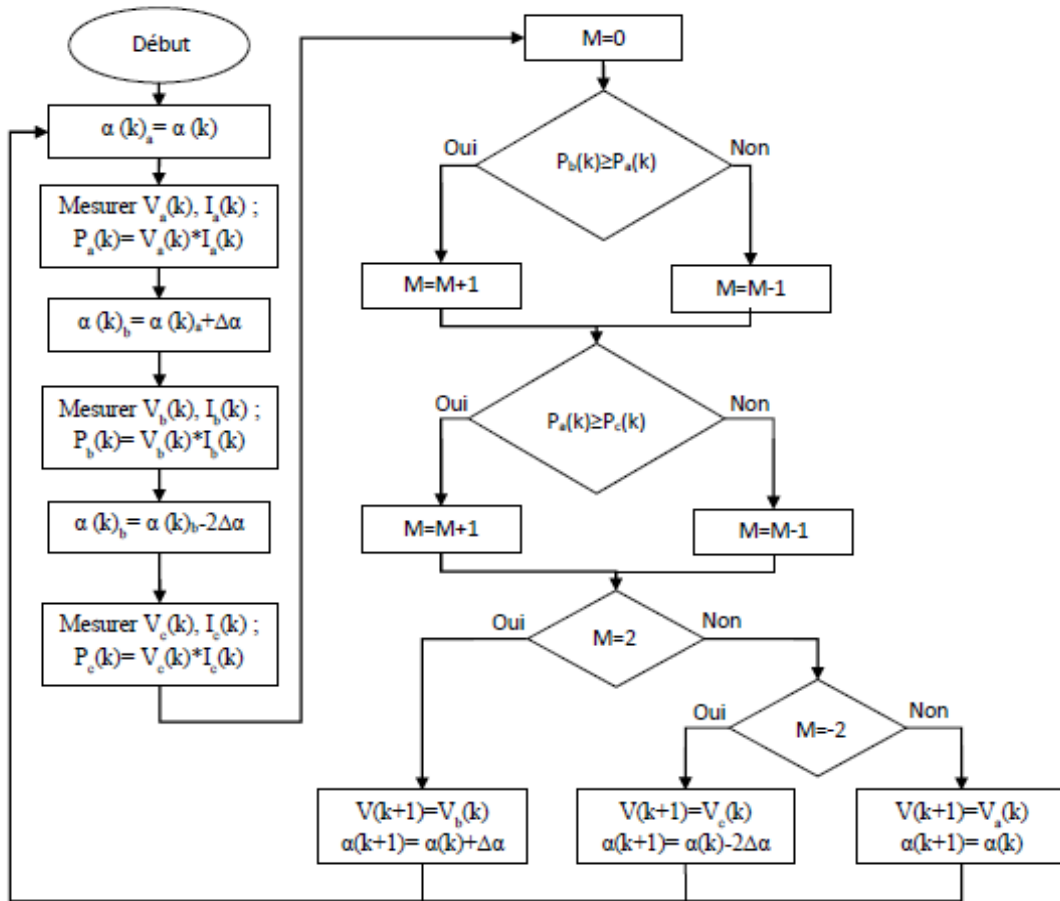


Figure III.17 : algorithme du poids d'un troisième point

Une autre solution sera de garder le même algorithme de la méthode P&O classique sauf que le pas de perturbation est variable .où plusieurs échantillons de puissance P_{pv} est utilisé pour ajuster dynamiquement l'amplitude de la perturbation de manier qu'il est diminué quand il est proche du point maximum. Certain études [59] propose que le pas soit:

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \right| \quad (\text{III.12})$$

III.4.1.4. Les réseaux de neurones artificiels :

Cette méthode est basée sur la simulation du cerveau humain, et nous la traiterons en détail dans le chapitre suivant.

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné les définitions et les mécanismes de base du principe de traitement l'énergie électrique avec le convertisseur DC/DC (le hacheur).

CHAPITRE 4

*Simulations et analyses de MPPT
neural (PDO et RNA)*

IV.1. Introduction :

Les réseaux de neurones, fabriqués de structures cellulaires artificielles, constituent une approche permettant d'aborder sous des angles nouveaux les problèmes de perception, de mémoire, d'apprentissage et de raisonnement. Ils s'avèrent aussi des alternatives très prometteuses pour contourner certaines des limitations des ordinateurs classiques. Grâce à leur traitement parallèle de l'information et à leurs mécanismes inspirés des cellules nerveuses (neurones), ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner des problèmes qualifiés de complexes. [67]

Dans ce chapitre, nous allons présenter les réseaux neurones et leur architecture et l'apprentissage par ce réseaux.

IV.2. Historique :

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

Ces modèles suscitèrent l'intérêt de plusieurs chercheurs avant que Minsky et Papert en 1969 démontrèrent leurs limites théoriques. Le renouveau actuel des réseaux de neurones est dû à des contributions originales comme celle de Hopfield en 1982, qui en montrant l'analogie des réseaux de neurones avec certains systèmes physiques, a permis de leur appliquer un formalisme riche et bien maîtrisé. Plus récemment, en 1985, de nouveaux modèles mathématiques ont permis de dépasser les limites du perceptron. [68] [69].

IV.3. Les réseaux de neurones artificiels :

IV.3.1. Définition :

Le cerveau humain est le meilleur modèle de machine polyvalente incroyablement rapide et surtout douée d'une parfaite capacité d'auto organisation. Son comportement est beaucoup plus mystérieux que le comportement de ses cellules de base. Il est constitué d'unité

biologiques élémentaires (environ 1012 neurones), chacune reçoit et envoie des informations (1000 à 1000 synapses par neurone).

Les cellules nerveuses appelées "neurones" qui sont des éléments de base du système nerveux central. Elles sont constituées de trois parties essentielles, le corps cellulaire, les dendrites et l'axone [70].

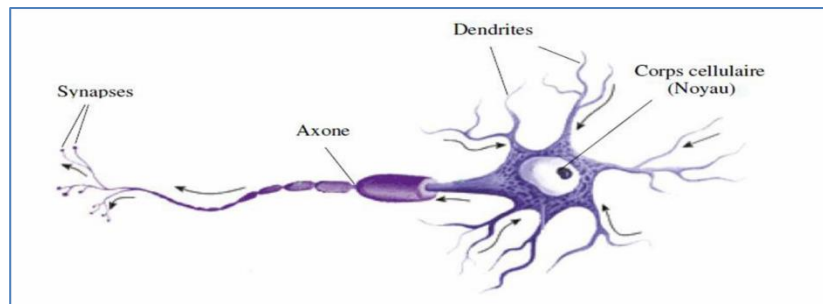


Figure IV.1 : Représentation schématique d'un neurone biologique.

L'architecture biologique du neurone est présentée sur la **Figure IV.1**. Les dendrites sont considérées comme les portes d'entrées des neurones. Elles sont les réceptrices principales du neurone permettant de capter les signaux lui parvenant. Ensuite, un traitement de toutes ces informations a lieu au niveau du corps cellulaire. Les principales lignes de transmission du système nerveux sont les axones. Ils servent de moyen de transport pour les signaux émis par le neurone, vers d'autres neurones. L'information va transiter de neurone en neurone le long de l'axone jusqu'aux muscles via un potentiel d'action (un signal électrique).

La synapse désigne les zones de contact entre neurones, zones spécialisées dans la transmission de l'information. Elles peuvent être inhibitrice ou le soumissionnaire de signal pondérant l'information arrivant au corps cellulaire par les dendrites. [71]

IV.3.2. Le modèle mathématique (neurone artificiel) :

La **Figure IV.2** montre la structure d'un neurone artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones "amont". A chacune de ces entrées est associé un poids abréviation de weight (poids en anglais) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones "avals". A chaque connexion est associé un poids. [72]

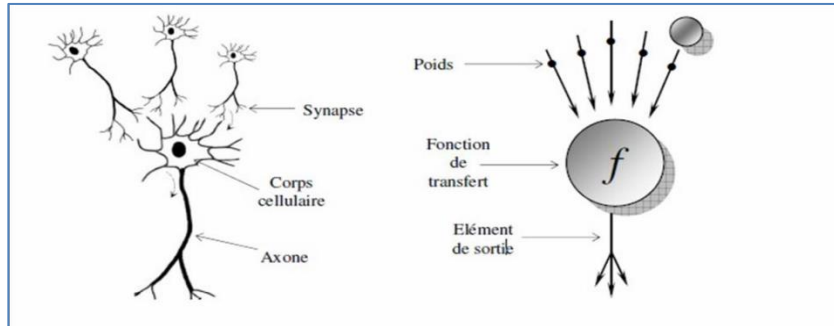


Figure IV.2 : Mise en correspondance du neurone biologique /et du neurone artificiel.

IV.4. Modélisation :

IV.4.1. Comportement : [73]

Par analogie avec la biologie, un neurone artificiel **Figure IV.3** reçoit l'information provenant des entrées x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) par l'intermédiaire des connexions dont on affecte à chacune d'elles un poids w (en anglais weights) pondérant l'information reçue, appelé aussi poids synaptique. Deux fonctionne en deux étapes:

La première phase représente le prétraitement des données reçues en calculant le potentiel v_j du neurone j par la fonction suivante:

$$v_j = b_j + \sum_{i=1}^n W_{j,i} X_i \quad (\text{IV.1})$$

Où $w_{j,i}$ désigne le poids de la connexion liant le neurone j à l'entrée i , et b_j est un terme constant appelé biais qui peut être considéré comme le poids d'une entrée x_0 égale à 1. Ainsi, la relation **IV.2** s'écrit plus simplement:

$$v_j = \sum_{i=1}^n W_{j,i} X_i \quad (\text{IV.2})$$

Les neurones que nous allons utiliser sont des neurones linéaires qui effectuent une somme pondérée des entrées. Mais, il en existe d'autres dans la littérature (neurone distance, neurone polynomial, neurone de type noyau, etc...).

Dans la deuxième phase, une fonction de transfert f appelée également fonction d'activation calcule la valeur de l'état interne y_j du neurone j à partir de la valeur du potentiel v_j . Cette valeur désignera la sortie du neurone :

$$y_j = f(v_j) = f\left(\sum_{i=1}^n W_{j,i} X_i\right) \quad (\text{IV.3})$$

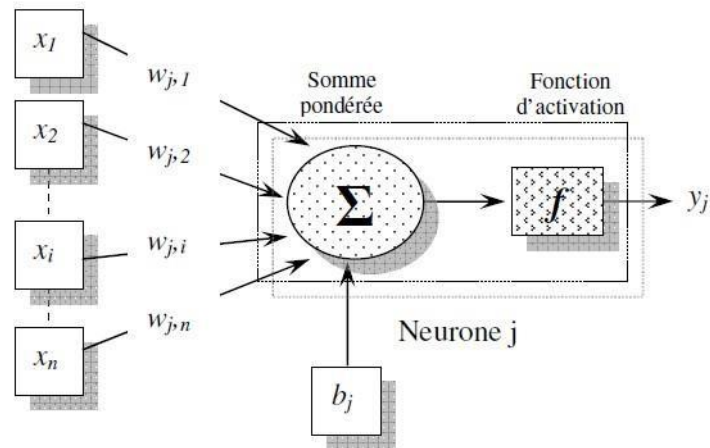


Figure IV.3 : Représentation d'un neurone mathématique.

Les variables x_i désignent les entrées, la sortie est notée y_j , le biais b_j et les poids synaptiques sont désignés pour $w_{j,i}$.

Ainsi, le neurone peut être défini mathématiquement comme étant une fonction algébrique, a priori non linéaire (suivant f) et bornée, des entrées x_j et paramétrée par les poids $w_{j,i}$:

$$y_j = f(x_j, w_{j,i}) = f \sum_{i=1}^n w_{j,i} x_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (\text{IV.4})$$

Plusieurs possibilités existent pour spécifier la nature de la fonction d'activation du modèle.

Les fonctions mathématiques les plus souvent utilisées sont: La fonction seuil **Figure IV.4**

$$F(x)=0 \quad \text{si} \quad x < 0 \quad (\text{IV.5})$$

$$F(x)=1 \quad \text{si} \quad x \geq 0 \quad (\text{IV.6})$$

La fonction identité (dite linéaire) **Figure IV.4**

$$f(x) = x \quad \forall x \quad (\text{IV.7})$$

La fonction sigmoïde **Figure IV.4**, dont les formes les plus utilisées sont la fonction logistique **IV.7** et la fonction tangente hyperbolique **IV.8**:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-Kx}} \quad (\text{IV.8})$$

$$f(x) = \frac{e^{Kx}}{e^{Kx} + e^{-Kx}} = \tanh\left(\frac{K}{2}x\right) \quad (\text{IV.9})$$

La valeur du paramètre K est généralement prise égale à 1. La fonction gaussienne d'écart type unité **Figure IV.4**.

$$F(x) = e^{-x^2} \quad (\text{IV.10})$$

La fonction d'activation définit l'état du neurone en fonction de son entrée totale. Elle présente la relation qui lie l'ensemble des potentiels d'activation et décision du neurone.

La **Figure IV.4** donne quelques fonctions d'activations les plus utilisées [74]:

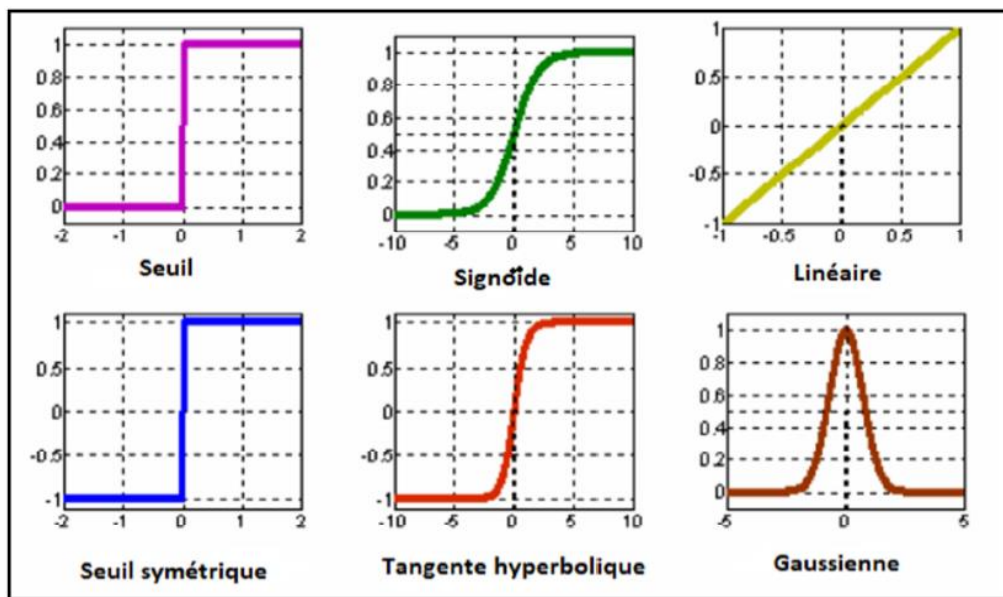


Figure IV.4 : *Fonction d'activation.*

IV.5. Architecture des réseaux de neurones :

IV.5.1. Les réseaux non bouclés :

Ce sont des réseaux unidirectionnels sans retour arrière (feedforward). Le signal de sortie est directement obtenu après l'application du signal d'entrée. Si tous les neurones ne sont pas des organes de sortie, on parle de neurones cachés [75].

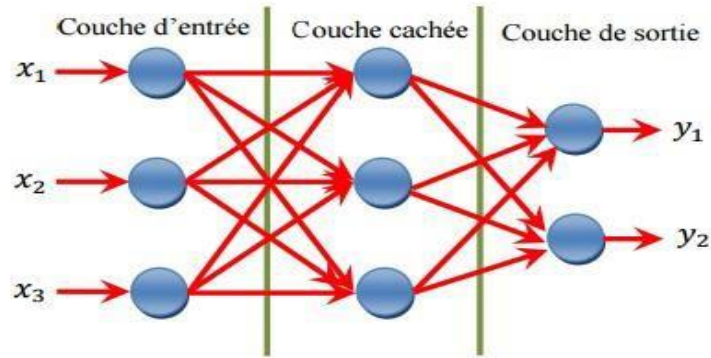


Figure IV.5 : Réseau non bouclé.

IV.5.2. Réseaux bouclés :

Il s'agit de réseaux de neurones avec retour en arrière (feedback network ou récurrent Network). [76]

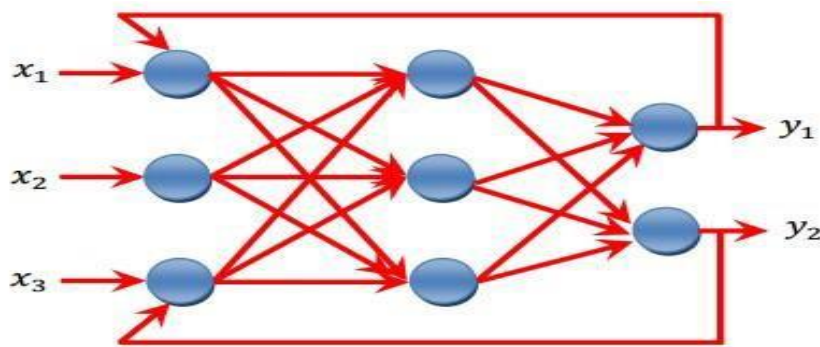


Figure IV.6 Réseau bouclé.

IV.6. L'apprentissage des réseaux de neurones :

L'apprentissage se conduit avec une méthodologie précise. La première, est la plus simple, connue sous le nom de règle de HEBB, date de 1949. Elle indique que lorsque deux neurones sont excités en même temps, il faut modifier les coefficients synaptiques pour renforcer cette excitation simultanée. La règle de WIDROW HOFF, établie en 1960, indique que la modification de ses coefficients est proportionnelle à l'erreur entre le résultat souhaité et le résultat réel et aux valeurs d'entrée.

La phase d'apprentissage consiste à modifier les poids jusqu'à obtention d'une stabilisation du réseau. C'est-à-dire, jusqu'à ce que le poids ne se modifie plus que d'une façon minime.

L'apprentissage mathématique, basé sur ce concept, sert à minimiser une fonction de coûts formulée autour de l'erreur de sortie. Alors l'adaptation commence, par les neurones de la couche de sortie, forcés de la bonne valeur, puis on fait varier légèrement les poids des neurones des couches précédentes :

Il y a autant d'algorithmes d'apprentissage que de types de réseau. Mais la question qui se pose, est ce que on est absolument sûr de la stabilité du réseau ? Question classique qui revient assurer la convergence des algorithmes d'apprentissage utilisés.

Les procédures d'apprentissage peuvent se subdiviser, elles aussi, en deux grandes catégories [76].

IV.6.1. Apprentissage supervisé :

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

L'apprentissage supervisé détermine les poids synaptiques à partir d'exemples étiquetés de formes auquel un professeur a associé des réponses ou des cibles désirées également étiquetées et grâce à une stratégie spécifique. Après la phase d'apprentissage et la convergence des calculs, il n'est plus nécessaire, en général, de mémoriser le jeu d'apprentissage. Ces algorithmes sont particulièrement dédiés aux problèmes de classification des données bruitées ou incomplètes [77].

IV.6.2. Apprentissage non supervisé :

Ne nécessite pas « d'enseignant » externe et se base uniquement sur les valeurs d'entrée sans fournir de réponse désirée. Le réseau s'auto organise de façon à optimiser une fonction de coût [77].

L'apprentissage non supervisé copie le fonctionnement du cerveau humain qui retrouve les informations par association. On présente à l'entrée du réseau des exemples connus et le réseau organise lui-même autour d'attracteurs qui correspondent à des configurations stables du modèle dynamique non linéaire associé au réseau.

IV.6.3. L'apprentissage renforcé :

L'apprentissage par renforcement est utile quand une information de retour sur la qualité de la performance est fournie. Mais la conduite souhaitée du réseau n'est pas complètement spécifiée par le professeur. [78]

IV.7. Règles d'apprentissage :

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

- ❖ La règle de HEBB ou les poids des connexions entre deux processeurs élémentaires est renforcé si les deux processeurs élémentaires sont activés simultanément.
- ❖ La règle de WIDROW HOFF ou règle delta règle ou les poids synaptique est adaptée pour obtenir la diminution de l'erreur entre la sortie réelle du processeur élémentaire et la sortie désirée.

L'apprentissage compétitif dans lequel tous les processeurs élémentaires sont en compétition. La sélection est réalisée à l'aide d'un processus de compétition basé sur une mesure de similarité entre l'exemple de référence associé à chaque processeur et l'exemple d'entrée.

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

La **Figure IV.7** représente la cellule émettrice P_j connectée à la cellule réceptrice P_i par l'intermédiaire du poids synaptique $w_{j,i}$

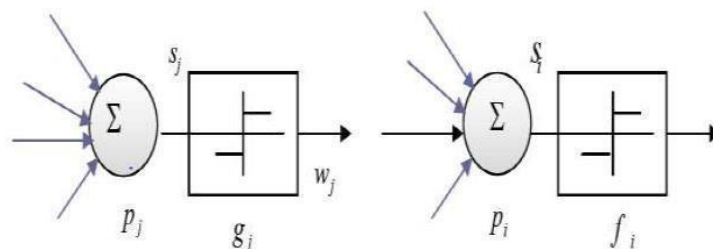


Figure IV.7 : Modèle d'apprentissage de la connexion $w_{j,i}$ entre deux neurones.

$$\Delta w_{j,i} = \alpha f_i(S_i, t_i) g_i(S_i, w_{j,i}) \quad (\text{IV.11})$$

Avec :

- α : le pas d'adaptation
- f_i et f_j : fonctions d'activations de P_i et P_j . S_i et S_j : valeurs d'activations de P_i et P_j . t_i : entrée professeur de P_i .

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

$$\Delta w_{j,i} = \alpha S_i S_j \quad (\text{IV.12})$$

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

$$\Delta w_{j,i} = \alpha (t_i - S_i) S_j \quad (\text{IV.13})$$

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

$$\Delta w_{j,i} = \alpha (t_i - w_{j,i}) \quad (\text{IV.14})$$

Après la phase d'apprentissage, toute la mémorisation des connaissances est gravée dans le réseau. C'est la phase la plus longue en calcul connexionniste. Par contre, en phase de reconnaissance, si la forme à reconnaître a déjà été apprise, le réseau fournira instantanément la bonne sortie [77].

IV.8. Structure d'interconnexion :

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

• Réseau multicouche :

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avales **Figure IV.8** habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de

parcours de l'information de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelés couches cachées [79].

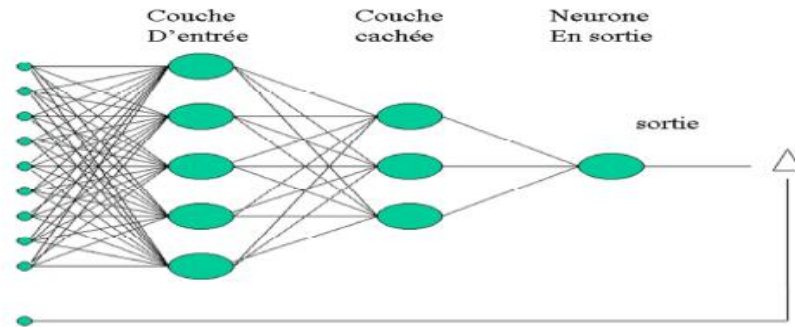


Figure IV.8 : Réseaux multicouche.

• **Réseau à connexions locales :**

Il s'agit d'une structure multicouche, mais qui à l'image de la rétine, conserve une certaine topologie. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche aval **Figure IV.9**. Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique [79]. [80].

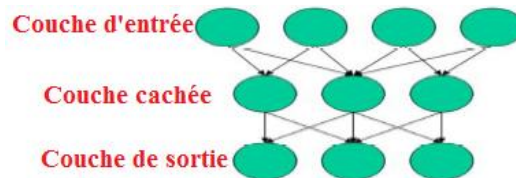


Figure IV.9 : Réseaux à connexion locales.

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

Un réseau de ce type signifie qu'une ou plusieurs sorties de neurones d'une couche aval sont connectées aux entrées des neurones de la couche amont ou de la même couche. Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont la plus souvent locale **Figure IV.10**.

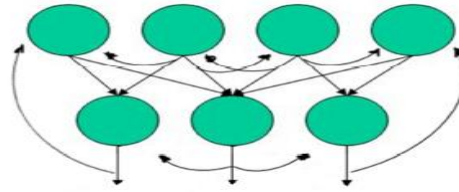


Figure IV.10 : Réseaux à connexions récurrentes.

• **Réseaux à connexion complexe :**

C'est la structure d'interconnexion la plus générale **Figure IV.11**. Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau (et à lui-même). [81]

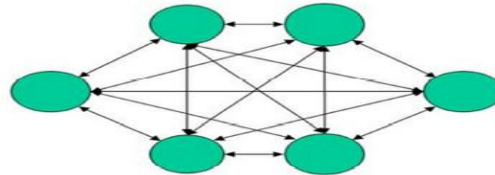


Figure IV.11 : Réseaux à connexion complexe.

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

Ces réseaux de neurones changent leurs structure internes pendant l'utilisation (augmentation ou diminution du nombre de neurones) [81].

IV.9. La simulation :

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

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

IV.9.1. Schéma bloc d'un générateur PV :

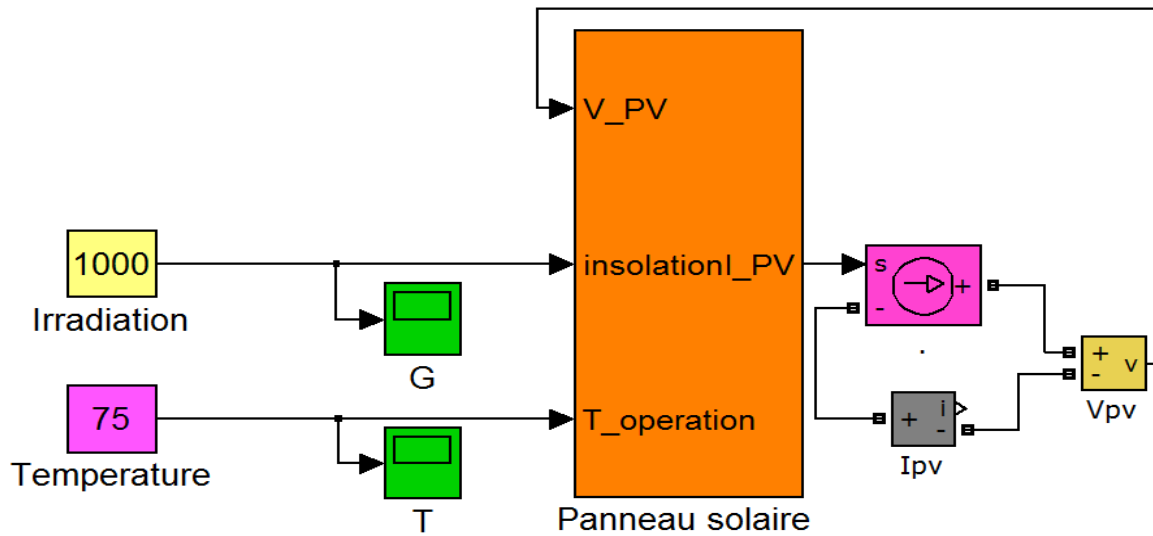


Figure IV.12 : schéma de module photovoltaïque.

IV.9.2. Influence de l'éclairement :

Avec l'augmentation de l'éclairement, on constate à travers la courbe I -V que le courant est fortement affecté par l'augmentation de sa valeur. Quant à la tension, elle est faible. Quand les courbes I-V se déplacent vers l'augmentation des valeurs, permettant à l'unité de produire plus d'énergie électrique **Figure IV.13**. Le même comportement peut constater pour la caractéristique P(V) dans la **Figure IV.14**.

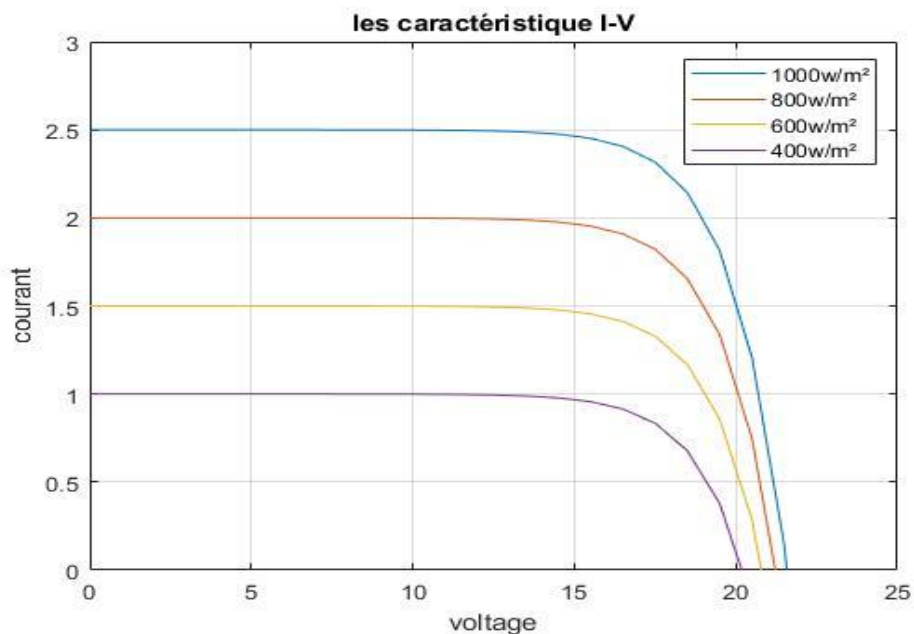


Figure IV.13 : Caractéristique I(V) d'un module pour éclairement solaires variable.

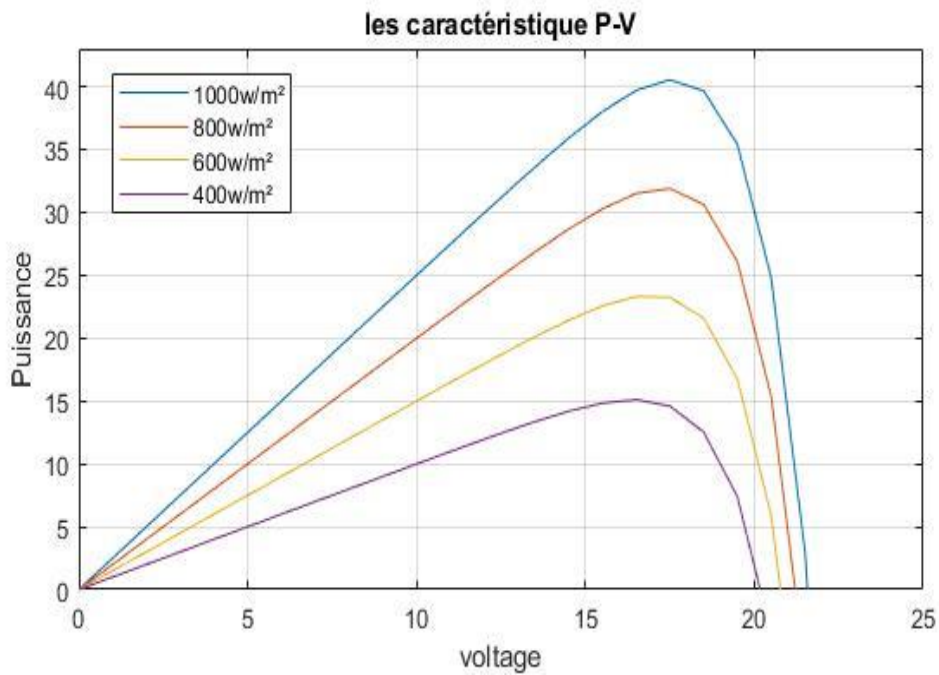


Figure IV.14 : Caractéristique P-V d'un module pour température constante ($T=25^\circ$) et éclairement solaire variable.

IV.9.3. Influence de la température :

D'après les **Figures IV.15-16**, On voit à travers la courbe I – V que le courant est faiblement affecté par la température, alors qu'il affecte clairement la tension. Quant à l'énergie, elle augmente avec la baisse de température.

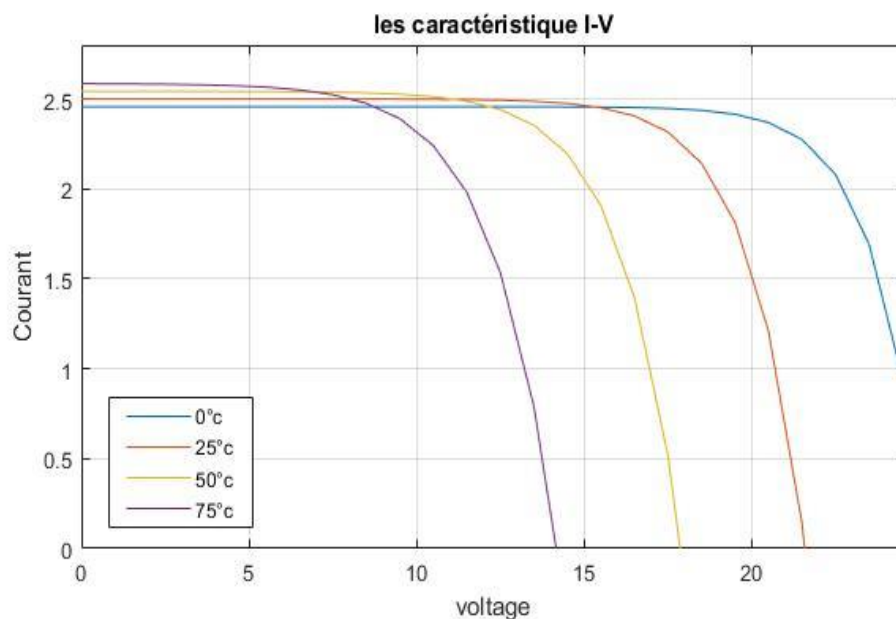


Figure IV.15 : Caractéristique I(V) d'un module pour Température variable.

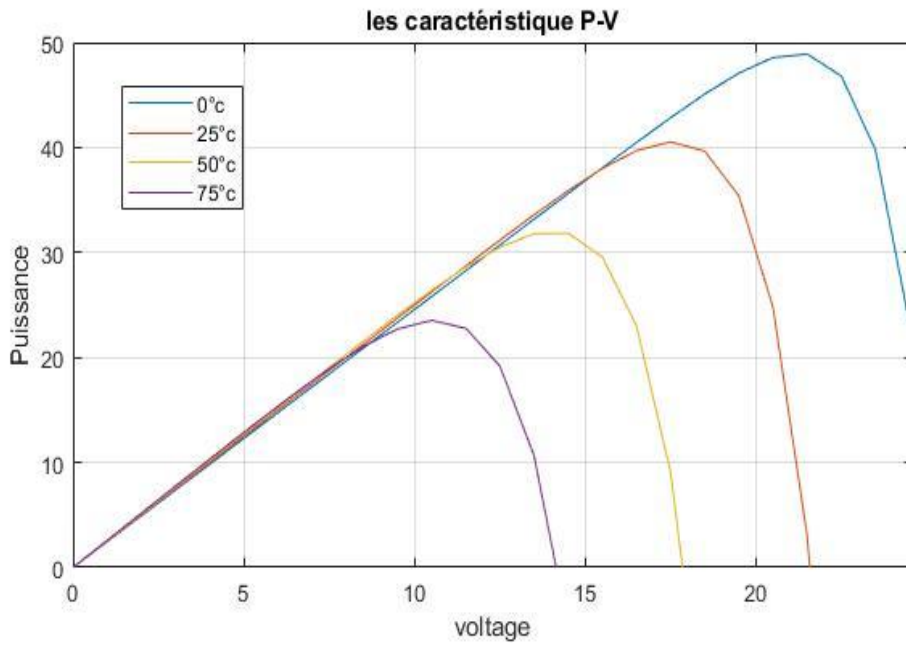


Figure IV.16 : Caractéristique P(V) d'un module pour Température variable.

IV.9.4. Schéma bloc d'un MPPT de P&O :

La Figure IV.17 représente le bloc schématique de SIMULINK de la commande MPPT :

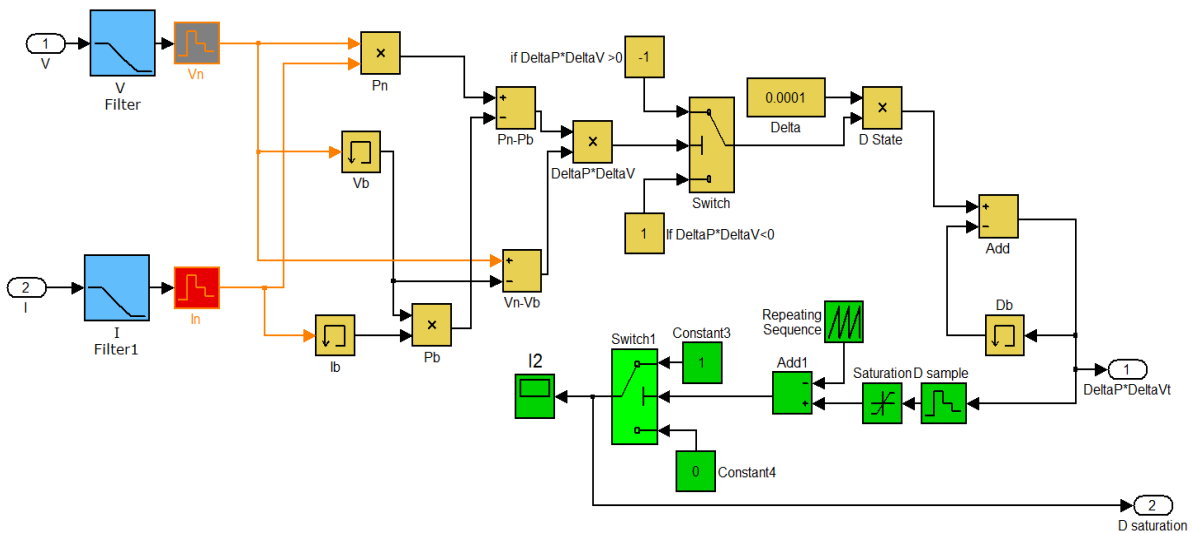


Figure IV.17 : Schéma bloc de l'algorithmme P&O.

IV.9.5. Bloc du système avec MPPT :

La **Figure IV.18** illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation ». Dans cette simulation on a utilisé un Module photovoltaïque, un hacheur Boost caractérisé par : $C = 0.003F$, $C1 = 0.002F$, $L = 0.01H$, on a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O et une charge $R=5\text{ ohm}$:

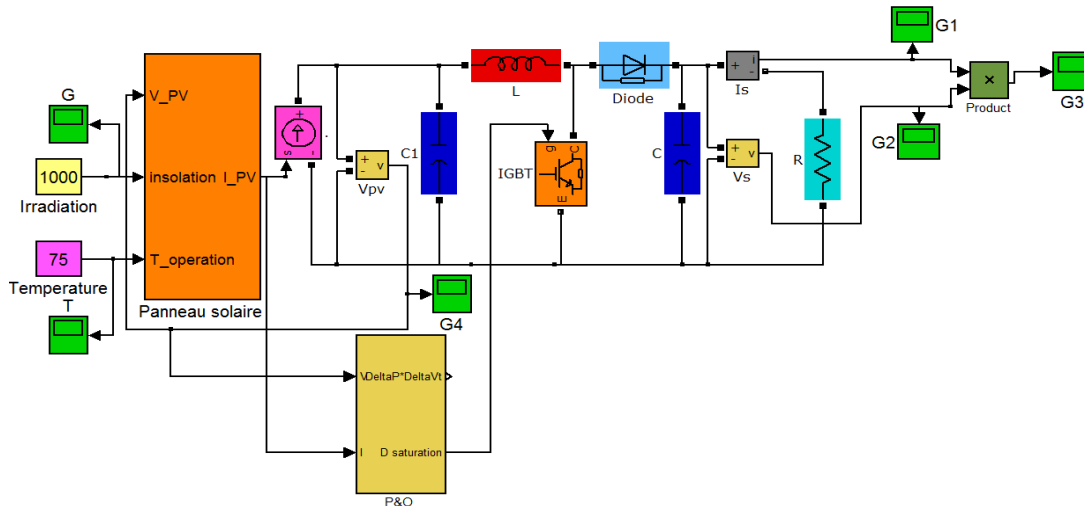


Figure IV.18 : Modèle de simulation du GPV adapté par la commande MPPT (P&O).

IV.9.6. Simulation de la méthode MPPT:

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentés par les **Figures IV.19-20** Ces figures représentent la puissance générée par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

L'hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge.

Les figures suivantes présentent l'allure de puissance en fonction de temps d'un système photovoltaïque commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et différents éclairagements et températures ($T=0 ; 25 ; 50^{\circ}C$, $G=600, 800, 1000\text{ W/m}^2$) :

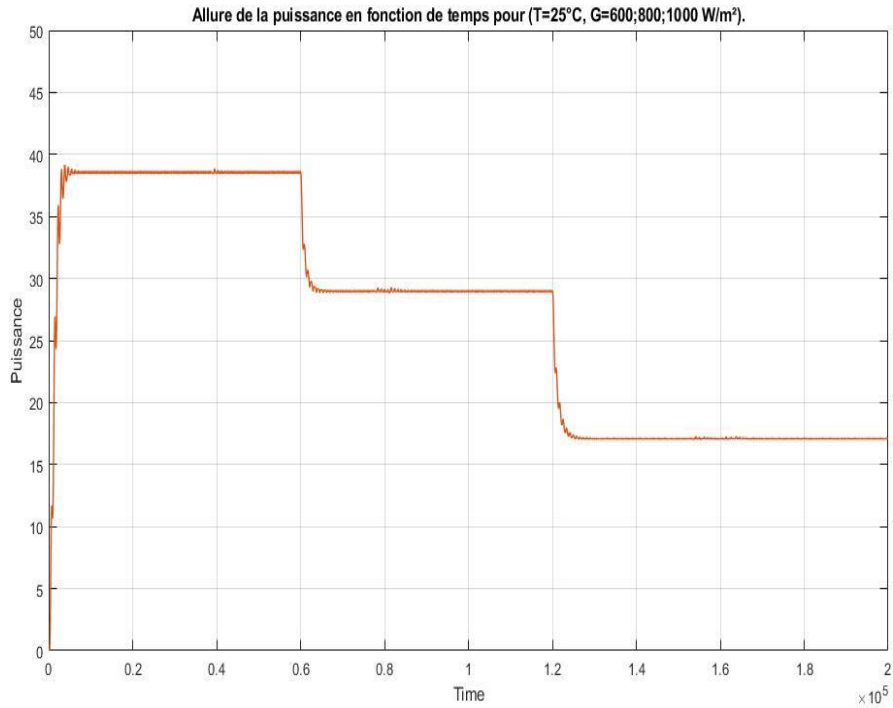


Figure IV.19 : Allure de la puissance en fonction de temps pour (T=25°C, G=600 ; 800 ; 1000W/m²).

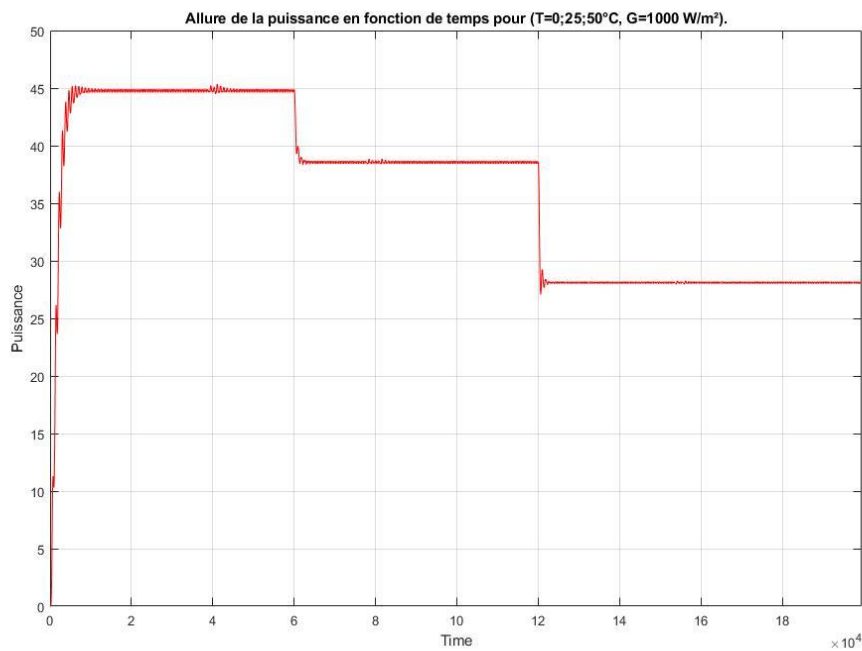


Figure IV.20 : Allure de la puissance en fonction de temps pour (T=0 ; 25 ; 50 °C, G= 1000W/m²).

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

IV.9.7. PROCEDURE DE CONSTRUCTION D'UN RESEAU DE NEURONES:

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

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

IV.9.8. CREATION DU BLOC SIMULINK:

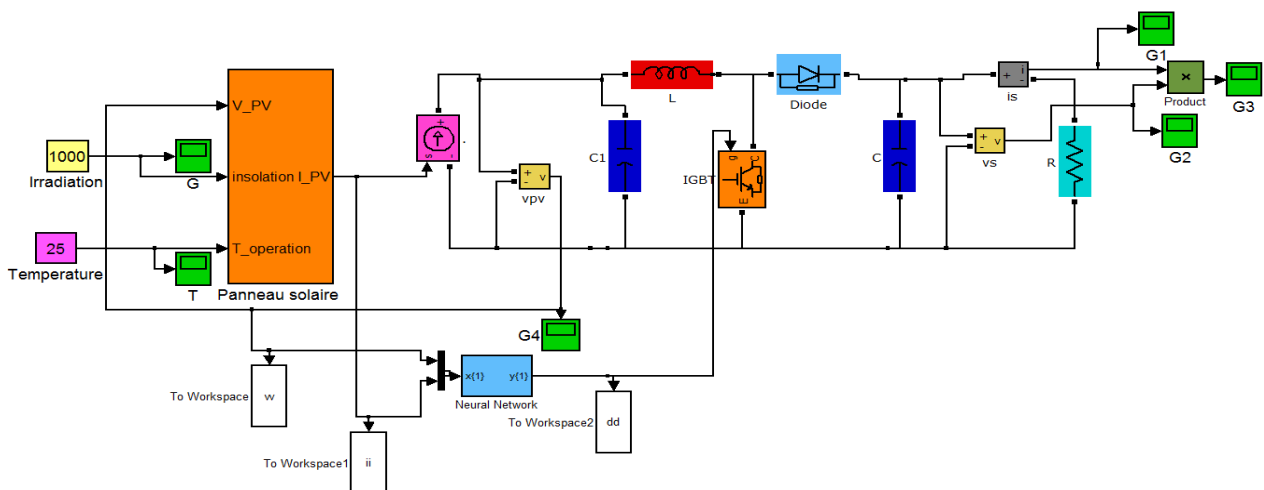


Figure IV.20 : Modèle de simulation du GPV adapte par la technique MPPT [RNA].

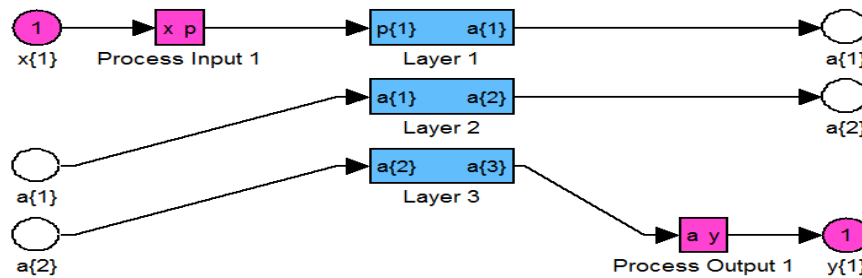


Figure IV.21 : Schéma bloc de l'algorithme RNA

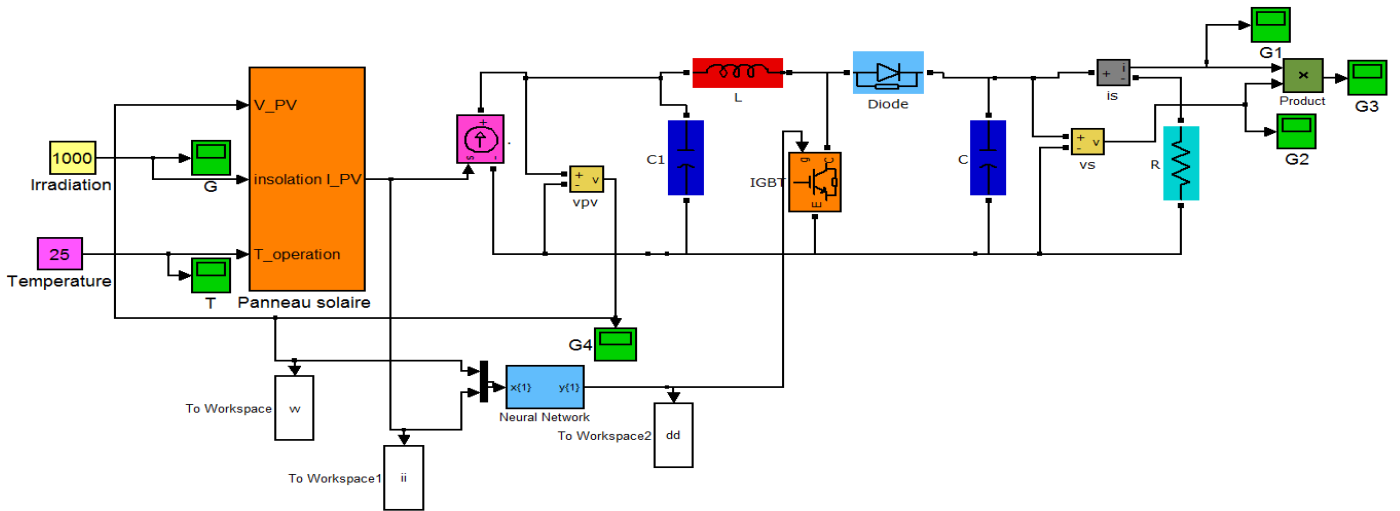


Figure IV.22 : Formation du RNA avec MATLAB

IV.9.9. Résultat de la simulation :

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

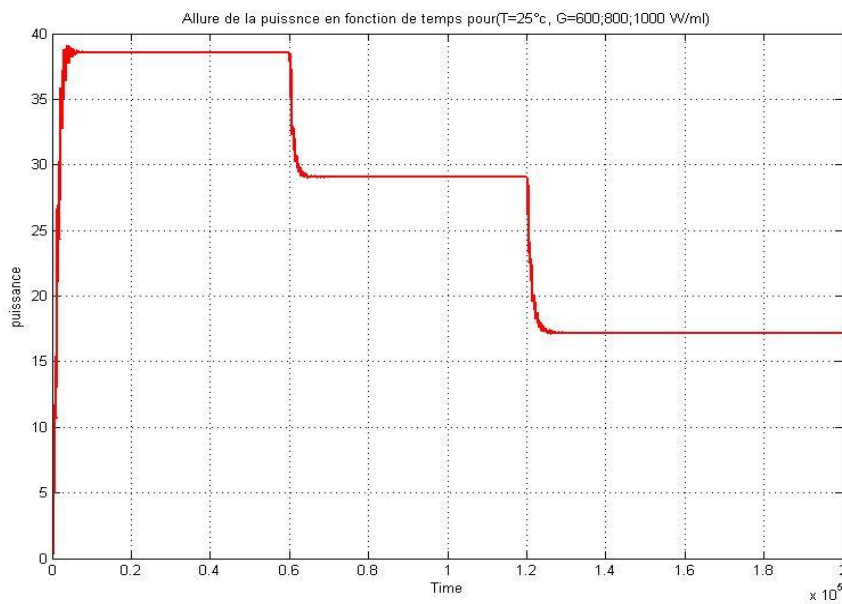


Figure IV.23 : Allure de la puissance à la sortie de l’hacheur par la technique RNA (T=25°, E= 1000, 800, 600 W/M²).

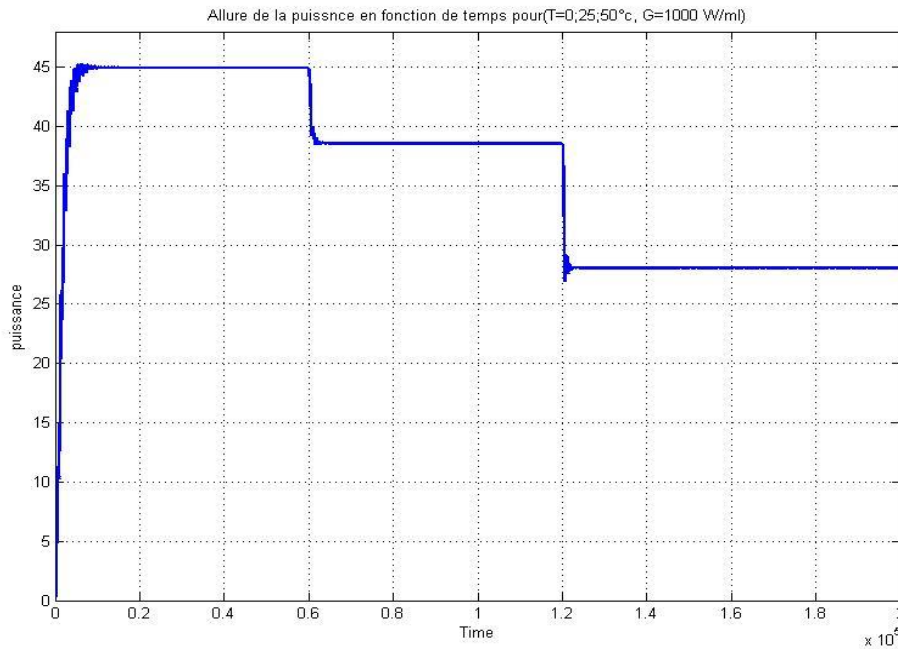


Figure IV.24 : Allure de la puissance à la sortie de l'hacheur par la technique RNA ($T=0 ; 25 ; 50^{\circ}$, $E= 1000 \text{ W/M}^2$).

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

IV.10. Conclusion :

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

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

CONCLUSION GENERALE

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

La production d'électricité à partir de panneaux PV est intermittente. C'est une fonction du rayonnement solaire, et aussi la température reçu sur Terre, Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale, l'utilisation des contrôleurs MPPT robuste aux changements climatiques est obligatoire.

Pour le même but, la méthode MPPT (RNA) offrent des performances mieux que la méthode classique MPPT (P&O).

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

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE :

- [1] : A. Zerga, 'Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n+p', Mémoire de Magistère Tlemcen-1998.
- [2] : Bouden Abdelmalek, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [3] : Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [4] : A. Mezache, "optimisation de la détection décentralisée CFAR dans un clutterweibull Utilisant les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones flous", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2009
- [5] : Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [6] : J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [7] : R. Bernard; G. Menguy ; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.
- [8] : S. Saadi, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC, 2010.
- [9] : Le pompage photovoltaïque par Jimmy Royer, Thomas Djako, Eric Schiller, Bocar Sadas, IEPF/ université d'Ottawa/ EIER/ CREPA.
- [10] : Bouden Abdelmalek, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [11] CHENNI. Rachid, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire, Université Mantouri de constantine, 2007.
- [12] : Bouden Abdelmalek, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [13] : Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [14] :S. Exactes, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome Remerciements."
- [15] :M. Belhadj, 'Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque. Mémoire de magistère', Université de Béchar - 2008.
- [16] :<http://tpe-panneaux-photovoltaïques.e-monsite.com/pages/etudes-prealables/besoin-en-energie-electrique-d-une-maison.html>
- [17] :<http://cellule-photovoltaïque.e-monsite.com/pages/l-utilisation-de-l-energie-photovoltaïque.html>
- [18] : H CHENOUFI, 'Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion'. Mémoire de Magistère, Université de Batna- 2005
- [19]: Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd El-Aal. Modelling and simulation of a photovoltaic fuel cell hybrid system, Thèse de doctorat de l'Université de Kassel, Germany, 2005.
- [20] I. Vechiu, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, Thèse de doctorat de l'université du Havre, 2005.
- [21]: Etude de la conversion photovoltaïque : effets des résistances parasites des photopiles.Laboratoire d'Electronique et de Physique des Interfaces, Institut des Sciences de

l'Ingénieur de Nancy, Parc Robert Bentz, 54500 Vandoeuvre, France. P.H. Nguyen, C. Michel et J. Bottin.

[22] : A. Mezache, "optimisation de la détection décentralisée CFAR dans un Clutterweibull Utilisant les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones flous", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2009.

[23] : Gereige .I, "Contribution des réseaux de neurones dans le domaine de l'ellipsométrie. Application à la scatterométrie", thèse de doctorat, université de Saint-Étienne, 2008.

[24] : S. T. I. Elt, "Production d'énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE Production d'énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE," pp. 1–18.

[25] : R. Algérienne, D. Et, F. D. E. S. Sciences, and D. D. E. Physique, "Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque," UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID – TLEMCEN.

[26]: M.Bashahu and A.Habyarimana; Riew and test of methods for determination of the solar series resistance Renewable Energy; 1995.

[27]: Xi.Zhenqiang, Daren Yang et al; Investigation of texturization for monocrystalline silicom solar cells with different kinds of alkaline; Renewable Energy - 2004.

[28] : Saidani.A, « Amélioration de la technique d'extraction de maximum de puissance du système photovoltaïque basé sur la méthode (P&O) », mémoire de master, Université de M'sila 2015.

[39]: Mekhilef.S, Saidur.R,Safari.A, « A review on solar energy use in industries », Renew. Sustain. EnergyRev. 15 (2011) 1777–1790.

[33] : Sahraoui.A.N,«étude d'une chaîne de convertisseur photovoltaïque», Mémoire de magistère Université de Msila,2010.

[31] Walker,Geoff R« Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV Model », Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC '00,Brisbane. 2000.

[32] : CHEKIREDF, "Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA", Mémoire de Magister de l'Ecole Nationale Polytechnique 2008.

[33] : Ali.C, "Etude de la Poursuite du Point de Fonctionnement Optimal du Générateur Photovoltaïque (G. PV) ", SETIT 2005 3rd International Conférence: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Télécommunications March 27-31, tunisia 2005.

[34] : Walker,Geoff R« Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV Model », Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC '00,Brisbane. 2000.

[35] : CHEKIREDF, "Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA", Mémoire de Magister de l'Ecole Nationale Polytechnique 2008.

[36] : Etude de la conversion photovoltaïque : effets des résistances parasites des photopiles.

Laboratoire d'Electronique et de Physique des Interfaces, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Nancy, Parc Robert Bentz, 54500 Vandoeuvre, France. P.H. Nguyen, C. Michel et J. Bottin.

[37] : <http://lyc-mgenevoix-ingre.tice.acorleanstours.fr/php5/Cours/Cours/Analogique/diodtxt.Pdf>.

- [38] : H CHENOUFI, 'Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion'. Mémoire de Magistère, Université de Batna- 2005.
- [39] : Gereige .I, "Contribution des réseaux de neurones dans le domaine de l'ellipsométrie.
- [40] : R. Maouedj, 'Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah'. Mémoire De Magistère Décembre 2005.
- [41] : MakhloufM «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application», thèse de doctorat, Université de constantine, 2012.
- [42] : Schmitt. A, «Les réseaux de neurones artificiels un outil de traitement de données prometteur pour l'anthropologie", Bull. et Mém. de la société d'anthropologie de Paris, 2001.
- [43]: J. A. Gow and C. D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies," in Electric Power Applications, IEE Proceedings-, 1999, vol. 146, no. 2, pp. 193–200.
- [44]: J. Hyvarinen and J. Karila, "New analysis method for crystalline silicon cells," in Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on, 2003, vol. 2, pp. 1521–1524.
- [45]: K. Nishioka, N. Sakitani, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, "Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 91, no. 13, pp. 1222–1227, 2007.
- [46]: C. Carrero, J. Amador, and S. Arnaltes, "A single procedure for helping PV designers to select silicon PV modules and evaluate the loss resistances," Renew. Energy, vol. 32, no. 15, pp. 2579–2589, 2007.
- [47]: C. Carrero, J. Amador, and S. Arnaltes, "A single procedure for helping PV designers to select silicon PV modules and evaluate the loss resistances," Renew. Energy, vol. 32, no. 15, pp. 2579–2589, 2007.
- [48]: G. Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model," J. Electr. Electron. Eng. Aust., vol. 21, no. 1, p. 49, 2001.
- [49]: W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance," Sol. energy, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, 2006.
- [50]: M. G. Villalva and J. R. Gazoli, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," Power Electron. IEEE Trans., vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208,
- [51]: D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," in Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on, 2007, pp. 2392–2396.
- [52]: H.-L. Tsai, C.-S. Tu, and Y.-J. Su, "Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK," in Proceedings of the world congress on Engineering and computer science, 2008, vol. 2008, pp. 1–6.
- [53] M. C. Glass, "Improved solar array power point model with SPICE realization," in Energy Conversion Engineering Conference, 1996. IECEC 96., Proceedings of the 31st Intersociety, 1996, vol. 1, pp. 286–291.
- [54]: E. I. Ortiz-Rivera and F. Peng, "Analytical model for a photovoltaic module using the electrical characteristics provided by the manufacturer data sheet," in Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC'05. IEEE 36th, 2005, pp. 2087–2091.

- [55]: <https://www.automation-sense.com/blog/electronique/les-convertisseurs-statiques-definition-et-exemples.html>
- [56]: <https://elec13.wordpress.com/2016/03/05/les-convertisseurs-statiques/>
- [57]: <https://sitelec.org/download.php?file name=cours/hacheurs.pdf>
- [58]: Amarouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014
- [59]: M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006
- [60]: Anantapuram, "investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output" ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university, 2012
- [61]: Ahmad Zbeeb, "a new microcontroller-based mppt algorithm for photovoltaic applications" for the degree of master of applied science, concordia university montreal, quebec, canada, 2009.
- [62]: d. Lee, H. Noh, D. Hyun, And I. Choy,"an improved mppt converter using current compensation method for small scaled pv-applications," IEEE applied power electronics conf. And exposition, vol. 1, pp. 540-545, 2003
- [63]: Akihiro Oi, "design and simulation of photovoltaic water pumping system", faculty of california polytechnic state university, 2005 publisher: lulu (usa), 2015 advances in electric power engineering" "Hajar Bagheri [34]
- [64]: Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi "active power control for a single-phase grid connected pv system", international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.
- [65]: Bisker Asma, Chiri Meriem, « commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau », diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, école nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, el-harrach, algérie, 2012
- [66]: Nadir Mohamed, Sahraoui Ahmed, Titraoui Abdessalam « etude d' une chaîne de conversion photovoltaïque »,diplôme d'ingenieur d'etat en genie electrotechnique, universite de m'sila,2010
- [67]: TRIQUI.B," Classification des arythmies cardiaques par les chaînes de Markov cachées", Mémoire de Magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- [68]: Kaddour .B, "cours de réseaux de neurones", Département INFRES ENST, Paris, Brique MOD T2, 2004-2005
- [69]: DUPONT.R, "Emissions biogéniques de NO par les sols Impact sur la chimie atmosphérique", Thèse de doctorat, université Toulouse III – Paul Sabatier, 2007
- [70]: Makhoulf.M «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application», thèse de doctorat, Université de constantine, 2012.
- [71] Saidani.A, « Amélioration de la technique d'extraction de maximum de puissance du système photovoltaïque basé sur la méthode (P&O) », mémoire de master, Université de M'sila 2015
- [72] Makhoulf.M «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application», thèse de doctorat, Université de constantine, 2012.
- [73]: Gereige .I, "Contribution des réseaux de neurones dans le domaine de l'ellipsométrie. Application à la scatterométrie", thèse de doctorat, université de Saint-Étienne, 2008

- [74] : R. Tahar «Application de l'intelligence artificielle au problème de la stabilité transitoire des réseaux électriques», Thèse magister.
- [75]: Mrabti .T, El Ouariachi.M, Kassmi.K et Tidhaf .B, " Characterization and Modeling of the Optimal Performances of the Marketed Photovoltaic Panels ", Moroccan Journal of Condensed Matter MJCM, Vol. 12, Issue 1, pp. 7 – 13, 2010.
- [76] : Loukriz .A, "optémisation de la modélisation et de la commande d'un système PV par la technique d'intelligence artificielle",Uémoir de magister,Université de M'sila,2014
- [77] : Azouz .H, Zouhir .B, "diagnostic des défaillances par la technique de réseau de neurone artificiel appliqué sur la machine synchrone a aimants permanents", Mémoire d'ingénieur, Université de M'sila, 2005.
- [78] :B.A. Sediri, « Commande MPPT à base d'un réseau de neurone artificiel pour un système photovoltaïque », mémoire master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019
- [79] : C. Touzet, "Le réseaux de neurones artificielles. Introduction et connexionisme" livre PDF, 1992.
- [80] : M. Parizeau, "Réseaux de neurones", Livre PDF ,2004.
- [81] : F. Sorin, L. Broussard, P. Roblin, « Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones», Techniques de l'Ingénieur, traité Informatique industrielle Doc:S7582.Constantine 2005.