

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجـمختار - عنابة

Faculté : Sciences de L'Ingéniorat

Département : Électrotechnique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : LICENCE

Intitulé

Étude des panneaux solaires photovoltaïques

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique

Présenté par :

Selman Mohamed Abd Setar

Taibi Mohamed El Amine

Président : Mme Soltani Prof UBMA

Encadreur : Merabet Leila MCA UBMA

Année : 2021

Remercîments et dédicaces

Au nom du DIEU, le grand merci revient de nous avoir aidés à établir ce mémoire de dissertation scientifique.

-Nos remerciements à nos parents qui nous ont aidé moralement, financièrement, et qui étaient toujours patients et compréhensifs envers nous, et qui ont su nous mettre sur rails et nous encourager, encore mille fois merci.

-Nous remercions vivement notre encadreur M^{me} **Merabet Leila**   qui nous exprimons notre gratitude et reconnaissance pour son aide, ses conseils judicieux et sa disponibilité tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

-Nous remercions également notre chef de département ainsi que tous les enseignants.

-Notre grand respect à notre examinateur et au membre de jury qui nous ferons l'honneur d'apprécier notre travail.

-Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé de loin ou de près dans l'élaboration de ce travail.

Résumé

Les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, représente une solution efficace qui peut remplacer les énergies fossiles. Ce type d'énergie est gratuit, inépuisable, propre et sans aucun effet sur l'environnement. Dans ce travail on s'est intéressée à la description du système solaire photovoltaïque et à la validation par simulation d'un des caractéristiques d'un panneau photovoltaïque.

Abstract

Renewable energies, such as photovoltaic energy, represent an efficient solution that can replace fossil fuels. This type of energy is free, inexhaustible, clean and has no effect on the environment. In this work we are interested in the description of the photovoltaic solar system and the validation by simulation of one of the characteristics of a photovoltaic panel.

ملخص

تمثل الطاقات المتجددة ، مثل الطاقة الكهروضوئية ، حلاً فعالاً يمكن أن يحل محل الوقود الأحفوري. هذا النوع من الطاقة مجاني ، لا ينضب ، نظيف وليس له تأثير على البيئة. في هذا العمل ، نحن مهتمون بوصف النظام الشمسي الكهروضوئي والتحقق من صحته عن طريق محاكاة إحدى خصائص الألواح الكهروضوئية.

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralités sur les différents types d'énergies renouvelables

Fig I.1 Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique .

Fig I.2 L'effet photovoltaïque

Fig I.3 les différents composants d'une éolienne

Fig 1.4 L'énergie hydraulique

Fig I.5 L'énergie de la biomasse

Chapitre 2 : Système solaire photovoltaïque

Fig II.1 principe de l'énergie photovoltaïque

Fig II.2 cellules en silicium monocristallin

Fig II.3 cellules en silicium poly-cristallin

Fig II.4 Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

Fig II.5 Schéma équivalent d'une cellule PV couplé à un récepteur

Fig II.6 Caractéristique courant tension de N_s cellule en série

Fig II.7 caractéristique courant tension de N_p cellule en parallèle

Fig II.8 Protection d'un module par diode by-pass

Fig II.9 Protection d'un module par diode anti-retour

Fig II.10 Caractéristiques électriques d'une cellule

Fig II.11 Installation hors réseau

Fig II.12 Installation raccordée au réseau

Fig II.13 Installation avec injection de surplus

Fig II.14 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

Fig II.15 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale

Fig II.16 : Schéma électrique d'un hacheur buck.

Fig II.17 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

Fig II.18 Schéma électrique d'un hacheur boost

Chapitre 3 : Modélisation du panneau photovoltaïque

Fig III.1 Modèle équivalent d'une cellule

Fig III.3 Paramètres électriques du PV

Fig III.3 Modèle du GPV par MATLAB/Simulink.

Fig III.4.a courbes du PV pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et $1000\text{W}/\text{m}^2$

Fig 1.b Influence de la variation d'éclairement sur les courbes du PV ($T = 25^{\circ}\text{C}$)

Figure III.5 Effet de la variation de la température sur les caractéristiques du GPV (à $1000\text{ W}/\text{m}^2$)

Liste des tableaux

I-1 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :

I-2 Avantages et les inconvénients du système solaire photovoltaïque

I-3 Avantages et les inconvénients du système éolienne :

I-4 Avantages et les inconvénients de L'énergie hydraulique

I-5 Avantages et les inconvénients de L'énergie biomasse

III-1 Paramètres électriques du panneau PV sous des conditions standard

Symboles et abréviations

G source de courant *parfaite* (A).

D diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un sens.

R_{sh} est une résistance *shunt* qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui interviennent entre les bornes opposées positive et négative d'une photopile, (Ω).

R_s est une résistance *série* qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance intrinsèque des couches, résistance des contacts(Ω)).

R_u est l'impédance du récepteur qui impose le point de fonctionnement sur la photopile en fonction de sa caractéristique courant tension à l'éclairement considéré (dans le cas où le récepteur est assimilable à un résistor (Ω)).

V_{co} : La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série (V).

I_{cc} : La somme des courants de court-circuit de N_p cellule en parallèle (A)

V_{MPP} : tension au point maximal de puissance (V).

I_{MPP} : courant au point maximal de puissance (A).

P_{MPP} : puissance maximale du PV (W).

Tables des matières

| | |
|------------------------------|----------|
| Introduction générale | I |
|------------------------------|----------|

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES DIFFERENTS TYPES D'ENERGIES RENOUVELABLES

| | | |
|------------|------------------------------|-----------|
| 1.1 | Introduction | 1 |
| 1.2 | L'énergie solaire | 1 |
| 1.2.1 | Le Solaire Thermique | 2 |
| 1.2.2 | Le solaire photovoltaïque | 3 |
| 1.3 | L'énergie éolienne | 5 |
| 1.4 | L'énergie Hydraulique | 8 |
| 1.5 | L'énergie biomasse | 9 |
| 1.5.1 | Le Biogaz | 10 |
| 1.5.2 | Le biocarburant | 11 |
| 1.6 | Conclusion | 12 |

CHAPITRE 2 : SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE **30**

| | | |
|------------|--|-----------|
| 2.1 | Introduction | 13 |
| 2.2 | Principe de fonctionnement | 13 |
| 2.4 | Les différents types de technologies de cellules photovoltaïque | 14 |
| 2.4.1 | Silicium monocristallin | 14 |
| 2.4.2 | Silicium polycristallin (multicristallin) | 15 |
| 2.4.3 | Silicium amorphe | 15 |
| 2.5 | Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque | 16 |
| 2.6 | De la cellule au module photovoltaïque | 17 |
| 2.6.1 | Groupement des cellules en série | 17 |
| 2.6.2 | Groupement des cellules en parallèle | 17 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 2.7 | Caractéristiques électriques d'une cellule | 19 |
| 2.8 | Types d'installations photovoltaïque | 20 |
| 2.8.1 | Installation hors réseau | 20 |
| 2.8.2 | Installation raccordée au réseau | 21 |
| 2.9 | Principe du MPPT | 22 |
| 2.10 | Taype des hacheurs | 25 |
| 2.10.1 | Hacheur Buck | 25 |
| 2.10.2 | Hacheur Boost | 26 |

| | | |
|------------|-------------------|-----------|
| 2.9 | Conclusion | 28 |
|------------|-------------------|-----------|

CHAPITRE 3 : MODELISATION D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.1 | Introduction | 29 |
| 3.2 | Modélisation de la cellule photovoltaïque | 29 |
| 3.3 | Influence de la variation de l'éclairement sur les caractéristiques du PV | 32 |
| 3.4 | Influence de la variation de température sur les caractéristiques du PV | 33 |
| 3.5 | Conclusion | 34 |
| | Conclusion générale | 35 |
| | Références | 37 |

Introduction générale

La grande partie de l'énergie consommée par l'homme provient des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...etc.) dont l'utilisation massive conduit à l'épuisement de ses réserves et suppose une menace réelle à l'environnement, qui se manifeste, principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

D'autre part, il y a inégalité extrême de la distribution de la consommation de l'énergie. Beaucoup de populations, spécialement dans les zones rurales isolées des pays en voie de développement qui bénéficient d'un fort ensoleillement, sont confrontées à de grands problèmes pour satisfaire leurs besoins en énergie.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) de par ses caractéristiques de modularité qui permet de l'adapter à des besoins énergétiques divers, autonomie, fiabilité et viabilité sur le plan économique, permet d'apporter de réelles solutions telles que l'éclairage public et domestique, le pompage d'eau pour la consommation et l'irrigation, ...etc.

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite.

L'énergie produite par le photovoltaïque est de nature continue ce qui n'est pas adéquat dans le cas où on veut raccorder ce dernier avec le réseau de distribution. Pour cela il faut concevoir un système capable de transformer l'énergie continue en énergie alternatif, cette conversion se passe par le biais d'un onduleur commandé en modulation de largeur d'impulsion afin de contrôler l'amplitude, la fréquence et la phase du courant injecté dans le réseau.

Ce travail est organisé en trois chapitres :

Dans le chapitre I, nous avons présenté des généralités sur la technologie du système photovoltaïque.

Le deuxième chapitre, présente une explication technique de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, autrement dit « l'effet photovoltaïque ». Nous avons détaillé les

caractéristiques électriques des cellules solaires et la méthode de couplage entre le générateur photovoltaïque et la charge. La composition générale d'un système photovoltaïque.

Ensuite dans le chapitre III nous avons fait l'étude et la simulation par MATLAB-SIMULINK. Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude.

CAPITRE 1

Généralités sur les différents types d'énergies renouvelables

Chapitre 1 : Généralités sur les différents types d'énergies renouvelables

1-1 Introduction :

L'énergie est dite renouvelable quand il s'agit de sources reconstituées naturellement, plutôt que de l'énergie non renouvelable qui épuise ses stocks. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont fortement augmenté ces dernières années. Au cours des 20 prochaines années, tout système énergétique durable dépendra d'une utilisation rationnelle des sources traditionnelles et d'une utilisation accrue de l'énergie.

La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sécurité aux consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, les sources aléatoires imposent certaines règles en termes de dimensions et d'utilisation des systèmes de récupération d'énergie.

1-2 L'énergie solaire :

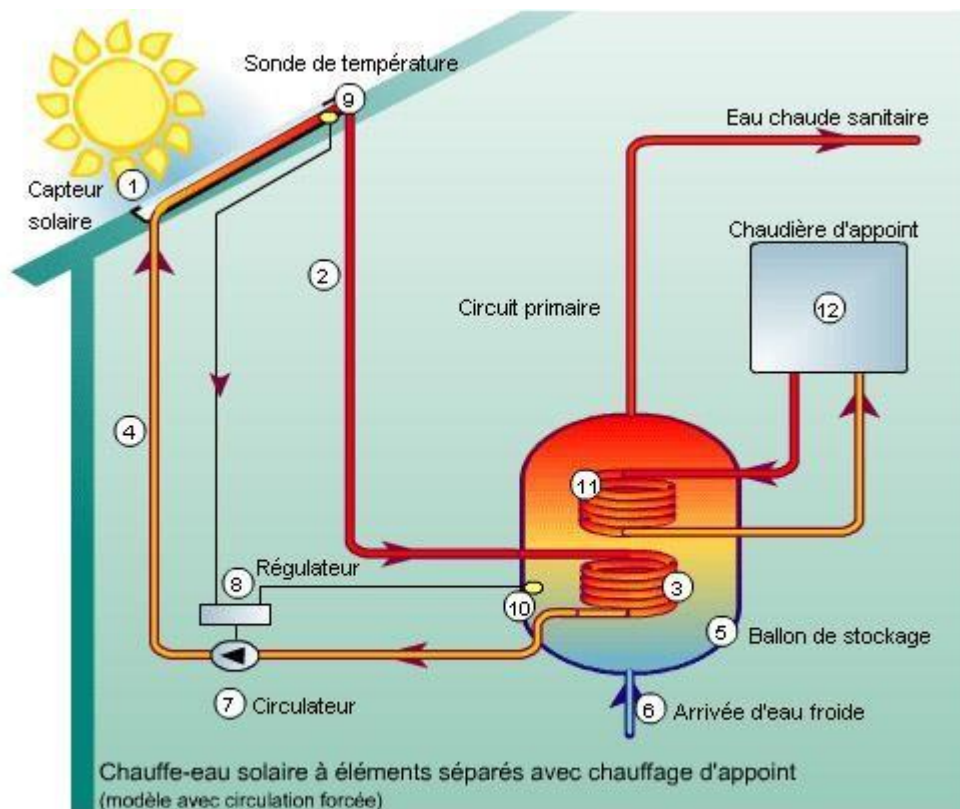
Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. La plupart des utilisations de l'énergie solaire sont directes, comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau .

Il existe 3 utilisations de l'énergie solaire :

- **La production de chaleur : le "solaire thermique"**
- **La production d'électricité : le "solaire photovoltaïque"**
- **La production d'un mouvement : le "solaire mécanique".**

1-2-1 Le Solaire thermique :

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, (fig. I.1). Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire. Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud). L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétiques d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [1].



Chauffe eau solaire individuel «CESI» (source : Ademe)

Fig I.1 Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique [1].

L-1 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :

| Avantages | Inconvénients |
|---|--|
| ✓ permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement, | - Généralement limité au chauffage de l'eau chaude sanitaire ; |
| ✓ ce qui peut se révéler intéressant pour des collectivités qui voudraient | - L'énergie solaire thermique reste une énergie coûteuse par rapport au |
| ✓ maîtriser leurs dépenses telles que les piscines très énergivores ; | - chauffage par énergie fossile à cause d'investissements assez lourds. |
| ✓ Source d'énergie inépuisable ; | - Retour sur investissement assez long (en moyenne 10 à 15 ans). |
| ✓ Gros potentiel de développement | - Durée de vie des panneaux généralement limitée à 20 ans. |
| ✓ Rendement élevé (jusqu'à 80%) | - Certains panneaux sont très sensibles et peuvent être endommagés par certaines conditions météorologiques (grêle, gel...). |

1-2-2 Le Solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité) [2].

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés": Si l'électron revient à son état initial,

l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [4].

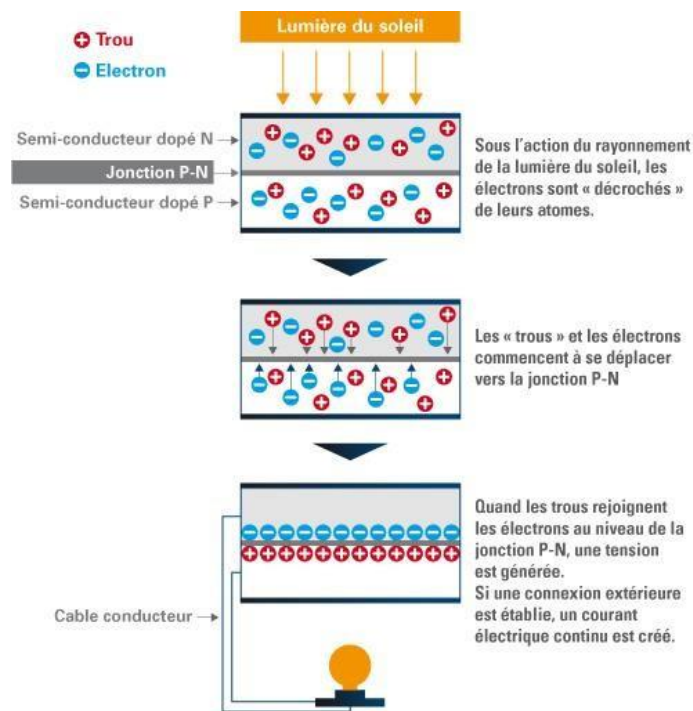


Fig I.2 L'effet photovoltaïque

I-2 Avantages et les inconvénients du système solaire photovoltaïque :

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Energie électrique non polluante à l'utilisation et s'inscrit dans le principe de développement durable ✓ Source d'énergie renouvelable car inépuisable à l'échelle humaine ✓ Utilisables soit dans les pays en voie de développement sans réseau électrique important soit dans des sites isolés tels qu'en montagne où il n'est pas possible de se raccorder au réseau électrique national. | <ul style="list-style-type: none"> - Coût dépendant de la puissance de crête ; - Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance ; - Marché très limité mais en développement ; - Production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande chez les particuliers se fait la nuit ; - Le stockage de l'électricité est quelque chose de très difficile avec les technologies actuelles (coût écologique des batteries très élevé) - Durée de vie : 20 à 25 ans, après le silicium "cristallisé" rend inutilisable la cellule [5]; - Pollution à la fabrication : certaines études prétendent que l'énergie utilisée pour la fabrication des cellules n'est jamais rentabilisée durant les 20 années de production ; Même en fin de vie, le recyclage des cellules pose des problèmes environnementaux. |

1-3 L'énergie éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée

depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotoret installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement

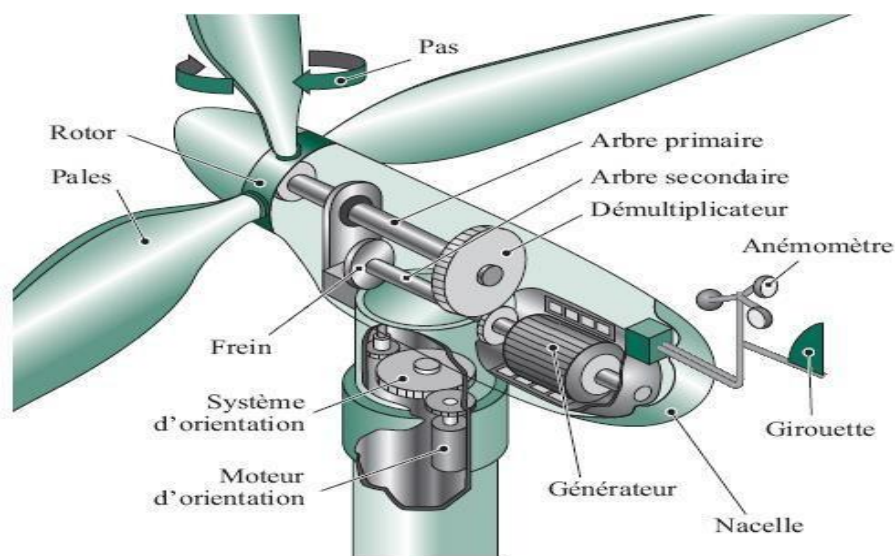


Fig I.3 les différents composants d'une éolienne

- **Le Rotor** : Le rotor d'une éolienne moderne de 1 MW et plus (les pales et le moyeu) tourne assez lentement, environ 16 tours par minute. L'arbre contient des tuyaux pour le système hydraulique permettant l'opération des freins en cas de vents violents.

- **Les pâles** : Les pales du rotor captent le vent et transfèrent sa puissance au moyeu du rotor. Chaque pale d'une éolienne de 1.5 MW mesure environ 30 à 35 m de long et sa conception ressemble beaucoup à celle des ailes d'un avion.

- **Multiplicateur** : Il relie l'arbre lent à l'arbre rapide en augmentant au passage de plus de 100 fois la vitesse de rotation.

- **Génératrice** : La génératrice est l'endroit où l'énergie cinétique (du mouvement) se transforme en énergie électrique.

-Mécanisme d'orientation de la nacelle : C'est un moteur qui veille à ce que l'éolienne soit toujours placée face au vent. Il est commandé par le système de contrôle, un ordinateur qui surveille en permanence l'état de la machine et celui de son environnement et à l'aide de la girouette qui indique la direction du vent et l'anémomètre qui en montre la vitesse.

-Frein : Il permet d'immobiliser le rotor de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est trop élevée, en cas d'urgence ou lors des travaux d'entretien.

L3 Avantages et les inconvénients du système éolienne :

| Avantages | Inconvénients |
|--|---|
| <p>-coût de production relativement faible (200.000 euros environ) par rapport à l'énergie produite</p> <p>-La surface occupée au sol est peu importante</p> <p>-L'énergie éolienne est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules)</p> <p>-surface immense disponible en mer où le vent est pratiquement constant.</p> | <p>-Le vent est une source intermittente, la production d'énergie est donc variable ;</p> <p>-L'installation d'une éolienne nécessite différents critères (vents fréquents, surface suffisante, pas d'obstacles au vent, accès facile, proximité du réseau électrique, pas de contraintes environnementales tels que les monuments historiques, site éloigné des habitations, avoir les autorisations réglementaires) ;</p> <p>-La pollution visuelle et sonore, et la perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige une installation des éoliennes éloignée des habitations</p> <p>-Le coût de production alourdit tout de même le prix total de l'éolienne</p> <p>-Bien que cette énergie soit propre, le coût énergétique de fabrication est très important ;</p> |

1-4 L'énergie hydraulique :

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité. Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui entraîne un alternateur et produit de l'électricité

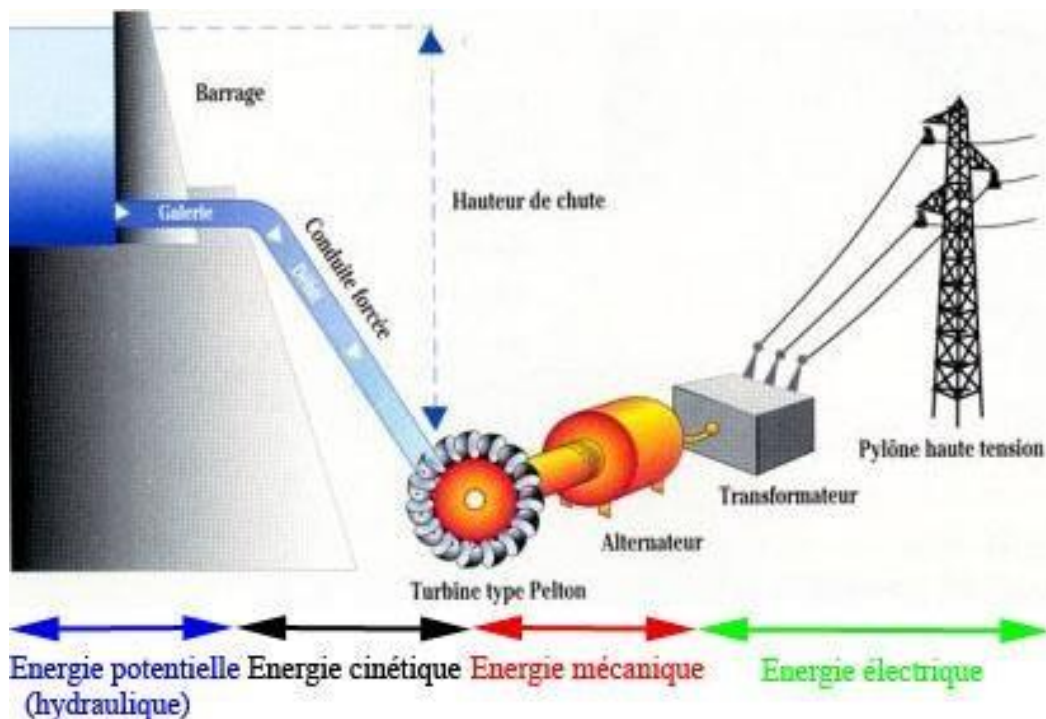


Fig 1.4 L'énergie hydraulique

I-4 Avantages et les inconvénients de L'énergie hydraulique

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">-Production d'énergie active durant les heures de fortes consommations d'électricité.-Pompage durant les heures creuses afin de reconstituer la réserve d'eau dans le bassin de retenu. Ce procédé permet de stocker l'énergie électrique en surplus du réseau en une énergie potentielle qui sera transformée à nouveau.-Démarrage et arrêt des centrales très rapides.-Aucune pollution n'est dégagée lors de la production d'électricité.-Production d'électricité décentralisée (pas de pertes liées aux transports).-Facilité d'entretien et la faible usure du matériel qui travaille à vitesse et à température modéré. | <ul style="list-style-type: none">-Modification du débit et du niveau de l'eau.-Perturbation de la faune et de la flore.-Surcoût lié à la nécessité d'installer des passes à poissons.-Risque pour les personnes en aval lié au barrage. |

1-5 L'énergie de la biomasse :

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets domestiques renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) En 2010, La biomasse représentait 7,5% des énergies produites. On devrait atteindre une part de 10% d'ici 2020. La chaleur produite par la combustion va chauffer un réservoir d'eau qui va alors produire de la vapeur un peu à la manière d'une cocote minute. Cette vapeur d'eau va alors être dégagée à haute pression, ce qui va permettre de faire tourner une turbine reliée à un alternateur. C'est cet alternateur qui va permettre de produire l'électricité. Ce qui est intéressant dans les centrales à biomasse, c'est surtout celles qui permettent de produire de l'électricité à partir des éléments dont nous n'avons plus besoin

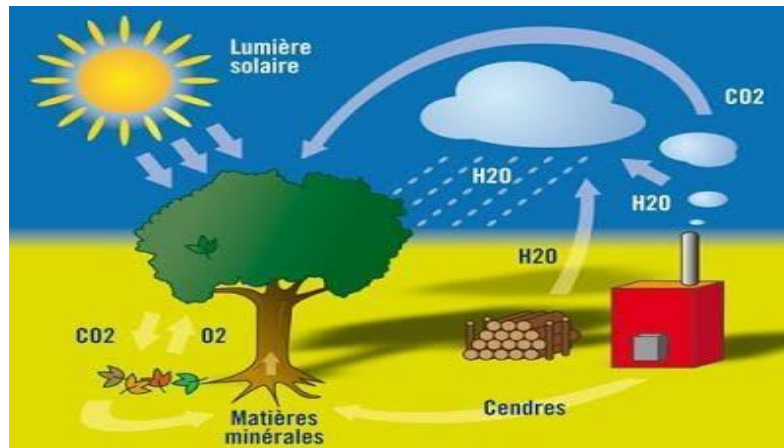


Fig I.5 L'énergie de la biomasse

1-5-1 Le Biogaz :

Le biogaz est un gaz composé de dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4) combustible, d'hydrogène sulfuré (H_2S) et de vapeur d'eau. Les proportions dépendent des déchets traités [7] :

- CH_4 de 50% à 90%
- CO_2 de 10% à 40%
- H_2S de 0.0% à 0.1%

Le biogaz peut produire de la chaleur (dans des chaudières) ou de l'électricité (groupe électrogène) ou les deux en même temps (cogénération). Il peut également servir de carburant pour les véhicules ou être injecté dans des réseaux de gaz naturel.

Une fois le biogaz capté ou produit, autant le valoriser le plus efficacement possible. Différentes voies sont envisageables :

- Production de la Chaleur
- Production de l'électricité
- Production des biocarburants.

1-5-2 Le biocarburant

Un biocarburant est un carburant issu de la biomasse, c'est-à-dire obtenu à partir d'une matière première végétale (animale ou de déchets). Les biocarburants sont en général mélangés à des carburants d'origine fossile. On distingue trois générations de biocarburants :

- **Les biocarburants de première génération** : Les biocarburants de première génération entrent en concurrence directe avec la chaîne alimentaire. Ils sont produits à partir de matières premières qui peuvent être utilisées dans une chaîne alimentaire animale ou humaine.
- **Les biocarburants de deuxième génération** : Des technologies sont actuellement mises au point pour exploiter les matières cellulosiques telles que le bois, les feuilles et les tiges des plantes ou celles issues de déchets. Ces technologies permettent de produire du bioéthanol dit de deuxième génération, du biodiesel, du bio hydrogène ou du biogaz.
- **Les biocarburants de troisième génération** : Les procédés, encore à l'étude, s'appuient principalement sur l'utilisation de microorganismes tels que les micros algues.

Celles-ci peuvent accumuler des acides gras permettant d'envisager des rendements à l'hectare supérieurs d'un facteur 30 aux espèces oléagineuses terrestres. A partir de ces acides gras, il est possible de générer du biodiesel. Certaines espèces de micro algues peuvent contenir des sucres et ainsi être fermentées en bioéthanol. Enfin, les micros algues peuvent être méthanisées pour produire du biogaz. Certaines d'entre elles peuvent également produire du bio hydrogène.

L-5 Avantages et les inconvénients de L'énergie biomasse

| Avantages | Inconvénients |
|--|---|
| -valorisation de déchets organiques. -valorisation des ressources locales (élevages agricoles, industries...) -diminution du volume de matière organique et désodorisation des déchets. -valeur fertilisante du déchet agricole conservée et donc valorisable en agriculture. | La matière organique utilisée pour la production de biogaz n'est plus disponible pour régénérer l'humus du sol. |

1-5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une description générale sur les différents moyens de production d'énergie électrique d'origine renouvelables. Chaque type d'énergie renouvelable proposé présente des avantages et bien évidemment des inconvénients ce qui permet d'introduire au chapitre II (L'énergie solaire photovoltaïque)

CHAPITRE 2

Systeme solaire photovoltaïque

Chapitre 2 : Système solaire photovoltaïque

2.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique, l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmont Becquerel en 1839. Selon les estimations l'énergie rayonnée par le soleil représenterait chaque année 40 000 fois les besoins énergétiques que l'humanité consomme sous forme d'énergies fossiles. Malgré cela, l'énergie solaire reste un domaine assez peu exploité. Néanmoins la prise de conscience collective en fait une énergie douce d'avenir (même si elle est connue et utilisée depuis des millénaires). Aujourd'hui le solaire photovoltaïque est en plein développement, on obtient un cumul de 1791 MWc en 2005 pour l'Europe (contre 1147 MWc en 2004). Le leader européen est l'Allemagne avec 1537 MWc

2.3 Principe d'une cellule photovoltaïque:

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (fém.) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque [5].

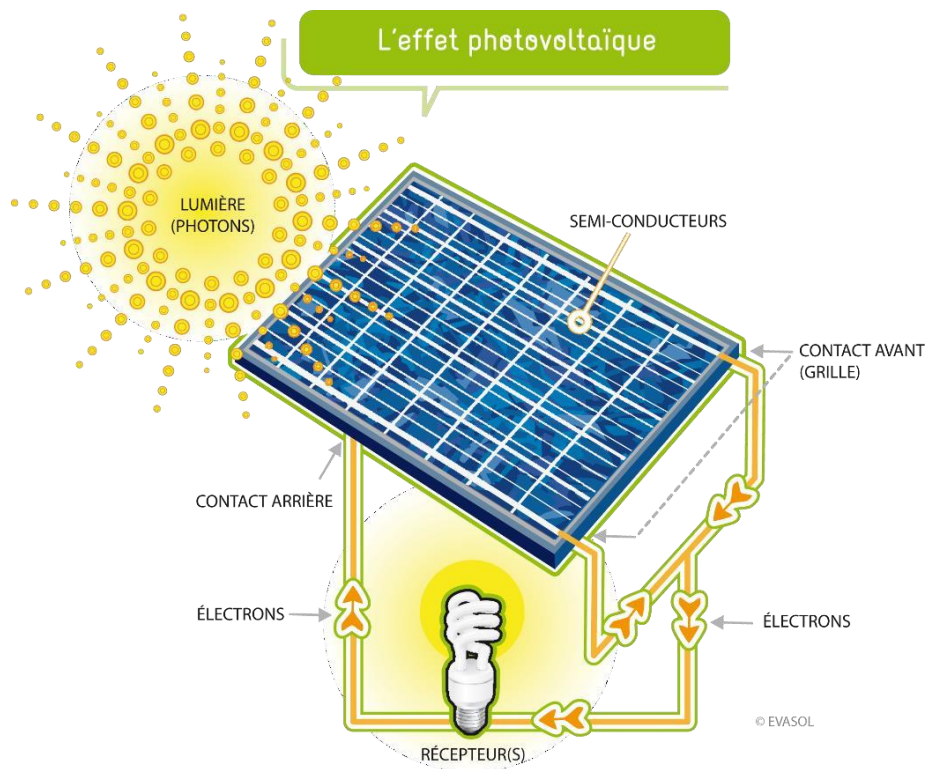


Fig II.1 principe de l'énergie photovoltaïque

2.4 Les différents types de technologies de cellules photovoltaïques :

2.4.1 Silicium monocristallin :

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.



Fig II.2 cellules en silicium monocristallin

2.4.1 silicium poly-cristallin :

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser.

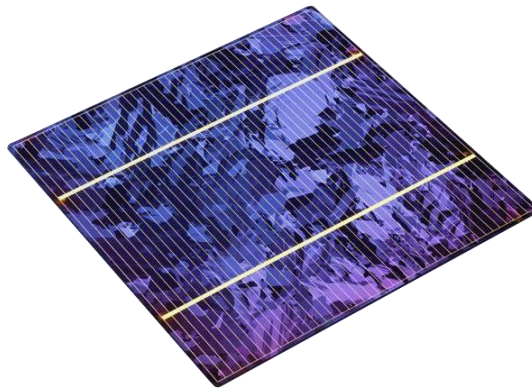


Fig II.3 cellules en silicium poly-cristallin

2.4.3 silicium amorphe :

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin; les cellules sont constituées par des couches très minces



Fig II.4 Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

2.5 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances [6].

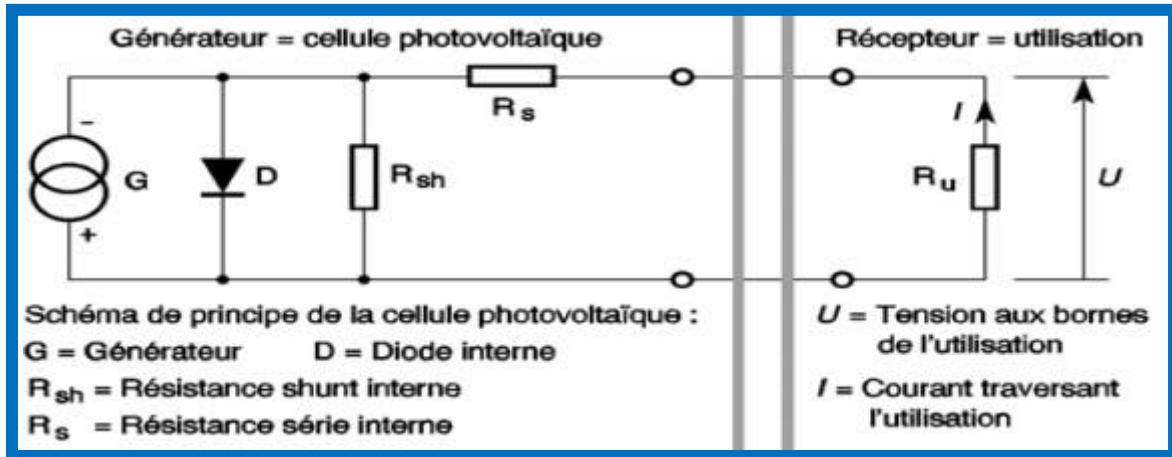


Fig II.5 Schéma équivalent d'une cellule PV couplé à un récepteur

G : est une source de courant parfaite.

D : est une diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un sens.

Rsh : est une résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui interviennent entre les bornes opposées positive et négative d'une photopile (micro court-circuit dans le silicium en particulier).

Rs : est une résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance intrinsèque des couches, résistance des contacts).

Ru : est l'impédance du récepteur qui impose le point de fonctionnement sur la photopile en fonction de sa caractéristique courant tension à l'éclairement considéré (dans le cas où le récepteur est assimilable à un résistor).

2.6 De la cellule au module photovoltaïque :

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm² (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle.

2.6.1 Groupement des cellules en série :

Une association de (N_s) cellule en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules.

$$V_{co} = N_s \times V'_{co}; V'_{co} \approx 0.5 \text{ à } 0.6 \text{ (V)}$$

$$I_{cc} = \text{cst};$$

V_{co} : La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série

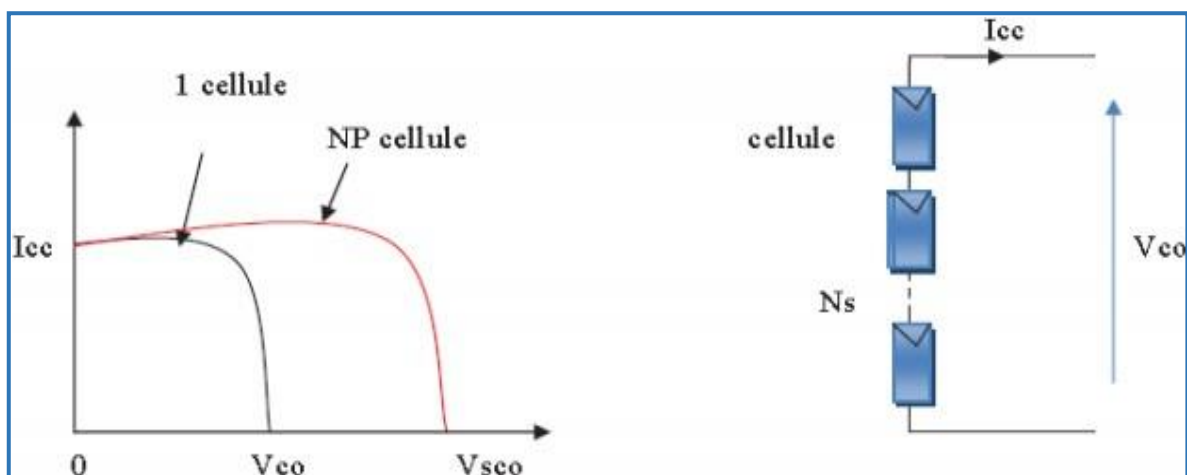


Fig II.6 Caractéristique courant tension de N_s cellule en série

2.6.2 Groupement des cellules en parallèle :

Une association parallèle de (N_p) cellule est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques Connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [8].

$$I_{cc} = N_p \times I'_{cc}$$

$$V_{co} = cst$$

I_{cc} : La somme des courants de court-circuit de N_p cellule en parallèle

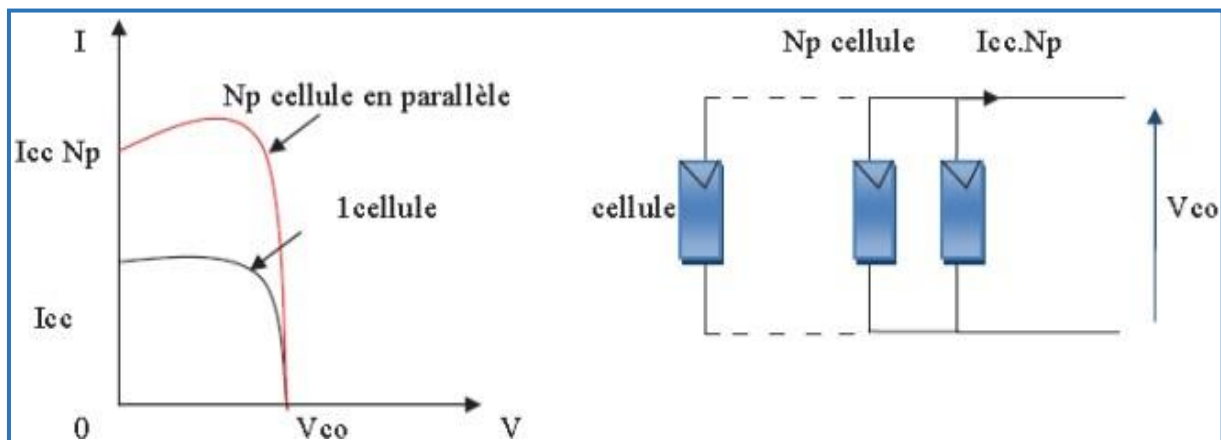


Fig II.7 caractéristique courant tension de N_p cellule en parallèle

A. Diode by-pass :

La diode by-pass est reliée antiparallèlement avec un ensemble des cellules photovoltaïques connectées en séries, pour les protéger du phénomène du point chaud. Lorsque l'état de la diode est bon, elle devient passante et isole les cellules ombragées (la tension aux bornes des cellules ombragées devient négative à cause de l'ombrage). Par contre, dans le cas, où la diode est défectueuse, la protection des cellules PV n'est pas assurée, ce qui mène à la destruction du module PV. On distingue trois types de défauts de la diode by-pass qui sont : diode en court-circuit, en circuit-ouvert, et inversé. Ces défauts, sont causés par l'assemblage des cellules pour construire un module, le transport ou le montage des modules (installation) ou l'humidité [7]

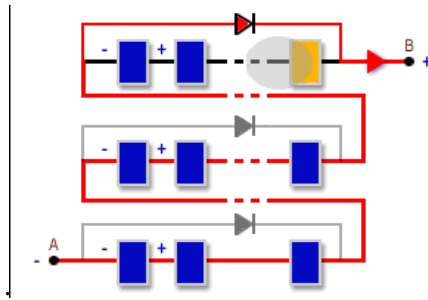


Fig II.8 Protection d'un module par diode by-pass

B. La diode anti-retour :

Le rôle principal de la diode anti-retour dans un champ photovoltaïque est de protéger le string PV contre le courant inverse. L'inversement du courant résulte de la faiblesse de la tension du string ombragé par rapport aux autres strings PV. Dans le cas où la diode est bonne, elle se bloque et isole le string qui n'est pas bien éclairé. Par contre, si elle est défectueuse le string ombragé absorbe le courant produit par les autres strings du champ PV et peut provoquer une défaillance prématurée des cellules

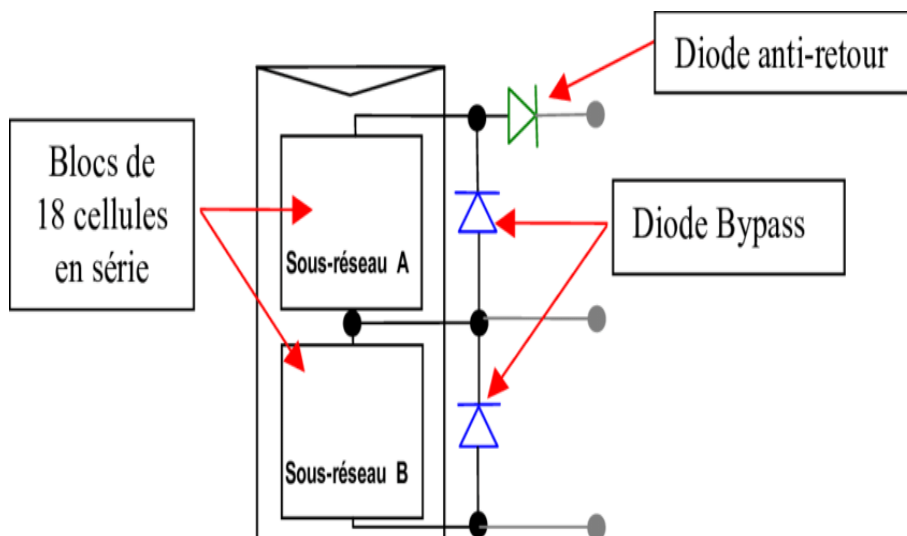


Fig II.9 Protection d'un module par diode anti-retour

2.7 Caractéristiques électriques d'une cellule :

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension

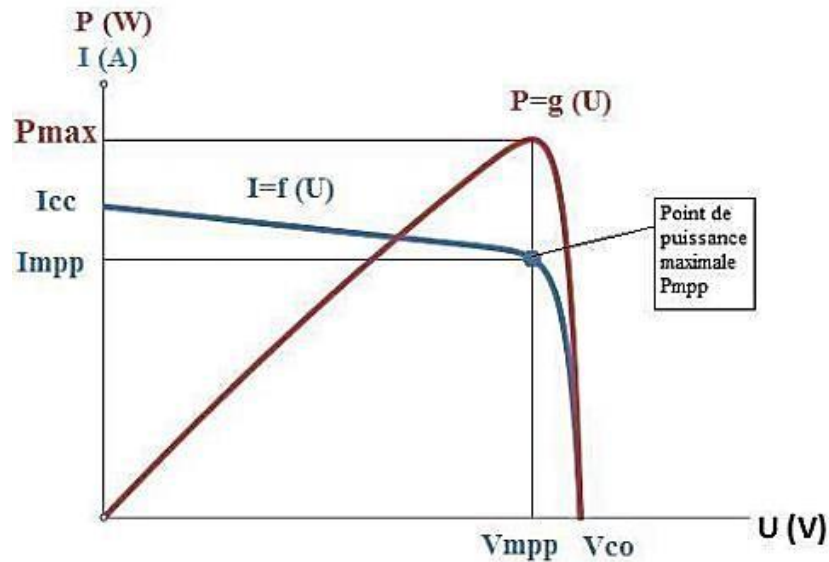


Fig II.10 Caractéristiques électriques d'une cellule

Trois points sont importants sur cette courbe :

- le point de fonctionnement à vide : V_{CO} pour $I = 0A$
- le point de fonctionnement en court-circuit : I_{CC} pour $U = 0V$
- Le point de puissance maximale $PMPP$: c'est la valeur maximale de puissance que peut délivrer une cellule.

2.8 Types d'installations photovoltaïques :

2.8.1 Installation hors réseau

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans

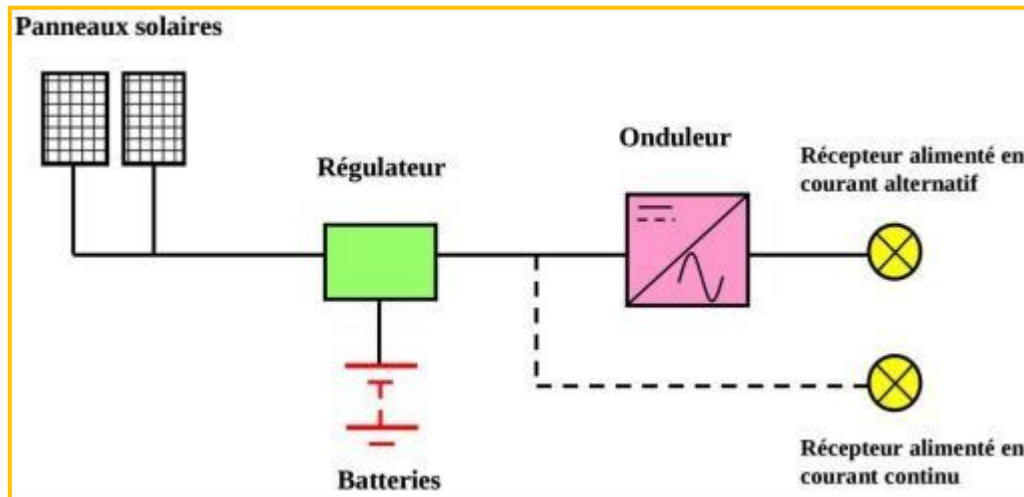


Fig II.11 Installation hors réseau

Des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.

- **Les panneaux photovoltaïques** produisent un courant électrique continu.
- **Le régulateur** optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection.
- **L'onduleur** transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur AC.
- **Les batteries** sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps.

2.8.2 Installation raccordée au réseau :

- **Injection totale de l'énergie électrique :**

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution.

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production),
- le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs :
 - l'un pour la production,
 - l'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé)

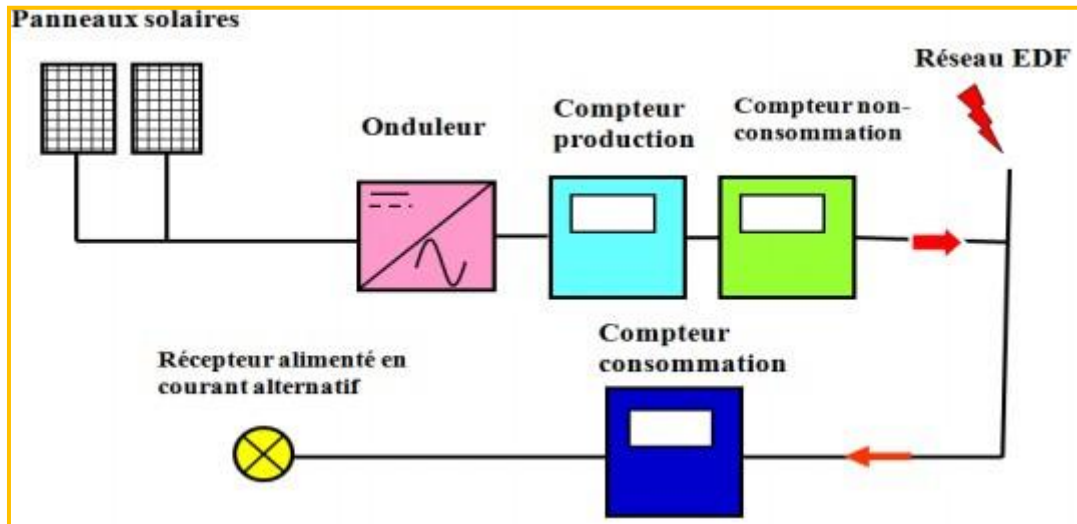


Fig II.12 Installation raccordée au réseau

- **Injection de surplus**

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant

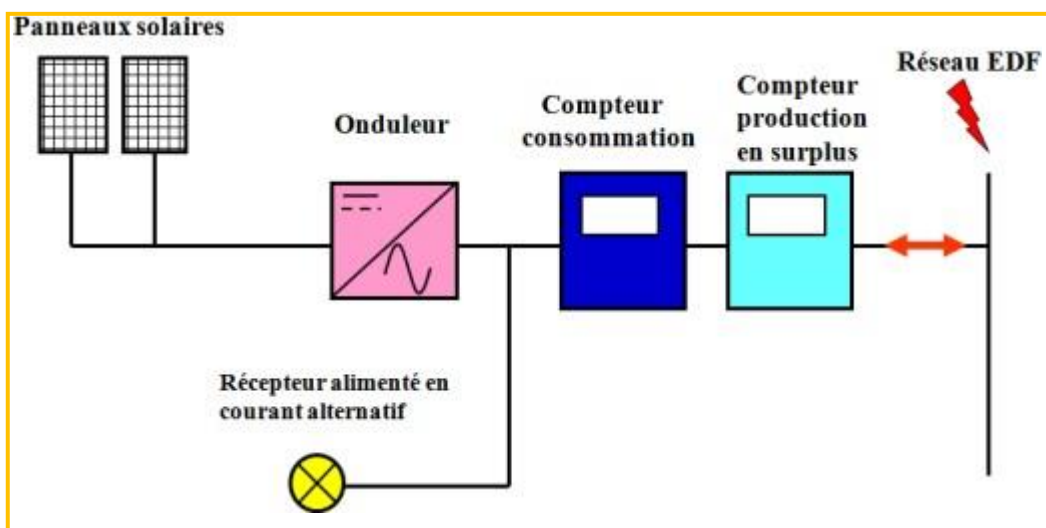


Fig II.13 Installation avec injection de surplus

2.9 .Principe du MPPT :

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

maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). L'adaptation est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (II.14).

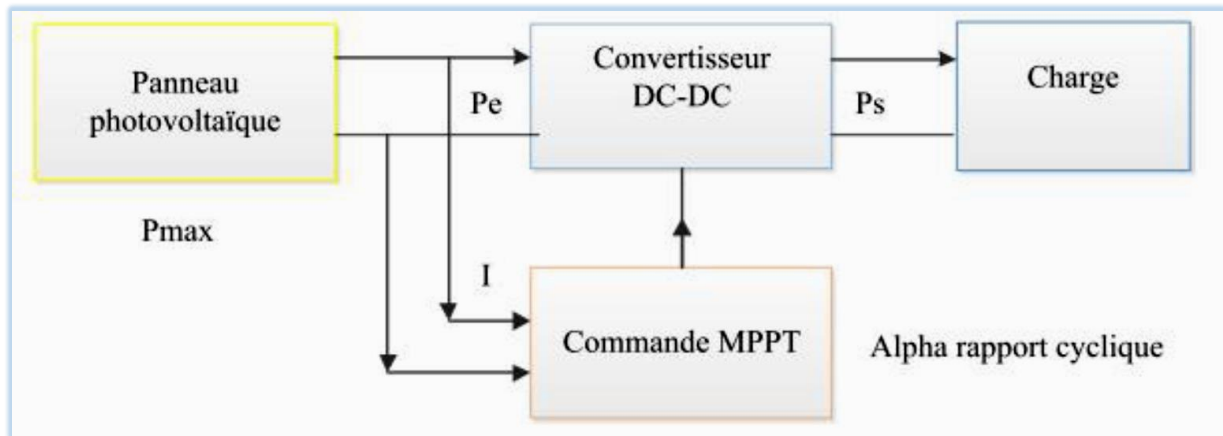


Fig II.14 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir [7].

La figure (II.15) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

- Pour une variation d'ensoleillement (cas a), Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.
- Variations de température de fonctionnement du GPV(cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.
- Pour une variation de charge (cas b).

On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumé, le suivi du PPM réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV.

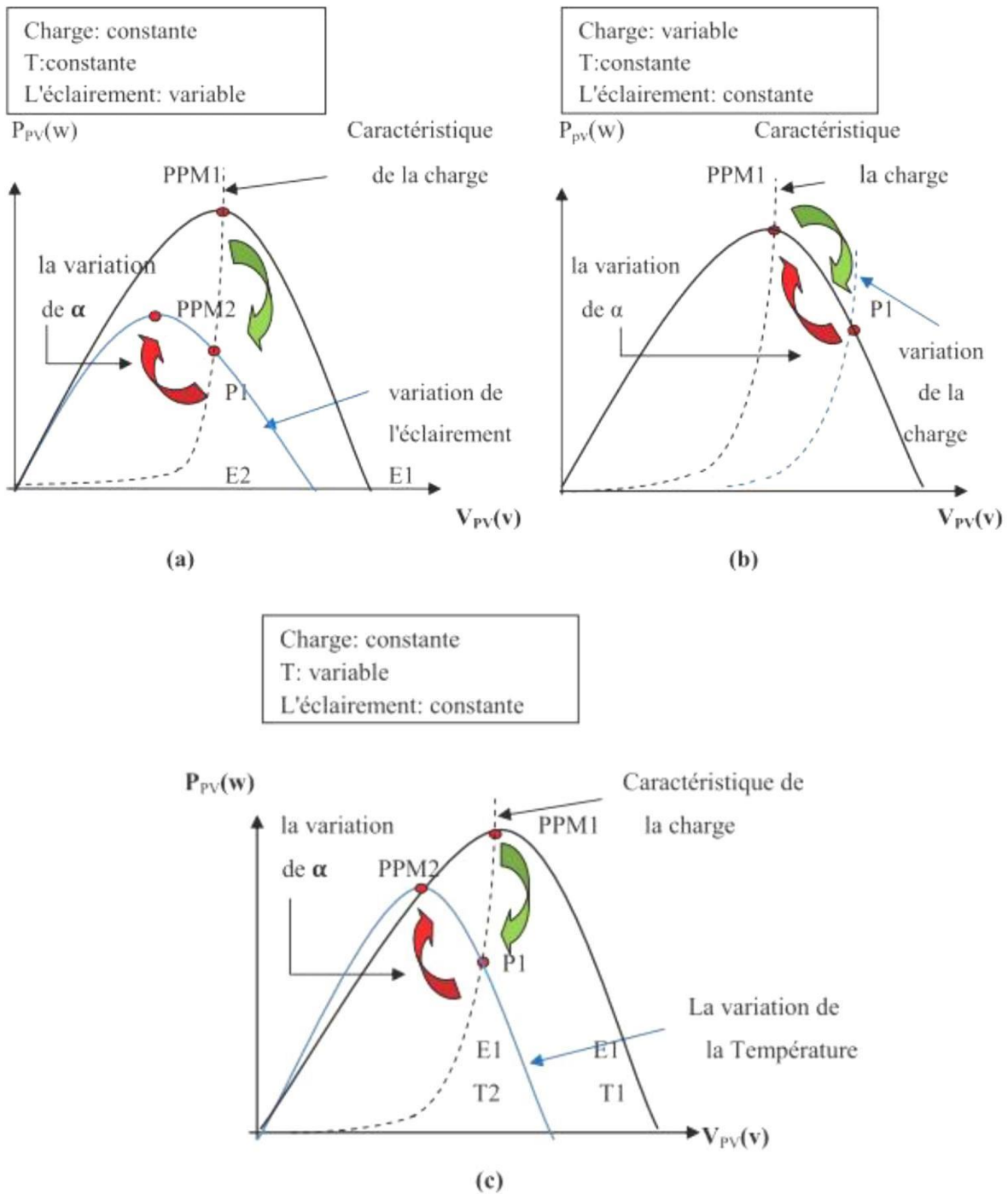


Fig II.15 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale

- a) suite à une variation d'éclairement,
- b) suite à une variation de charge,
- c) suite à une variation de température.

Parmi les techniques MPPT utilisés on trouve ceux classiques tel que P&O (perturber et observer) et la technique MPPT à conductance incrémentale et ceux intelligentes à base de logique floue ou à base réseaux de neurones artificiels.

2.10 Type des hacheurs :

Quatre configurations de base sont :

- Convertisseur abaisseur « BUCK »
- Convertisseur élévateur « BOOST »
- Convertisseur abaisseur- élévateur « BUCK-BOOST »
- Convertisseur « SEPIC », « Cuk »

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions et la topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost, le Cuk, et le Sepic. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC [8].

2.10.1 Hacheur Buck :

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant.

L'interrupteur K figure (II.16) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [9][10].

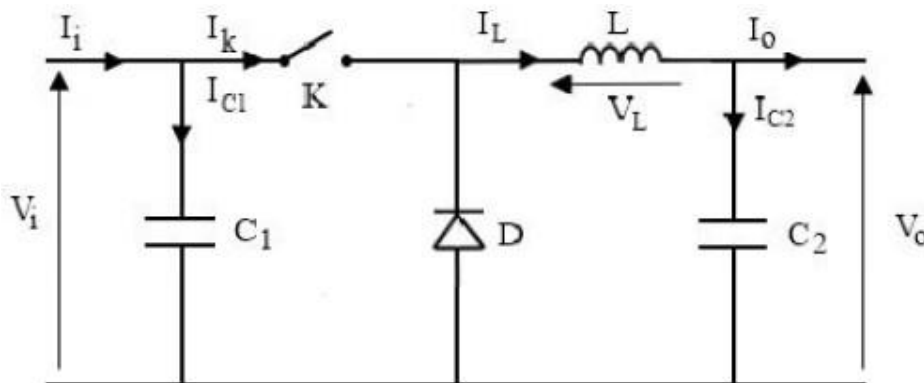


Fig II.16 : Schéma électrique d'un hacheur buck.

On note α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T_e}$. La source V_i fournit

de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle.

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure (II.17) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle.

$$V_0 = \alpha \cdot v_i$$

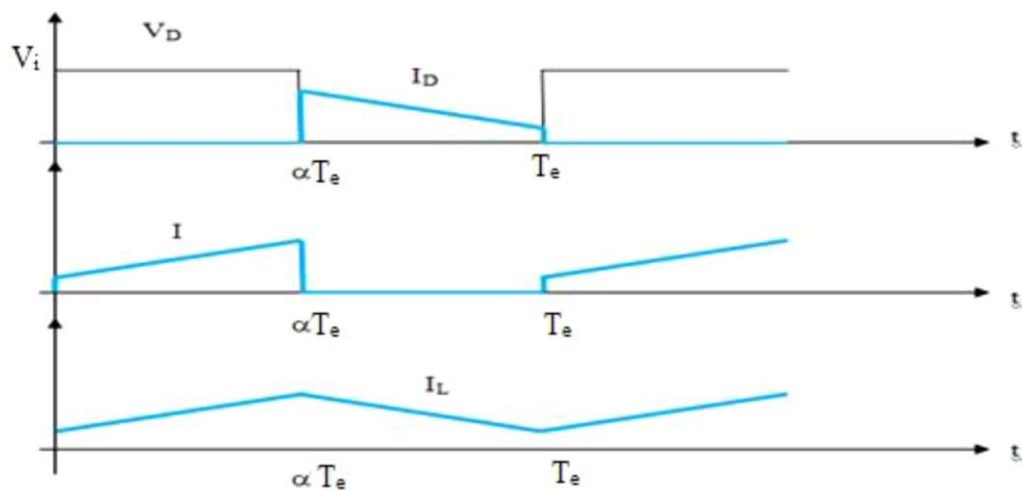


Fig II.17 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

2.10.2.Hacheur boost :

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). Connue aussi sous le nom de

« boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.18).

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

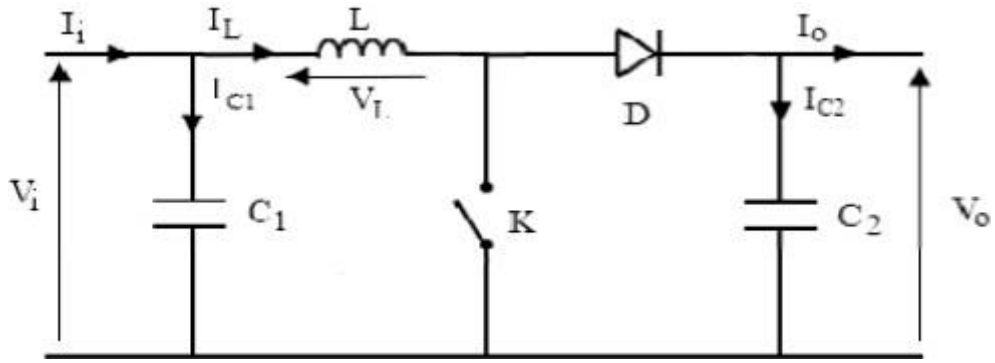


Fig II.18 Schéma électrique d'un hacheur boost

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à

$$V_o(1 - \alpha) = V_i$$

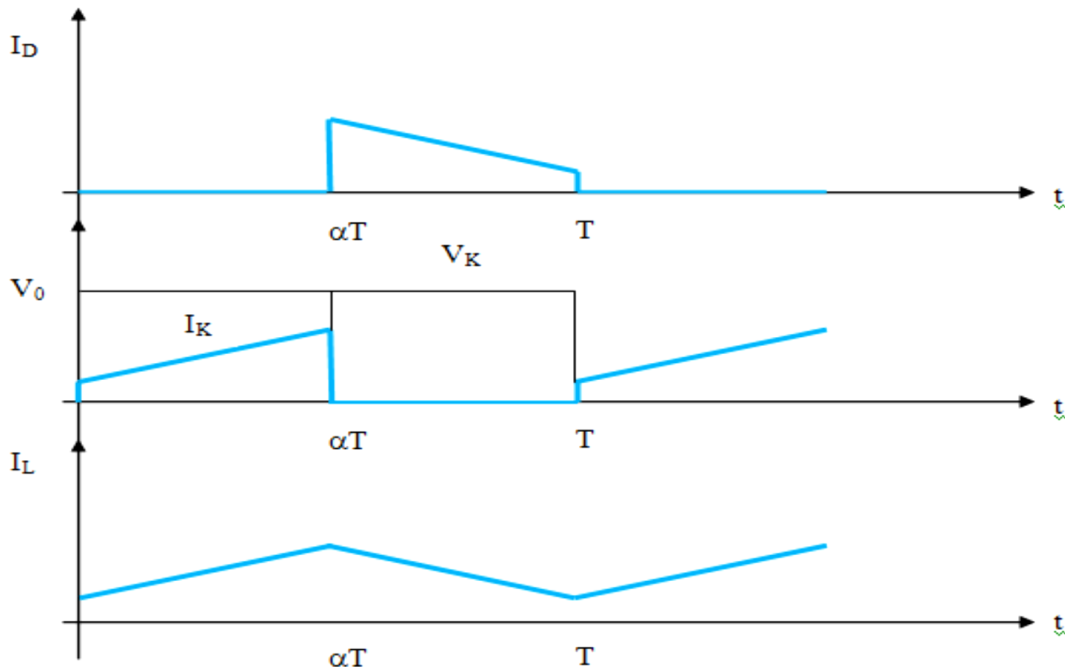


Fig II.19 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

2.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de cellules photovoltaïques. Ensuite le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (l'effet photovoltaïque) est présenté, ainsi que la caractéristique du panneau nous avons présenté les différentes technologies de cellules actuellement sur le marché ou en cours de développement et enfin les différents raccordements au réseau possible des panneaux solaire. De plus on a expliqué le principe de MPPT, ainsi que les types de hacheurs utilisés lors de la poursuite du point maximale de puissance.

CHAPITRE 3

Modélisation du

panneau

photovoltaïque

Chapitre 3 : Modélisation du panneau photovoltaïque

3.1 Introduction

Dans ce chapitre on modélise un panneau photovoltaïque associé à un hacheur dévolteur, alimentant une charge à courant continu.

Pour un ensoleillement homogène et une même température, en associant des cellules photovoltaïques identiques en série on augmente la tension (la tension résultante est la somme des tensions de chaque cellule). Si on les associe en parallèle, on augmente le courant résultant (l'intensité résultante est la somme des intensités de chaque ligne de cellules). Les modules photovoltaïques sont constitués d'un assemblage série/parallèle de cellules élémentaires. Un champ photovoltaïque ou champ solaire est constitué d'un ensemble de modules connectés en série et/ou en parallèle. On protège les modules avec des diodes by-pass afin d'éviter le fonctionnement inverse des cellules occultées, pouvant entraîner une surchauffe voire une destruction de celles-ci

3.2 Modélisation du panneau photovoltaïque :

3.2.1 Modèle équivalent d'une cellule PV :

Le panneau solaire utilisé est de type SUNPOWER SPR-305E WHT-D. Il contient 96 cellules par module. Le tableau 1 donne les paramètres électriques du panneau solaire du PV. L'équation 3.1 donne le modèle mathématique du PV. Figure ci-dessous montre le schéma équivalent d'une cellule PV. Dans le but d'augmenter la tension et le courant ; les cellules sont connectées en série, parallèle ou série- parallèle simultanément.

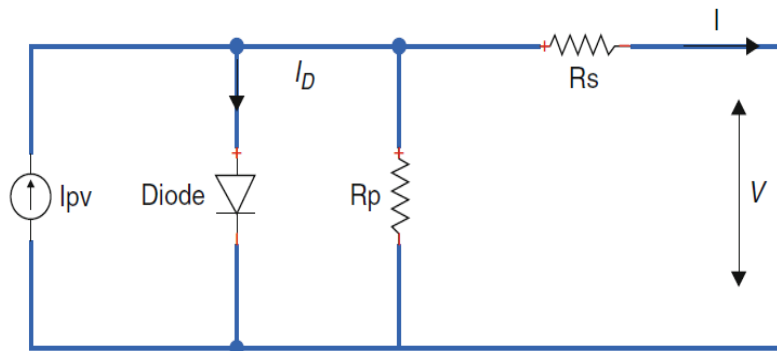


Fig III.1 Modèle équivalent d'une cellule

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V+R_s I}{aV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad 3.1$$

Si la température et l'éclairement sont différents aux conditions standards ($T_n = 25 \text{ °C}$ and $G_n = 1000 \text{ W/m}^2$) ; I_{pv} et I_0 sont calculés à partir des équations (3.2) et (3.3).

$$I_{pv} = (I_{pvn} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad 3.2$$

$$I_0 = \frac{I_{ccn} + K_i \Delta T}{\exp \left(\frac{V_{0cn} + K_v \Delta T}{aV_t} \right) - 1} \quad 3.3$$

Le panneau choisit est de type , Les paramètres du model sont mentionnés dans le tableau ci-dessous.

III.1 Paramètres électriques du panneau PV sous des conditions standard

| | |
|-----------|-----------|
| P_{MPP} | 250.205 W |
| V_{MPP} | 30.7 V |
| I_{MPP} | 8.15 V |
| V_{OC} | 37.3 V |
| I_{CC} | 8.66 V |

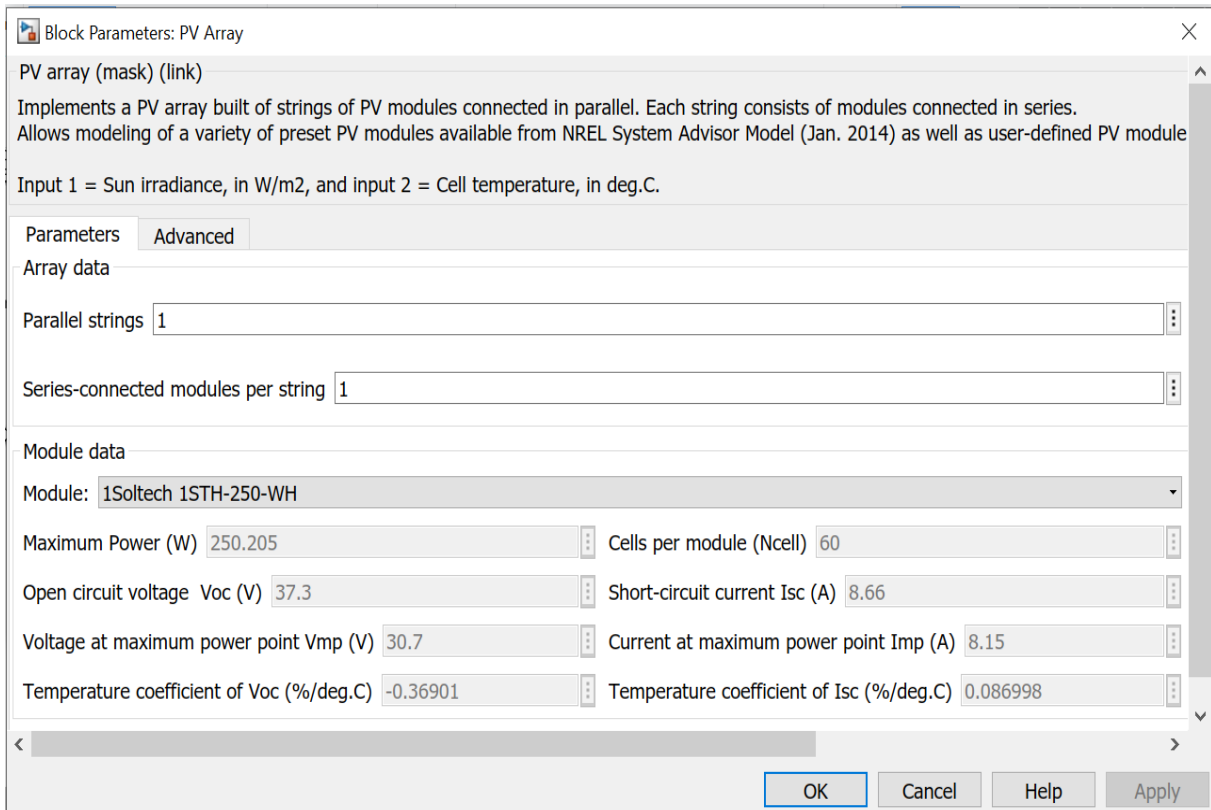


Fig III.3 Paramètres électriques du PV

Le schéma équivalent du panneau PV est **simulé** avec Matlab Simulink tel que représenté sur la figure :

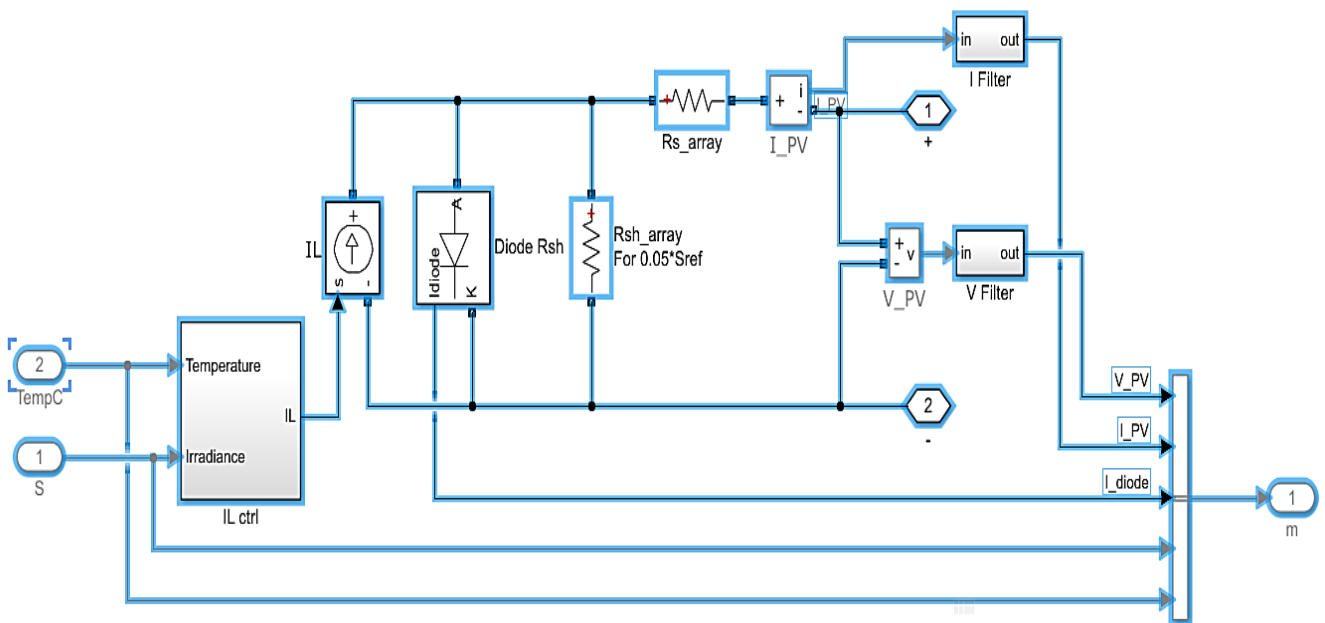


Fig III.3 Modèle du GPV par MATLAB/Simulink.

3.3 Influence de la variation de l'éclairement sur les caractéristiques du panneau PV :

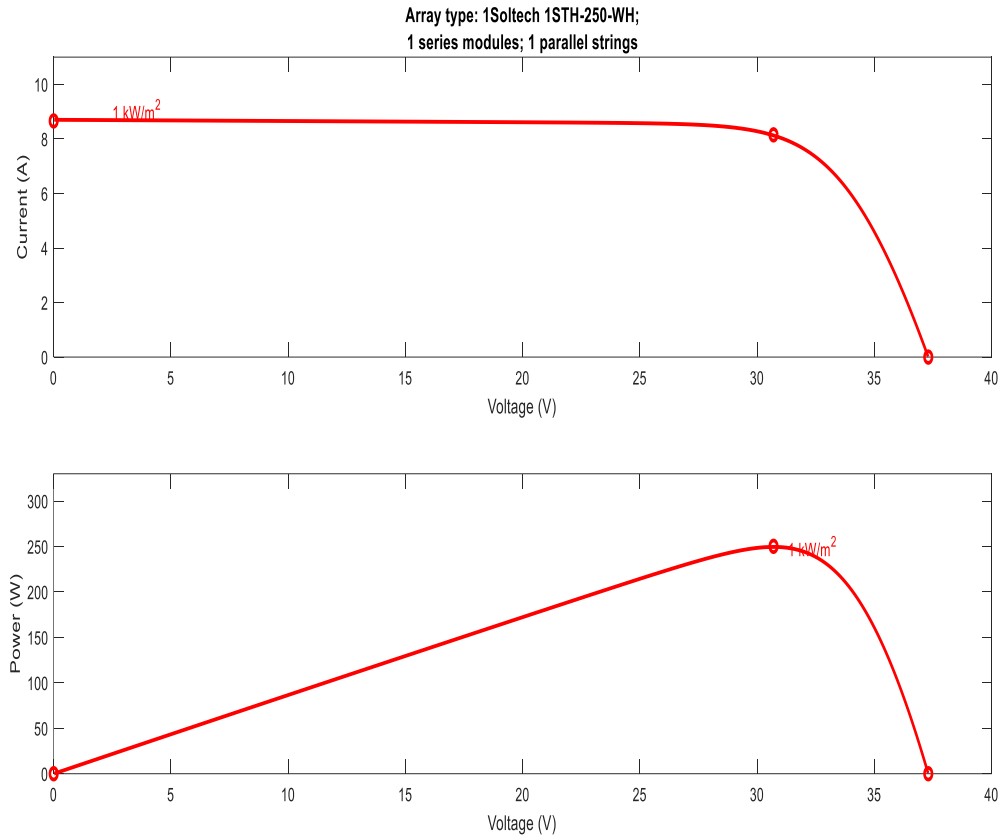


Fig III.4.a courbes du PV pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et $1000\text{W}/\text{m}^2$

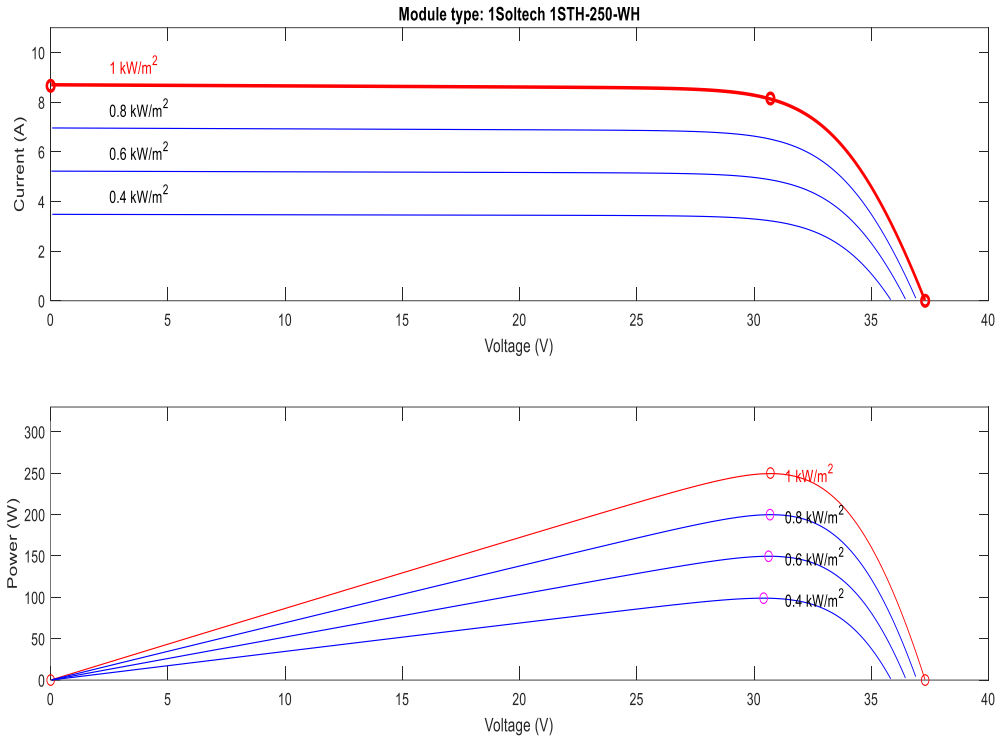


Fig 1.b Influence de la variation d'éclairement sur les courbes du PV (T = 25 °C)

La Figure 3.4.b montre le comportement du panneau PV lorsque l'irradiation est variable. Quand l'irradiation diminue, le point maximal de puissance MPP diminue par rapport à celui représenté dans la figure 3.4.a.

3.4 Influence de la variation de la température sur les caractéristiques du panneau PV :

La figure montre le changement que subissent les caractéristiques I-V and P-V dans le cas de variation de la température.

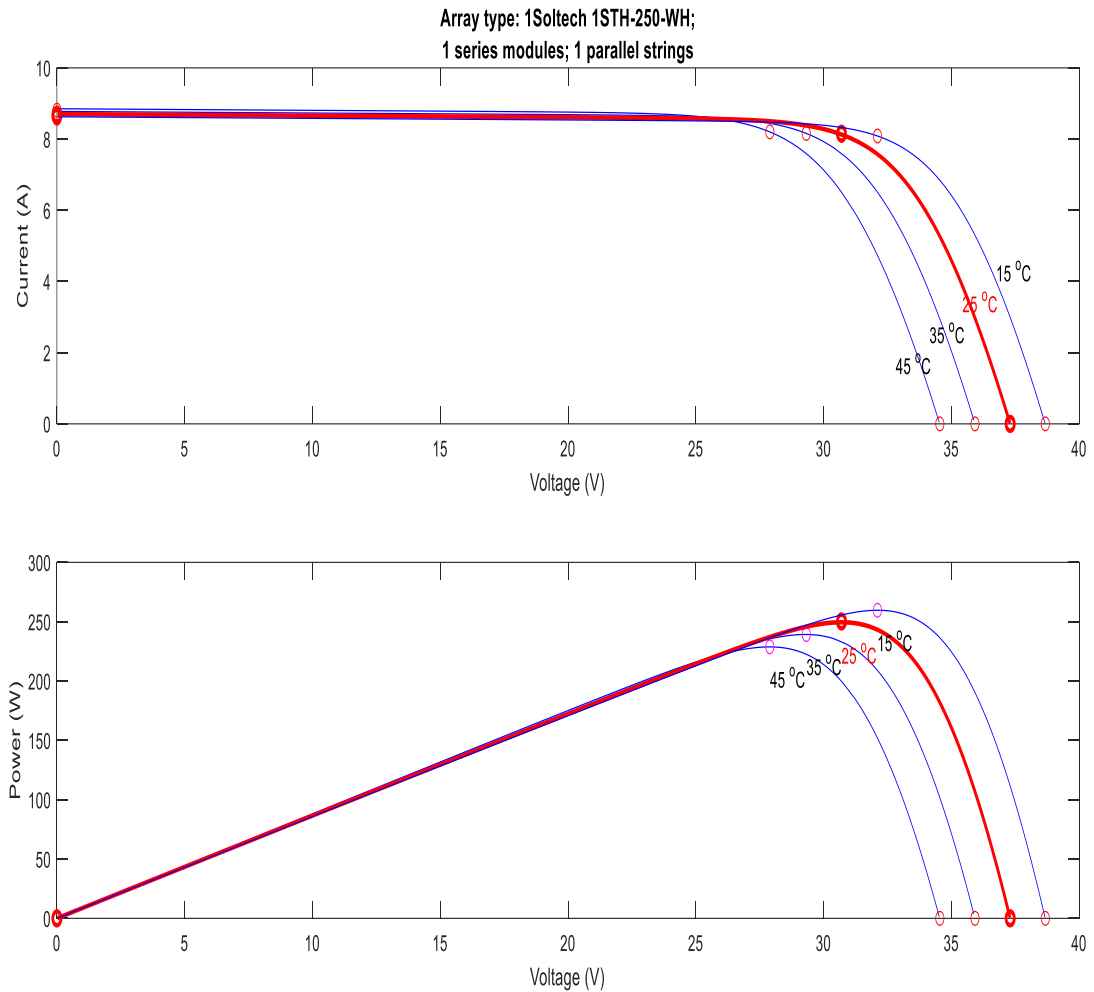


Figure III.5 Effet de la variation de la température sur les caractéristiques du GPV (à 1000 W/m²)

Les courbes de la figure 3.5 montrent que lorsque la température augmente le point MPP diminue. A cet effet la méthode MPPT doit poursuivre le point MPP correspondant au changement de la température et ou l'irradiation.

Si le point de puissance maximale n'est pas atteint, les pertes de puissance dans le panneau PV augmentent.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé à la modélisation du panneau photovoltaïque en utilisant le modèle à une diode. L'influence des variations climatiques sur la puissance maximale extraite du panneau est validée par simulation via le logiciel Matlab Simulink.

Conclusion générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'Uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. A cet effet son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Les résultats montrent que les performances d'un PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température : quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croît, ce qui permet au module de produire une puissance électrique plus importante.

Par contre, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la puissance par suite une baisse du rendement maximal. A cet effet ; comme perspective on propose d'introduire un algorithme MPPT tel que l'algorithme Perturb and Observe, inductance incrémentale ou d'autres pour l'optimisation de la puissance maximale.

Références

[1] : <http://www.energies-renouvelables.org/>

[2] : <http://enrj.renouvelables.free.fr/>

[3] : BRIGITTE VU « choisir une énergie renouvelable adaptée à sa maison », EYEROLLES.

[4] : ANNE LABOURET, PASCAL CUMUNEL « Cellules solaires les bases de l'énergie photovoltaïque », 5^e édition.

[5] : ANNE LABOURET, MICHEL VILLOZ « énergie solaire photovoltaïque », 2^e édition, DUNOD.

[6] : BELAID LALOUNI Sofia « cours énergie solaire photovoltaïque », Université A.MIRA de BEJAIA.

[7] : BELKACEM MOURAD « Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) » mémoire de master, 2015.

[8] : MATALLAH SORYA « Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla », mémoire de master, 2015.

[9] : GUY SEGUIER, FRANCIS LABRIQUE « ELECTRONIQUE DE PUISSANCE ; structures, commandes, applications » 10^e édition, DUNOD.

[10] : OURABI LASSAAD « cours électronique de puissance ».