

Université Mouloud MAMERI de Tizi-ouzou
Faculté du Génie Electrique et d'Informatique
Le département d'Électronique

Thème :

La conversion photovoltaïque maximale

Mémoire élaboré en vue de l'obtention du diplôme de Master II

Spécialité : électronique

Option : matériaux et dispositifs électronique et photovoltaïques

Encadré par :
Mme NEMMAR

Réalisé par :
Mlle BOUKHERROUB Djamila

Année universitaire : 2016/2017

Sommaire :

i-Introduction générale.....	1
ii- Les semi-conducteurs.....	3
1. <i>Semiconducteurs intrinseques.....</i>	<i>3</i>
2. Semiconducteurs éxtrinsèques.....	5
a. <i>Semiconducteurs de type n.....</i>	<i>6</i>
b. <i>Semiconducteur de type P.....</i>	<i>6</i>
II- Jonction PN.....	8
II.1. Définition de la jonction PN	8
1. Fonctionnement d'une jonction pn.....	8
2 . jonction PN bloquée.....	9
3. jonction PN passante.....	11
iii. Rayonnement solaire.....	12
1. Composition.....	12
2. Nature.....	13
3. Rayonnement sur la Terre.....	14
iiii-. Cellules photovoltaïques	15
1. Définition d'une cellule photovoltaïque	15

2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	15
I- Caractéristique courant-tension et paramètres des cellules photovoltaïque	16
1) Courant de court-circuit I_{cc}	17
2) Tension à circuit ouvert V_{co}	18
3) Facteur de forme	19
4) Rendement de la conversion en puissance η	19
3. Les filières technologiques du photovoltaïque	20
3-a- La filière silicium	20
b- Silicium monocristallin	20
b- Silicium polycristallin	20
c- Silicium en couches minces <i>amorphe</i>	21
3-2- Cellules couches minces	22
a- Matériaux à base de tellure de cadmium	22
b- Matériaux à base de sélénure de cuivre indium	22
3-3- Les cellules multi jonctions III-V	23
I-3-4- Les cellules nanocristallines à colorant	23
I-3-5- La filière organique	24

iiiiii)Introduction.....	26
I-Le panneau solaire.....	26
1-Caractéristiques.....	26
2-Péformances du panneau solaire.....	28
II-Le régulateur.....	28
III-Les batteries.....	29
1-Caractéristiques.....	29
2-Les modèles de batteries.....	29
a-Les batteries de voiture.....	29
b-Les batteries à décharge profonde.....	30
c-Les batteriesau gel.....	30
3-Différentes causes de défaillances des batteries.....	31
a-surcharge de batteries.....	31
b-Décharges profondes.....	31
c-Sulfatation.....	31
d-Courts-circuits.....	32
7-Cablage.....	32
1)Définir ses besoins.....	34

2)Site isolé.....	34
3)Autoconsommation.....	34
4)Autoconsommation avec revente de l'excédent de production.....	34
5)Revente de la totalité de la production.....	35
6)La location de toiture.....	35
7)Etudier les contraintes naturelles.....	36
- L'orientation des panneaux.....	36
-L'inclinaison des panneaux.....	36
a-La saleté.....	36
b-La surface disponible.....	37
c-L'ombrage.....	37
iiii) LES FACTEURS DE POSITIONNEMENT QUI INFLUENT LE RENDEMENT.....	38
1. L'angle d'incidence.....	38
2. L'angle d'inclinaison.....	39
iiii) SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES ORIENTABLES.....	40
1.Première méthode.....	42
2.Deuxième méthode.....	42
Conclusion.....	44

Introduction générale

Dans le cadre du protocole de Kyoto, les pays industrialisés ont convenu de réduire leurs émissions collectives de gaz à effet de serre de 5,2 % pour 2012, sur la base du niveau d'émissions de 1990.

À l'heure actuelle, l'électricité constitue la source principale de gaz à effet de serre. Jusqu'à 50 % des émissions de CO₂ issues des bâtiments commerciaux et résidentiels sont dues à la consommation d'électricité.

En outre, à mesure de la prolifération des appareils domestiques, des ordinateurs, des systèmes de divertissement et de la multiplication d'autres équipements comme les systèmes de climatisation et de ventilation, la consommation électrique enregistre une ascension disproportionnée par rapport à toute autre utilisation énergétique.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins.

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en

respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette Conversion d'énergie s'effectue par l'ensemble de cellules dites photovoltaïques (PV) , basée sur un phénomène physique est appelé effet photovoltaïque,

Le dimensionnement des centrales PV est donc nécessaire avant tout projet photovoltaïque.

Pour mener à bien ce travail, notre mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre est une revue bibliographique dur les matériaux semi conducteurs, qui à la base des panneaux solaires photovoltaïques, ainsi que la jonction PN .

Le second chapitre sera consacre à l'étude des cellules solaires photovoltaïques, tout en présentant les différentes technologies,

Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes composantes d'une installation photovoltaïque.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude des paramètres qui peuvent optimiser une installation PV.

I- Les semi-conducteurs

1. Semiconducteurs intrinseques.

Un semi-conducteur, comme **le silicium**, c'est un matériau qui n'est ni tout à fait un conducteur d'électricité, ni tout à fait un isolant. Il peut être soit l'un, soit l'autre selon diverses conditions.

Le caractère conducteur ou isolant prend sa source dans la structure même des atomes : chaque élément du tableau périodique possède un certain nombre d'électrons qui sont agencés autour d'un noyau. C'est cet agencement sous la forme de couches d'électrons, différent selon les éléments, qui est responsable de la conductivité électrique.

Les électrons d'un atome peuvent avoir plusieurs rôles au sein d'une structure d'atomes :

- électrons de cœur : ceux-ci sont proches du noyau et n'interagissent pas vraiment avec les autres atomes ;
- électrons de valence : ceux-ci sont sur les couches externes de l'atome et permettent de créer des liaisons interatomiques et de former les molécules ;
- électrons de conduction : ceux-ci sont responsables de la circulation du courant électrique.

Dans un métal, certains électrons sont à la fois dans la bande de valence et dans la bande de conduction. Cela signifie qu'un métal peut conduire le courant sans autre forme de traitement physico-chimique. Dans un isolant, par contre, les deux bandes sont séparées par un espace appelé « **bande interdite** » : cela signifie que les électrons ne peuvent pas s'y trouver. Dans le cas des isolants, les électrons externes sont tous dans la bande de valence et aucun ne se trouve dans la bande de conduction : ces matériaux ne peuvent donc pas conduire l'électricité.

Enfin, dans le cas des semi-conducteurs, au milieu, il existe une **bande interdite** aussi, mais cette dernière est **très fine**. Il suffit d'un petit quelque chose pour que les électrons de valence puissent passer dans la bande de conduction et ainsi rendre le semi-conducteur... conducteur. On parvient à faire ça en donnant de l'énergie aux électrons, en les excitant.

Un semi-conducteur est donc un isolant mais qui peut devenir un conducteur très facilement en excitant les électrons de valence : on fait ça en chauffant le matériau, ou en l'éclairant, ou en le soumettant à une tension électrique bien définie. Par exemple, si on éclaire une plaque photovoltaïque, la plaque devient conductrice et crée un courant électrique : c'est l'effet photoélectrique.

On dispose donc ici d'une fonction bien intéressante : c'est un isolant qui devient conducteur quand on l'éclaire.

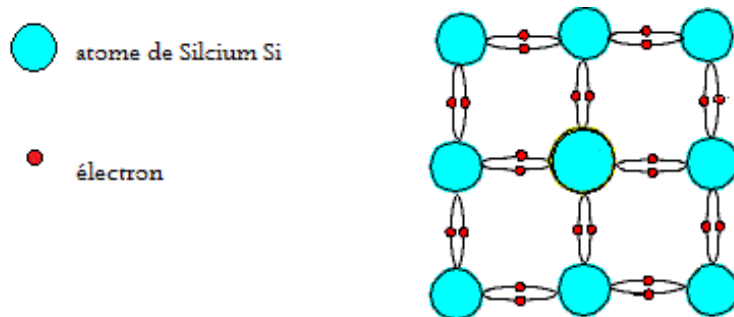


Figure (I.1) : semi-conducteur intrinsèque

2. Semiconducteurs extrinseques.

Le dopage, c'est une technique qui vise à modifier l'énergie nécessaire pour rendre le semi-conducteur plus ou moins conducteur. Il consiste à injecter dans les cristaux de silicium des atomes bien choisis pour le rendre soit un peu plus conducteurs, soit un peu moins.

Le silicium possède 4 électrons de valence (comme le carbone) : dans un cristal, il se lie donc de façon tétraédrique à 4 autres atomes de silicium :

Il est possible de remplacer certains atomes de silicium par d'autres atomes, qui vont alors modifier la structure des bandes de conduction.

a. Semiconducteurs de type n

L'atome de silicium possédant 4 électrons de valence, on peut injecter un atome avec 5 électrons de valence : l'atome sera alors dans le cristal avec 4 liaisons mais possédera un électron supplémentaire. Pour ça, on utilise souvent du phosphore (symbole PPP). Vu que ce type de modification apporte un électron en plus dans le cristal, la bande de conduction est alors globalement négative : on parle de dopage négatif, ou **dopage N** (le cristal dans son ensemble reste neutre, car le phosphore contient un proton en plus aussi ; c'est juste la bande de conduction qui est négative).

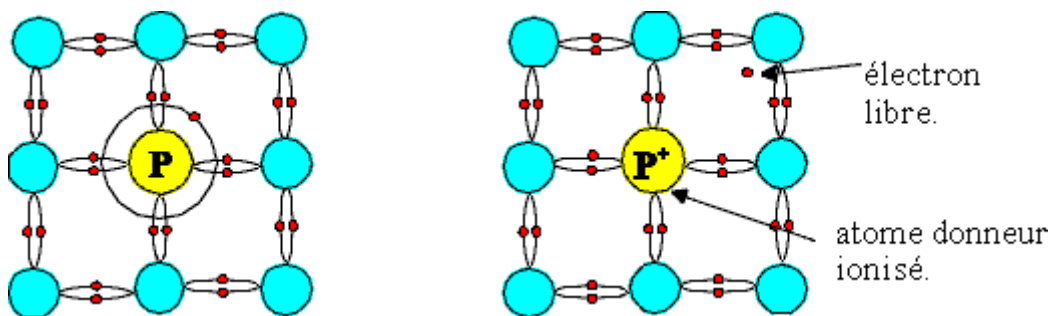


Figure (I.2) : semi-conducteur type N

b. Semiconducteur de type P

Une autre solution est d'utiliser un dopage au bore (symbole BBB), qui n'a que 3 électrons de valence : le bore sera là aussi bien pris dans un cristal avec 4 liaisons, mais une des liaisons manquera un électron : il sera donc comme « positif » (car il manque comme une charge négative), d'où le nom de **dopage P** :

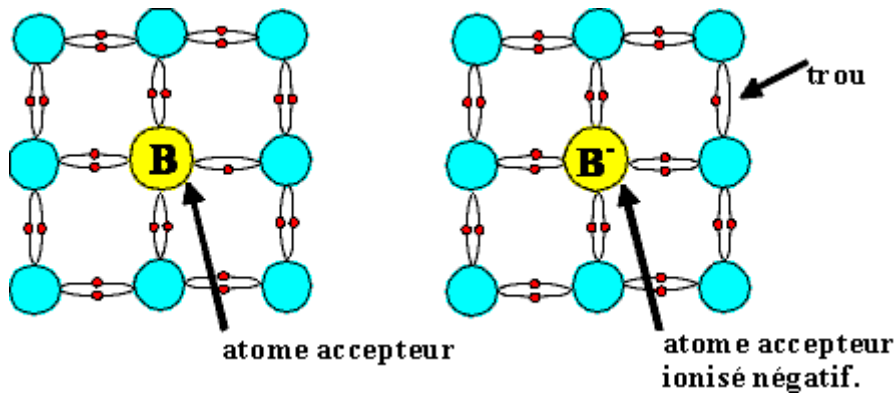


Figure (I.3) : semi-conducteur type P

- Grâce au dopage N, le silicium devient un peu plus conducteur : en effet, l'introduction du phosphore a pour effet de déplacer la bande de conduction vers le bas : les électrons du silicium sont donc plus rapidement conducteurs.
- Grâce au dopage P, le silicium devient également un peu plus conducteur : le bore apporte certes « un trou d'électrons », mais ce dernier peut recevoir un électron voisin qui laisse alors un trou derrière lui. Le trou s'est alors déplacé et ceci constitue bien un sorte de déplacement de charges (« virtuellement » positive) et augmente donc la conductivité du matériau également.

Ces **deux façons de doper** un semi-conducteur sont donc **antagonistes** : l'une apporte un électron en plus au cristal semi-conducteur et l'autre en retire un.

II. Jonction PN

II.1. Définition de la jonction PN :

Une **jonction PN** est la mise en contact de deux barreaux de semi-conducteurs extrinsèques de type opposé (P avec N), la surface de séparation entre les deux régions est appelée jonction PN

1. Fonctionnement d'une jonction pn

Lors de l'aboutement de deux semiconducteurs de types différents, a l'absence de toute source d'énergie extérieure, les electrons surabondants de la partie n ont tendance a migrer vers la partie p : c'est le phenomene de la diffusion. Les electrons du cote n arrives vers le cote p se recombinent avec les

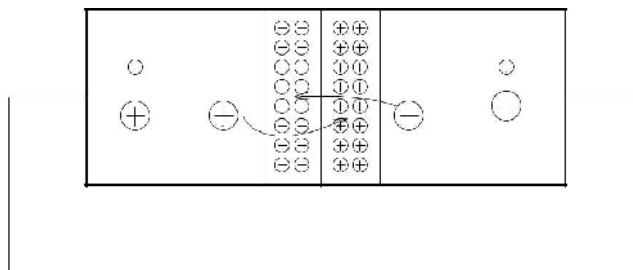


Figure. 1.4 : Jonction pn a l'equilibre.

trous, majoritaires du cote p, et restent ainsi fixes dans la partie p a proximite de l'interface. Un phénomène inverse se produit avec les

trous de la partie p. Le cote n se charge donc positivement, et le cote p négativement : un champ électrique se crée au niveau de l'interface. Ce champ s'oppose a la migration des charges majoritaires, en les repoussant de l'interface. Ainsi, la diffusion s'arrête à partir d'une certaine profondeur de pénétration des charges. Il existe donc, a l'équilibre thermodynamique (courant total nul), un champ électrique et donc une différence de potentiel entre la partie n et la partie p (dite potentiel de jonction) ; celle-ci est de l'ordre de 0,7 V pour les diodes a silicium, 0,3 V pour le germanium. Elle est plus importante pour les diodes electroluminescentes (LEDs).

Puisqu'un champ existe dans jonction a l'équilibre, il faut conclure que la zone de l'interface (dans laquelle existe le champ) ne contient pas de charges libres. En effet, dans cette zone, par exemple, du cote n, les trous venus de la zone p ont ete recombines avec les électrons, de sorte a lier les deux charges libres. Cette zone s'appelle zone de charge d'espace.

2 .jonction PN bloquée

Si maintenant on applique une tension positive cote n et négative cote p (dite tension inverse), la jonction se bloque davantage : les électrons du cote n sont attirés vers la borne positive de la source ; ils désertent l'interface pn. Un phénomène symétrique se produit cote p avec les trous. La zone de charge

d'espace s'étend, les charges majoritaires ne peuvent pas traverser la jonction, la diode est dite bloquée.

Cependant, le champ $\vec{E}$ agit également sur les charges minoritaires : les trous de la zone n sont attirés vers la zone p et les électrons de la zone p vers la zone n. Ce déplacement u_j des charges produit un courant. Néanmoins, on sait que la concentration des charges minoritaires dans un semi-conducteur dope est très faible. Ainsi, le courant des charges minoritaires, appelé courant de saturation, est de l'ordre de picoampères (10^{-12} A). L'intensité de ce courant ne dépend pas de la tension inverse ; la valeur ne dépend que de la température et des paramètres technologiques de la diode.

Ainsi, le courant d'une diode bloquée est quasi nul.

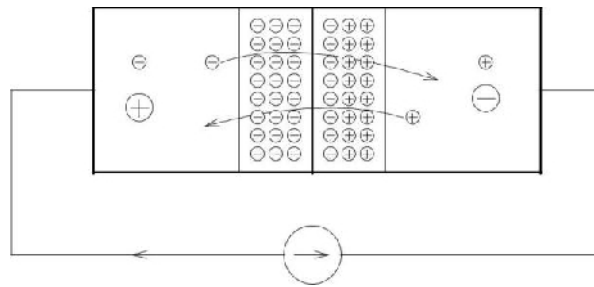


Figure 1.5 : jonction PN bloquée

3. jonction PN passante

En revanche, lorsque l'on applique une tension directe, c'est-à-dire une tension positive du cote p et négative du cote n, pourvu que cette tension soit supérieure a la barrière de potentiel présente a l'équilibre, le champ électrique ne retient plus le courant de diffusion, les électrons injectes du cote n franchissent l'interface np et terminent leur course soit en se recombinant avec des trous, soit a l'anode (l'électrode positive) : le courant circule, la diode est dite passante.

$$I_d = I_s' \exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right)$$

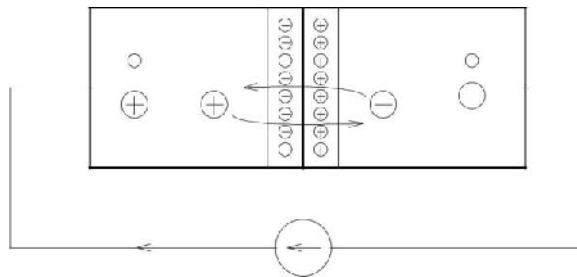


Figure. 1.6 : Diode polarisée en directe

ou q est la charge d'électron, k est la constante de Boltzmann (constante universelle égale a $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$), T est la température absolue, I_s est le courant de saturation qui dépend des paramètres des semi-conducteurs composant la diode et de la température. V est la tension

appliquée à la diode : elle est positive pour une diode polarisée en directe (i.e. le potentiel du cote p supérieur au potentiel du cote n).

III. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil.

Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées.

1. Composition

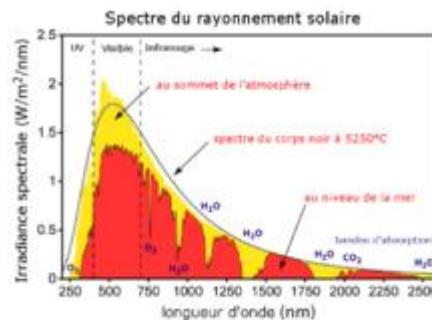


Figure 1.7 :spectre du rayonnement solaire

L'émission d'ondes électromagnétiques par le Soleil est convenablement modélisée par un corps noir à 5800 kelvins, et peut donc être décrit par la loi de Planck. Le maximum d'émission est dans le vert ($\lambda=504$ nm), et la répartition du rayonnement est

à peu près pour moitié dans la lumière visible, pour moitié dans l'infrarouge, avec 1 % d'ultraviolets.

Arrivé au niveau de la mer, c'est-à-dire ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, une partie du rayonnement solaire a été absorbée. On peut repérer notamment sur le spectre de la figure 1.7 les bandes d'absorption de l'ozone (qui absorbe une partie importante des ultraviolets), du dioxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau.

2. Nature

L'intensité du rayonnement n'est pas constante et augmente lors des éruptions solaires pendant les maxima du cycle solaire. Le rayonnement solaire se décompose en trois parties :

- L'émission du Soleil calme (voir constante solaire),
- La composante lentement variable,
- Les sursauts solaires.

L'étude du rayonnement électromagnétique du Soleil par la radioastronomie a permis d'énormes progrès dans la compréhension du fonctionnement interne du Soleil. Les ondes radio émises par le Soleil proviennent principalement des plasmas constituant la chromosphère et la couronne solaire. Les ondes centimétriques correspondent aux couches basses de la chromosphère tandis que la couronne émet des ondes décimétriques. Le plasma agit en fait comme

un filtre passe-haut dont la fréquence de coupure dépend de la densité électronique du milieu.

3. Rayonnement sur la Terre

Une faible partie du rayonnement solaire parvient jusqu'à la surface de la Terre, des ondes radio décamétriques aux rayons ultraviolets les plus mous, le reste étant réfléchi ou absorbé par l'atmosphère et l'ionosphère. Lorsqu'il atteint la surface de la Terre, en fonction de l'albédo de la surface frappée, une partie plus ou moins importante du rayonnement est réfléchi. L'autre partie de ce rayonnement est absorbée par la surface de la Terre (convertie en chaleur) ou par les êtres vivants qui y vivent, en particulier les végétaux (photosynthèse). Cette source d'énergie, appelée énergie solaire, est à la base de la vie.

Le rayonnement solaire total reçu sur la Terre est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. En moyenne sur le globe terrestre, 61 % du rayonnement reçu est direct. En fonction de l'endroit où l'on se situe sur Terre, cette part varie fortement..

1. Cellules photovoltaïques :**I. 1. Définition d'une cellule photovoltaïque :**

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

I. 2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Dans une cellule photovoltaïque, lorsqu'un photon (particule de lumière) est absorbé par le semi-conducteur, il donne naissance à un électron et un trou.

En effet, ce photon va transmettre son énergie à un électron (particule négative) qui va alors se libérer de l'attraction de son noyau et donc laisser un trou (chargé positivement) derrière lui.

Pour obtenir un courant électrique, les charges positives (trous) et négatives (électrons) doivent être séparées puis attirées vers l'extérieur. C'est à ce moment qu'intervient le champ électrique interne créé par la jonction PN : c'est lui qui va repousser les électrons dans la zone N et donc séparer les charges.

Les porteurs de charge sont, ensuite, collectés par l'intermédiaire d'une grille, qui fait office d'anode, à l'avant et un contact, qui fait office de cathode, à l'arrière. On obtient alors un courant électrique continu d'environ 0,5 V entre ces électrodes.

Donc, tant que la cellule est exposée à la lumière, elle absorbe des photons qui assurent le découlement continu de l'opération.

Une présentation schématique donnée sur la figure (I.6).

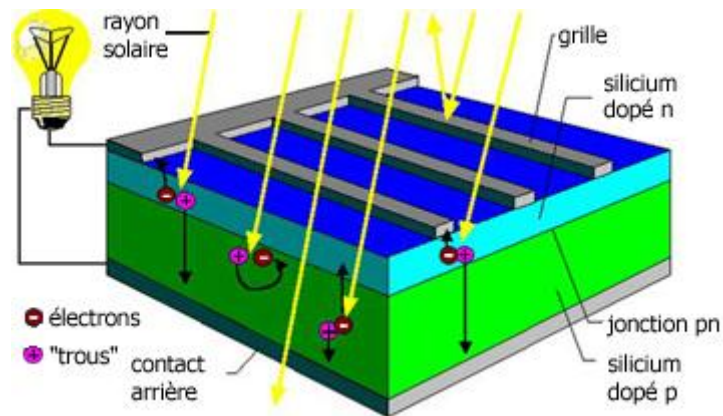


Figure (2.1) : fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I- Caractéristique courant-tension et paramètres des cellules photovoltaïque :

La figure I-6 représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ dans l'obscurité et sous illumination d'une cellule photovoltaïque. Les différents paramètres caractérisant la cellule photovoltaïque organique sont : le courant de court-circuit I_{cc} , tension du circuit ouvert V_{co} , rendement de la conversion η et le facteur de forme FF.

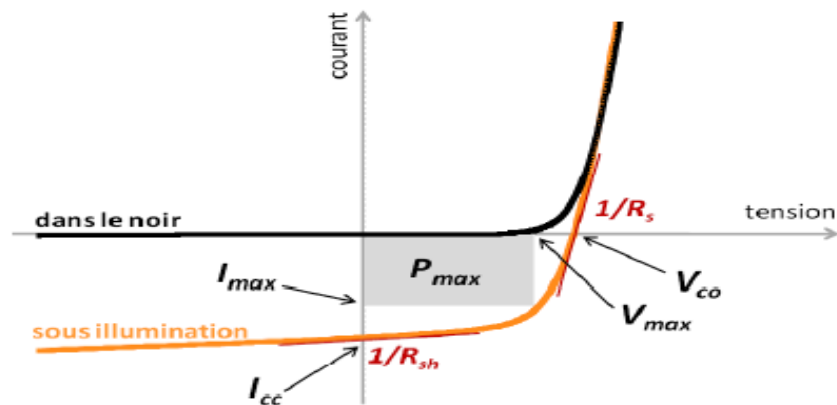


Figure I-6 : caractéristique courant-tension d'une cellule organique

Avec : R_s C'est la résistance série elle dépend de la résistivité du matériau, elle tient compte de la chute ohmique.

R_{sh} : c'est la résistance shunt correspond à la présence du courant de fuite dans la diode.

Les performances d'une cellule solaire photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres, extraits de la caractéristique courant-tension :

1) *Courant de court-circuit I_{cc} :*

Il est obtenu en court-circuitant les deux bornes de la cellule c-à-d lorsque la tension est nulle. Il dépend de :

- La surface éclairée.
- De la longueur d'onde du rayonnement.
- De la mobilité des porteurs de charge.
- De la température.

Ce courant s'exprime par la relation suivante :

$$I_{cc} = q \int_0^{\infty} F(\lambda) [1 - R(\lambda)] r_s d\lambda \quad (1)$$

$F(\lambda)$: Le flux du photon absorbée par la cellule.

$R(\lambda)$: Le coefficient de réflexion de la surface de la cellule.

r_s : La réponse spectrale (rendement quantique) de la cellule; il dépend de la longueur d'onde.

$F(\lambda) [1-R(\lambda)]$: Le flux de photons qui participent à l'effet photovoltaïque.

2) Tension a circuit ouvert V_{co} :

Elle est obtenue lorsque le courant traversant la cellule est nul. La tension

V_{CO} dépend de l'éclairement de la cellule à partir de l'équation du courant total de la cellule sous illumination qui est donné par :

$$I = I_S \left(\exp \left(\frac{eV}{nKT} \right) - 1 \right) - I_{ph} \quad (2)$$

Ce qui nous donne l'expression de la tension a circuit ouvert avec l'annulation du courant :

$$I=0 \Rightarrow V_{CO} = \frac{KT}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1 \right) \quad (3)$$

I_{ph} : Densité de courant photogénéré

I_S : courant de saturation

K : constante de Boltzmann $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

T : température en K

3) Facteur de forme :

Il caractérise la qualité de la cellule. Il est déterminé par le rapport de la puissance maximale générée à la puissance optimisée :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (4)$$

Avec : I_m et V_m représentent le courant et la tension du point de fonctionnement qui nous donne la puissance maximale la cellule

I_{cc} : courant de court-circuit

V_{co} : tension de circuit ouvert

Le facteur de forme peut donner des informations sur la qualité des interfaces électrodes/matériaux organique.

4) Rendement de la conversion en puissance η :

Il est donné par le rapport entre la puissance maximale (P_{max}) délivré par la cellule organique et la puissance de la lumière incidente (P_{inc}).

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{inc}} \quad (5)$$

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

3. Les filières technologiques du photovoltaïque

Les progrès dans le domaine de l'énergie photovoltaïque se font à travers plusieurs technologies et sont incessants depuis 1970. Il est à noter que les rendements de conversion présentés dans ce paragraphe constituent les records certifiés (janvier 2008) .

I3-1- La filière silicium

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs filières technologiques pour le photovoltaïque silicium, d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans) dites de « première génération » et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couches minces.

a-Silicium monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité électronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable. Le silicium obtenu permet d'obtenir des rendements de conversion records en laboratoire, de l'ordre de 25 % pour des cellules de 4 cm² (Université de New South Wales, Australie). L'inconvénient de cette technologie est le coût prohibitif de production des matériaux.

b- Silicium polycristallin

Le silicium polycristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multicristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour des (grandes) plaquettes de 200 cm². Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

c- Silicium en couches minces amorphe

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules utilisées dans des calculatrices ou des montres dites « solaires ». Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairage contrairement au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de 1 m²). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement par un mélange avec le silicium cristallin. En effet, les hétérostructures

à base de silicium amorphe/silicium cristallin présentent des rendements de laboratoire de plus de 21 % et de 16 % en production industrielle.

3-2- Cellules couches minces

a- Matériaux à base de tellure de cadmium

Jusqu'à une date récente, il était admis que la filière à base de Sulfure de Cadmium et de Tellure de Cadmium (CdS-CdTe) représentait l'une des approches les plus prometteuses pour le photovoltaïque terrestre. La bande d'énergie interdite de valeur de 1,45 eV du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbée sur une profondeur de 2 μm . Les résultats sur le rendement de conversion sont très encourageants : près de 11 % sur une surface de 4900 cm^2 par *BP Solarex*. Cependant, les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du Cadmium freinent les tentatives de développement de cette filière.

b- Matériaux à base de sélénure de cuivre indium

Avec un coefficient d'absorption 100 à 1000 fois plus fort que celui du silicium cristallin (dans la gamme de 1,1 à 2,6 eV), le Disélénure de Cuivre et d'Indium (CIS) est un matériau très prometteur [3]. Ce composé type I-III-VI, a un rendement théorique de l'hétérojonction (n) CdS-(p)CuInSe₂ qui se situe autour de 25 %. Les cellules à base de composés de type Cu(Ga,In)(Se,S)₂ ont récemment atteint des rendements de conversion record de 18,8 % en laboratoire. Malgré les difficultés connues pour maîtriser cette filière à grande échelle, un rendement de 12,8 % a été obtenu sur le plan industriel.

I-3-3- Les cellules multi jonctions III-V

La filière des dispositifs multijonctions, dite «de troisième génération » permet d'accéder aux rendements records dans le domaine de l'énergie photovoltaïque se limite actuellement aux applications spatiales. Cette technologie repose sur l'utilisation de plusieurs cellules de bandes interdites différentes, chacune optimisée pour une partie différente du spectre solaire. Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec des structures basées sur des empilements de composés III-V en épitaxie. Ces dispositifs, parfois appelés « tandems » fonctionnent déjà, et permettent d'atteindre un rendement de 32 % avec le système triple-jonction GaInP/GaAs/Ge sous un spectre standard . Grâce à des systèmes de concentrateurs de lumière, permettant de décupler la puissance solaire reçue par la cellule, des rendements de plus de 40 % ont même été obtenus avec cette technologie, ce qui constitue un record absolu en terme de conversion photovoltaïque .

I-3-4- Les cellules nanocristallines à colorant

Inspirée par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 1990 des cellules solaires composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié et reporté est de 10,4 % pour une cellule de 1 cm², réalisée par la société *Sharp*. Des tests de stabilité effectués montrent que la durée de vie des cellules est de 20 ans en fonctionnement. Cependant, à cause de fuites possibles de l'électrolyte liquide, celui-ci est remplacé par des électrolytes solides pour lesquels les rendements chutent alors à 6,7 % .

I-3-5- La filière organique

Si l'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 30 ans, les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie très faibles, de l'ordre de 10^{-5} %. Dès 1978, Merritt prévoyait que les valeurs du rendement pourraient dépasser les 1 %, mais ce n'est qu'en 1986 que ce rendement a été atteint avec les travaux de Tang (PCE = 0,95 %). Pendant les années qui suivirent, cette valeur a parfois été reproduite avec des matériaux différents, mais elle n'a jamais été améliorée. Ce n'est que depuis le début du XXI^e siècle que le rendement a recommencé à croître, atteignant 2,5 % avec les travaux publiés par Shaheen, 6 % avec ceux de Peumans sous éclairage AM1,5 avec une puissance lumineuse de 1000 W/m^2 et enfin 4,2 % avec une double hétérostructure de C_{60} et de phtalocyanine de cuivre. L'équipe de Heeger a même obtenu un rendement de 6,7 % avec des cellules de type «tandem». Cette valeur reste encore très faible si on la compare aux rendements obtenus avec les autres technologies. Cependant, plusieurs raisons justifient les efforts consentis pour développer la filière organique et qui résident dans les avantages que présentent ces matériaux. En effet, ils peuvent être mis en forme facilement par voie sèche ou voie humide (tournette, jet d'encre) avec des techniques issues de l'industrie de la microélectronique. De plus, les quantités de matériaux utilisées sont relativement faibles, les films ayant des épaisseurs de 100 nm. L'ingénierie moléculaire permet en outre d'adapter les valeurs de la bande interdite et des niveaux d'énergie. Enfin, cette technologie permettrait d'accéder à des modules photovoltaïques flexibles et de grandes surfaces.

1.Introduction

La production d'électricité continue DC à partir de la lumière est un moyen propre, silencieux, demandant peu d'entretien, présentant peu d'usure (si le matériel est de bonne qualité au départ).

L'énergie produite quotidiennement par un panneau dépend de l'ensoleillement journalier moyen du lieu. Cette donnée géographique est déterminante pour le dimensionnement d'une installation. Il s'exprime en kWh/m²/jour.

I. Le Panneau Solaire

1 caractéristiques

Les caractéristiques du panneau sont en général indiquées sur une étiquette collée à l'arrière du panneau. Par exemple pour le modèle utilisé par le Programme Santé en Sierra Leone (Makeni), acheté en Nouvelle Guinée, voici les caractéristiques.



Les grandeurs électriques indiquées sont:

-Courant de court-circuit (short circuit current) I_{sc} - l'intensité est mesurée directement aux bornes du module sans récepteur.

-Courant nominal (peak power ou rated current) I_{mp} - l'intensité qui est débitée en fonctionnement STC raccordé au récepteur.

-Tension de circuit ouvert (open circuit voltage) V_{oc} - la tension est mesurée directement aux bornes du module sans charge.

-Tension nominale (peak power ou rated voltage) V_{mp} - la tension délivrée en fonctionnement STC raccordé au récepteur.

-Puissance crête (peak power ou rated power) P_{max} – la puissance crête est le produit de la tension nominale et le courant nominal en fonctionnement .

2. Performance du panneau Solaire

Il existe des systèmes 12Vdc (courant continu de 12 volts) ou 24Vdc (courant continu de 24 volts). Les systèmes 12Vdc conviennent à notre usage. Les systèmes 24Vdc ou 48Vdc sont utilisés pour les installations de puissance.

Pour augmenter l'énergie produite on peut augmenter le nombre de panneaux. Il faut veiller à ce que les panneaux fonctionnent tous à la même tension (12Vdc).

Plusieurs panneaux connectés entre eux le sont selon le schéma de la mise en parallèle.

C'est à dire en reliant les bornes POSITIVES (+) et NEGATIVES (-) ensemble .

les panneaux solaires sont soumis aux conditions climatiques :

- **Influence lumineuse** : la puissance produite par un module est proportionnelle à l'illumination.
- **Influence de la température** : au dessus de 25°C, 0.45 W/°C de perte de puissance

II . Le régulateur

Le régulateur est un ensemble électronique dont le rôle est de gérer les flux de courant : courant venant des panneaux en vue de charger la batterie et courant venant de la batterie vers les consommateurs.

Il gère la charge et la décharge de la batterie en déconnectant le panneau quand les batteries sont chargées ou en coupant l'alimentation aux consommateurs quand la batterie est trop déchargée.

Le régulateur est donc à l'intersection de l'ensemble. Il comporte une diode anti retour pour éviter à la batterie de se décharger dans le panneau pendant la nuit.

Il n'y a pas d'entretien spécifique à faire pour ce type de matériel. Il faut juste veiller à ce qu'il soit installé dans un lieu sec, ventilé et protégé au maximum de l'humidité. Il convient aussi de dépoussiérer régulièrement l'onduleur.

III. Les batteries

1. Caractéristiques

Quand on trouve les spécifications suivantes sur une batterie: 12V/ 200A/ 40 Ah, cela signifie que la batterie fournit:

Un voltage de 12V

Un courant maximum disponible de 200 Ampères durant 210 secondes (information pour le démarrage d'un véhicule)

Une capacité nominale de 40 Ampères par heure

2. Les modèles de batteries

a) La batterie de voiture

Ce type de batterie est peu coûteux (entre **50 et 90 euros**) et très **répandue de part le monde**. Mais elle nécessite un entretien régulier (la densité du mélange eau/acide doit

être suivi et ajusté régulièrement car l'eau s'évapore). Utilisée pour une installation solaire, **la durée de vie est d'1/2 an.**

b) Les batteries à décharge profonde

Même composition qu'une batterie de voiture (ces batteries peuvent être utilisées sur un véhicule). La différence réside dans le taux de décharge de la capacité totale. Pour une batterie de voiture, il est conseillé de ne jamais dépasser une décharge de 20% de la capacité totale, sous peine d'endommager la batterie. Ces batteries à « décharge profonde » - comme leur nom l'indique – peuvent être utilisées jusqu'à 80% de la capacité totale, donc parfaitement adaptées pour une installation photovoltaïque. Cependant afin d'optimiser ces batteries, il est conseillé de ne pas dépasser 40 % de la capacité totale.

Ces batteries sont assez répandues et leur coût restent abordable . **La durée de vie de ces batteries est de 4 à 5 ans.**

c) La batterie au Gel

Elles sont reconnaissables par l'absence complète d'ouverture sur le dessus. La fixation des câbles se fait non plus sur des bornes identiques à celles des batteries au plomb mais bien sur des tiges filetées de 8mm. C'est la meilleure batterie pour une installation solaire (durée de vie d'environ 10 ans), maintenant elle n'est **pas du tout adaptée pour des climats tropicaux** et son prix est exorbitant.

3. Différentes causes de la défaillance des batteries

a) Surcharge des batteries

Les surcharges des batteries engendrent non seulement la corrosion de ses plaques positives, mais aussi un dégagement excessif de gaz pouvant arracher des plaques, les matières actives qui se déposent aussi bien au fond du bac, qu'entre les séparateurs et les plaques. Les surcharges des batteries génèrent en outre une augmentation de la température de ces dernières, ce qui peut conduire à la destruction des plaques et des séparateurs.

b) Décharges profondes

Les décharges profondes sont, à côté des surcharges, les premières causes de la détérioration d'une batterie. Les résultats des décharges profondes prolongées sont entre autre la diminution de la densité de l'électrolyte, le dépôt au fond du bac de sédiments fins de cristaux de sulfate de plomb et la décoloration des plaques, ainsi que leur sulfatation.

c) **Sulfatation** la sulfatation consiste en la formation sur les plaques de larges cristaux de sulfates de plomb, en lieu et place des fins cristaux qui y sont normalement présents.

Les causes de la sulfatation sont :

- la non utilisation de la batterie durant une longue période, après sa charge complète ou partielle,

- le fonctionnement de la batterie durant des jours à un état de charge partielle, sans charge d'égalisation,
- la variation de la température dans la batterie.

Les manifestations de la sulfatation sont l'augmentation de la résistance interne de la batterie, ce qui entraîne une diminution de la décharge et une augmentation de la tension de charge.

d) **Courts-circuits** Les courts-circuits des éléments sont générés par :

- la destruction des séparateurs,
- l'accumulation excessive des sédiments au fond du bac,
- la formation de structures arborescentes de plomb, de la plaque négative vers la plaque positive.

Les manifestations du court-circuit des éléments sont les suivants :

- une densité d'électrolyte faible, en dépit de la réception normale de charge,
- une perte rapide de capacité après une pleine charge,
- *une tension à vide faible.*

7. Le câblage

Il convient de ne pas les rallonger sous peine de forte atténuation de rendement : 1 mètre en plus peut faire chuter drastiquement la puissance de l'énergie fournie.

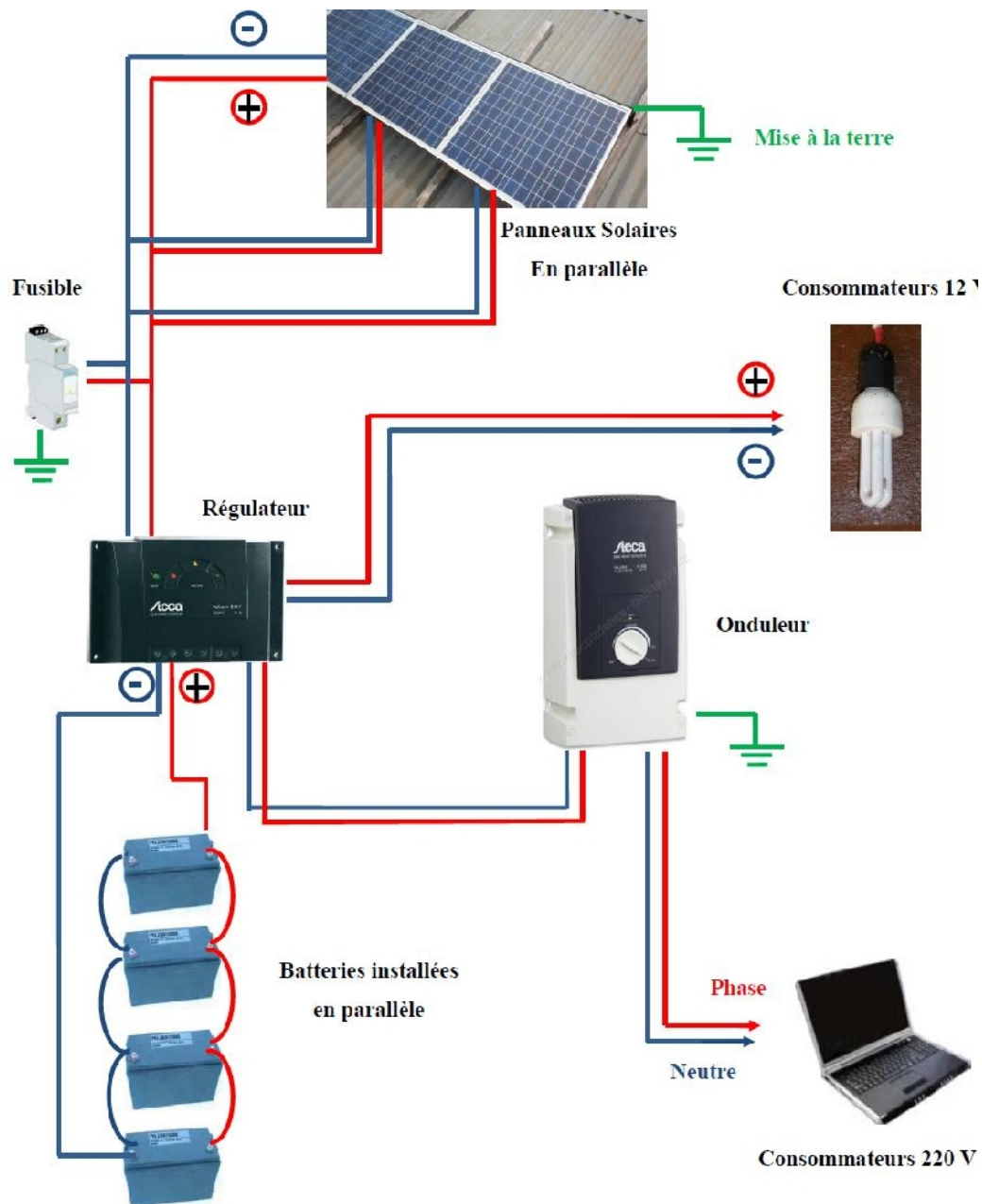
Le tableau ci-dessous indique les diamètres minimum à respecter pour les câblages entre:

Régulateur – panneau : 10m environ

Régulateur - batterie : 1m environ

Régulateur – boîtier de distribution : 5m environ

8. Schéma d'installation type



Avant de se lancer, encore faut-il déterminer avec soin ses besoins et les confronter au champ des possibles (techniques et réglementaires).

I. Définir ses besoins

Il existe quatre types d'installations :

1. Site isolé :

Ni les panneaux, ni le bâtiment ne sont connectés au réseau électrique. La production est soit consommée sur place, soit stockée dans des batteries. Ce type de montage permet d'électrifier un bâtiment très éloigné du réseau, mais impose une source alternative (groupe électrogène) en cas d'absence de soleil pendant plusieurs jours en hiver.

2. Autoconsommation:

Les panneaux alimentent un bâtiment lui-même connecté au réseau, avec ou sans batteries. Un système de bascule automatique permute sur le réseau électrique dès que la puissance produite est insuffisante (délestage de puissance), ou que les batteries sont vides (sélection de source).

Cette solution n'injectant pas de courant sur le réseau, se contente d'une électronique simplifiée

3. Autoconsommation avec revente de l'excédent de production :

Dans ce cas, dès que la production excède la consommation, le surplus est vendu à un opérateur à un tarif spécial et avantageux (pour le moment), dit « tarif d'achat ».

L'installation injecte donc régulièrement du courant vers le réseau.

Le courant vendu devant être de bonne qualité, c'est-à-dire respecter des contraintes précises de tension et de régularité même en cas d'ensoleillement irrégulier, il convient d'installer un onduleur de bonne qualité. De plus, la présence d'un échange commercial oblige également à implanter un compteur d'injection pour mesurer avec certitude la quantité d'énergie vendue. Il existe des systèmes « intelligents » visant à maximiser l'autoconsommation, par exemple en chauffant l'eau chaude sanitaire à l'avance, en chargeant des batteries tampons...

II. Revente de la totalité de la production :

C'est le modèle de loin le plus utilisé, car le tarif d'achat est encore largement supérieur au prix du kWh venant du réseau. Cette configuration nécessite deux branchements.

- le branchement « production », qui comporte deux compteurs d'énergie posés tête-bêche : un pour mesurer l'énergie vendue ; et un « compteur de non-consommation » permettant de contrôler l'absence d'autoconsommation.
- le branchement « consommation », qui utilise un compteur standard.

III. La location de toiture :

Quelques entreprises se proposent de louer votre toit pour y installer des panneaux et vendre eux mêmes l'électricité produite. Si cette solution a le mérite de **simplifier** à l'extrême la participation du propriétaire, elle est évidemment moins rémunératrice. Ajoutons que les toitures de grande surface et situées dans le sud de la France sont les plus recherchées...

IV. Etudier les contraintes naturelles

Bien sûr, les régions les plus ensoleillées assurent une meilleure production, mais d'autres critères déterminants entrent en jeu :

- L'orientation des panneaux

: l'idéal est sans surprise de faire face au sud. Un écart de quelques dizaines de degrés est acceptable, mais au détriment du rendement qui chute rapidement avec l'incidence des rayons du soleil (70% à 45°, 50% à 30°).

- L'inclinaison des panneaux :

la pente de toit idéale correspond tout simplement à la latitude du lieu (entre 41° au Sud et 51° au Nord). Comme pour l'orientation, un écart est acceptable dans une certaine mesure et aura une influence sur la saisonnalité des performances : un panneau plus vertical produira plus en hiver, et à l'inverse, un panneau moins incliné sera plus efficace en été.

S'il est difficile de modifier l'inclinaison des panneaux placés sur une toiture existante, il est utile de l'étudier précisément pour les panneaux posés au sol ou les bâtiments neufs.

- a. **La saleté** : pour les mêmes raisons que précédemment, les cellules photovoltaïques produisent moins lorsqu'elles sont souillées. Feuilles mortes, poussières, guano, etc. sont à prendre en compte.

Des panneaux sur un bâtiment proche d'une route très fréquentée, ou d'une usine particulièrement sale, devront être nettoyés plusieurs fois par an.

b. **La surface disponible** : même si les rendements des cellules progressent d'année en année, il faut tout de même une surface non négligeable pour commencer à produire sérieusement et espérer rentabiliser l'opération. A étudier en fonction du projet. Notons au passage que certaines aides sont réservées aux installations de 3 kW crête maximum, ce qui représente une surface de 20 à 30 m² à l'heure actuelle.

chacune de ces contraintes semble relativement simple à intégrer seule, leur conjonction plaide en la faveur d'une étude d'ensoleillement menée par un spécialiste . Les meilleures entreprises du secteur combinent des données géographiques, astronomiques, ainsi que des mesures in situ afin d'estimer au plus près le potentiel du site.

c. **L'ombrage** : sans rentrer dans les détails techniques, rappelons que l'ennemi numéro un du panneau photovoltaïque est l'ombre !

En effet, il suffit qu'une seule cellule d'un panneau soit privée de soleil pour que la production de la totalité du panneau s'écroule. L'effet est identique pour les groupes de panneaux montés en série : la production de la série est limitée par le module le moins productif. Il faut donc s'assurer qu'aucun arbre ou bâtiment aux alentours du site ne vienne masquer tout ou partie des panneaux, aussi bien l'hiver que l'été... sans oublier le bâtiment lui même (cheminée, antenne,...).

V. LES FACTEURS DE POSITIONNEMENT QUI INFLUENT LE RENDEMENT

1. L'angle d'incidence

Cela correspond au plan formé entre le panneau photovoltaïque et les rayons lumineux, (Fig. 1). Cet angle a une grande importance. L'angle d'incidence optimal correspond à un angle de 90° . Chaque fois que cet angle diminue ou augmente, la surface en m^2 du panneau solaire exposé aux rayons lumineux diminue et donc en partant de la puissance du panneau solaire, le rendement diminue aussi.

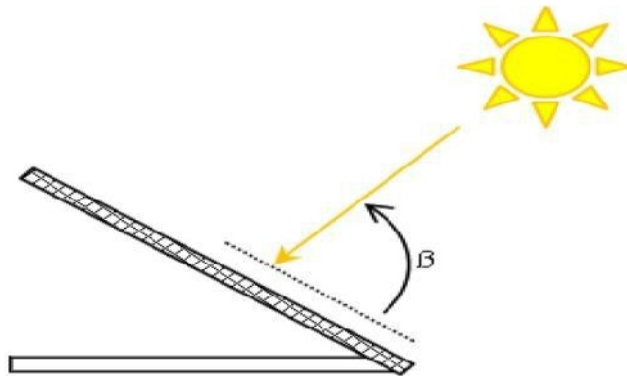


Figure. 1: Angle d'incidence sur un module photovoltaïque

L'angle d'incidence joue un rôle majeur pour les rendements du panneau. Il est défini selon l'équation suivante:

$$R = 100 \sin(A)$$

Avec, R, le rendement en (%) et A , l'angle d'incidence en (°).

La figure suivante représente l'évolution du rendement en fonction de l'angle d'incidence,

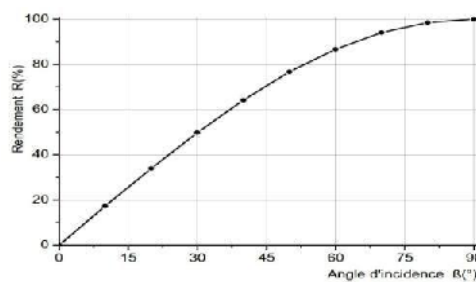


Figure . 2: Rendement des modules PV en fonction de l'angle d'incidence

Ainsi, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement (90°) sur le module photovoltaïque. Alors que pour un angle de 45°, le rendement n'est que de 70 %.

2. L'angle d'inclinaison

L'angle d'inclinaison correspond à l'angle formé par le plan du module solaire par rapport à l'horizontale.

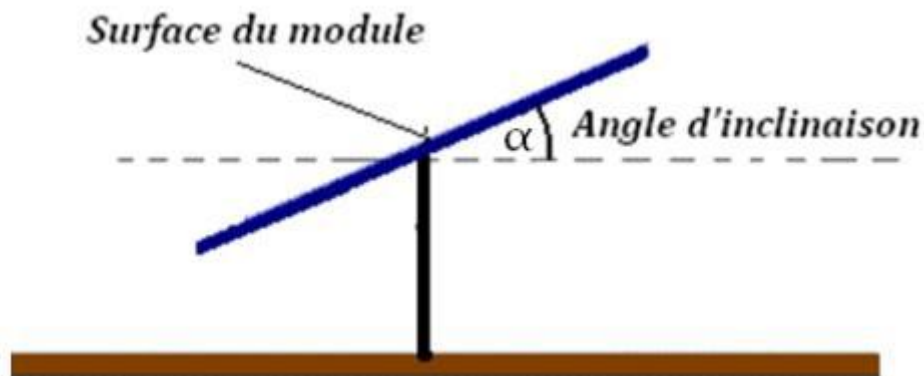


Fig. 3: Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques

L'évolution de la trajectoire du soleil variant selon les saisons, l'angle d'inclinaison (pour un module photovoltaïque n'étant pas muni d'un système rotatif) est plus réduite en été et plus importante en hiver. L'inclinaison d'un module photovoltaïque par rapport à l'horizontale est donnée par la relation suivante [1, 2]:

Cette relation permettant un rendement supérieur n'est valable que lorsque le module solaire en question est muni d'un système qui lui permet de s'incliner. Or on ne trouve ce système que très rarement.

V. SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES ORIENTABLES

Concernant l'inclinaison des modules par rapport à l'horizontale, l'approche se fonde sur la hauteur du soleil dans le ciel. Comme on peut le voir sur le graphique ci-dessous, la position du soleil dans le ciel est plus haute en été qu'en hiver.

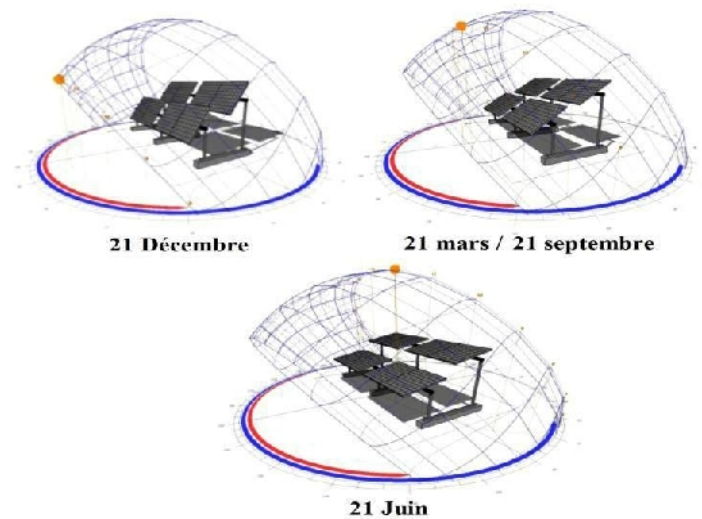


Figure VI.4 : la position du soleil dans le ciel en été et en hiver

Avec le système photovoltaïque orientable proposé, on peut modifier l'inclinaison tous les mois, mais par facilité, on peut également choisir une inclinaison pour chaque saison. L'orientation optimale de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques, s'avère la méthode idéale pour optimiser le générateur PV et dans ce cas de figure, on distingue deux méthodes:

1. Première méthode

Le système de poursuite est commandé par une commande électronique. En pratique, ce genre de réalisation revient très cher pour une augmentation du rendement. Ces systèmes qui sont, en général installés en milieu saharien fonctionnent souvent sous des conditions climatiques très hostiles, des vents de sable très fréquents avec des niveaux et du gradient de température très important pouvant facilement endommager les commandes électroniques.

A. Deuxième méthode

C'est la variation de l'angle d'inclinaison, mensuellement, en concevant et en réalisant une structure porteuse avec plusieurs positions, et chaque position correspondant à une inclinaison mensuelle optimisée. C'est la méthode la moins chère et la plus pratique.

Conclusion

Conclusion :

De nos jours l'énergie photovoltaïque est une voix prometteuse pour l'utilisation en plusieurs domaines, allant des petites applications domestiques jusqu'aux applications dans l'espace.

L'énergie photovoltaïque est propre et naturelle toutefois le coût de réalisation reste à réduire pour optimiser le rendement d'une installation, plusieurs paramètres doivent être pris en considération, à savoir, l'étude complète des besoins, car une surestimation de la production conduit à la détérioration des équipements, (panneaux et batteries) et son sous estimation provoque des coupures de courant.

Un autre point qu'il faut étudier est le site géographique de l'installation, à savoir l'angle d'inclinaison et d'incidence.

Les suiveurs solaires est une des solutions pour optimiser la production photovoltaïque, mais leur coût est élevé, donc l'orientation des panneaux manuellement chaque début de saison reste la meilleure procédure pour optimiser la production.