

Chapitre 3 : Energie solaire photovoltaïque

Principe d'une installation photovoltaïque, le gisement solaire en Algérie, Technologies des cellules photovoltaïques, Les modules photovoltaïques, MPPT, Caractéristiques et connectique photovoltaïque, Normes. L'onduleur (rôle, principe, caractéristiques et rendement). Exemple d'une installation photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source (le Soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain.

1. Historique

Plusieurs décennies séparent les premières applications spécifiques du photovoltaïque (PV) à la maturité technologique permettant un large accès à l'électricité.

1.1. Premières centrales isolées

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

Dès les années 60, les premiers panneaux solaires équipent les satellites. Puis à partir de 1970. La baisse des coûts et l'augmentation progressive du rendement des modules photovoltaïques ont permis de diversifier les applications, en particulier pour les besoins d'électrification rurale. Dans les années 1980, de nombreuses installations photovoltaïques autonomes pour l'électrification d'habitations ont été réalisées : des refuges de montagne ont été équipés en photovoltaïque

1.2. Développement du photovoltaïque

Les années 1990 ont vu le développement du photovoltaïque raccordé au réseau, ce qui apparaissait, à l'époque, comme une aberration économique. Les résultats ont dépassé toutes les prévisions, puisqu'à présent dans certaines régions, le kWh d'origine photovoltaïque injecté sur le réseau présente le coût actualisé le plus faible par rapport à toutes les autres sources d'énergie. Historiquement, les systèmes autonomes étaient réservés, de par leur coût élevé, aux applications professionnelles pour lesquelles l'électricité était nécessaire et non substituable par d'autres sources (réseau, groupe électrogène).

2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La cellule solaire est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V.

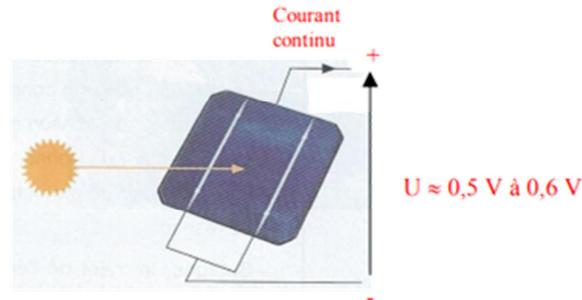


Figure 1

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semiconducteur) :

- une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P),
- une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N)

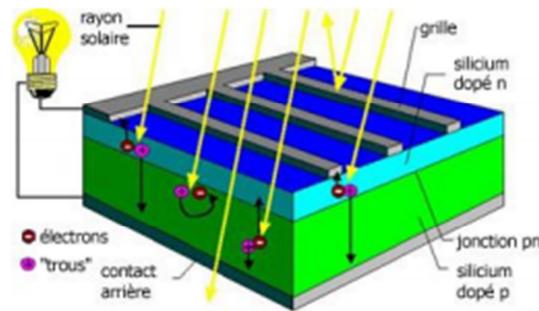


Figure 2

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.

A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium.

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur **aspect bleu foncé**.

3. Module solaire ou photovoltaïque

3.1. Association des cellules en série

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir une tension plus importante : **le module solaire ou panneau photovoltaïque**. Un panneau photovoltaïque est un assemblage en série de cellules permettant d'obtenir une tension de 12 volts par exemple. La puissance d'un panneau solaire est fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules photovoltaïques.

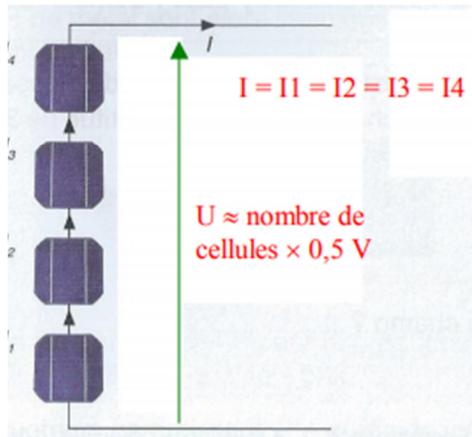


Figure 3

Exemple :

6 cellules placées sur 3 rangées constituent un module solaire de 18 cellules en série. La tension fournie par ce module est de $0.5 \times 18 = 9\text{V}$

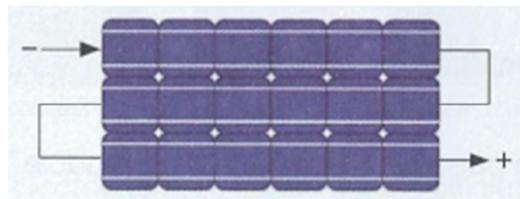


Figure 4

Un panneau constitué de 24 cellules photovoltaïques va donc délivrer une tension U de 12 V, et cela quel que soit l'ensoleillement. Mais pour faire fonctionner des appareils électriques, c'est l'intensité I du panneau, variant en fonction de l'ensoleillement, qui va déterminer l'énergie électrique.

3.2. Définition du watt crête

La puissance crête d'une installation photovoltaïque est la puissance maximale délivrée par un module dans les conditions optimales (orientation, inclinaison, ensoleillement,...). Elle s'exprime en Watt crête (W_c).

3.3. Diodes « by-pass »

La mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre. Elle va s'échauffer et risque de se détruire.

Une cellule "masquée" voit l'intensité qui la traverse diminuer. D'où, elle bloque la circulation de l'intensité "normale" produite par les autres modules : la cellule masquée produit un courant moins et relatif à l'intensité de la lumière par rapport aux autres cellules reliées en séries. Par conséquent, la cellule masquée sera une charge et la tension aux bornes de cette cellule "masquée" augmente, d'où apparition d'une surchauffe. C'est l'effet **d'autopolarisation** inverse. Une telle cellule est appelée "**Hot spot**".

Pour supprimer ce problème et protéger la cellule « masquée », on place des diodes « bypass » en anti-parallèles sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées. Un panneau solaire dispose d'une à trois diodes by-pass, en fonction de son nombre de cellules (en moyenne 36 cellules pour 3 diodes bypass).

En cas de masque :

- 1 diode **by-pass** : 100 % du module est en by-pass
- 2 diodes **by-pass** : 50 % du module est en by-pass
- 3 diodes **by-pass** : 33 % du module est en by-pass.

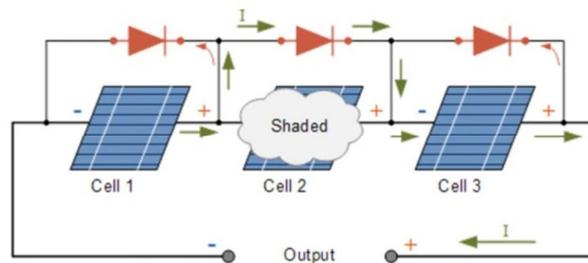


Figure 5

Les diodes montrées en rouge dans la figure 4 sont des diodes by-pass. La cellule 2 est masquée, par conséquent la diode by-pass fait passer le courant pour protéger la cellule 2.

Exemple :

Soit un assemblage de trois rangées de cellules solaires. Une cellule d'un rangé est ombrée par une feuille comme le représente la figure. Au niveau de la 2ème rangée, le courant passe par la diode by-pass pour cause d'ombrage

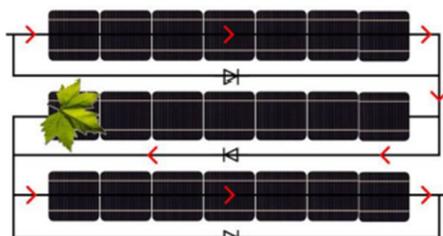


Figure 6

4. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de 1000W/m² d'une température ambiante de 25°C et d'un spectre AM de 1.5. AM. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort.

La figure 7 présente la courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque avec les points importants qui la caractérise.

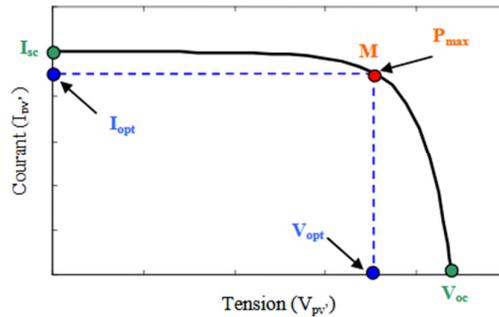


Figure 7

Exemple de module photovoltaïque:

Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du module (I_{sc} , I_{mpp} , V_{oc} , V_{mpp}) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de 1000W/m² et une température de 25°C, AM 1.5). Le tableau suivant montre les données d'un module photovoltaïque, de type SIEMENS SM 110-24.

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_{mpp}	110 W
Courant au point de puissance maximale I_{mpp}	3.15 A
Tension au point de puissance maximale V_{mpp}	35 V
Courant de court-circuit I_{sc}	3.45 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	43.5 V
Coefficient d'incrémentation du courant I_{sc} (α_{sc})	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc}	-152 mV/°C

Lorsque la cellule est éclairée, les charges électriques situées dans la zone de charge d'espace se séparent. Dans la liaison électrique, une tension continue d'environ 0,5 V se forme..

-Puissance maximale

La puissance maximale d'une cellule est définie pour un flux lumineux de 1000 W/m² à une température de 25°C. Elle est exprimée en Wc.

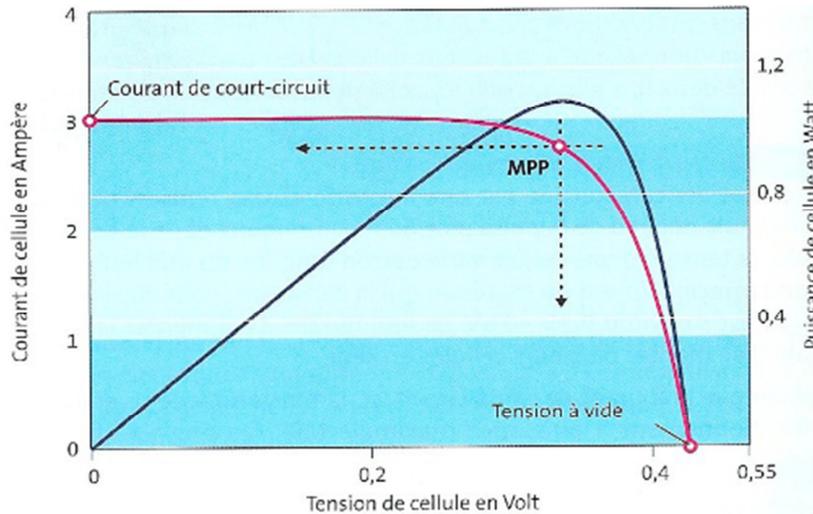


Figure 8

-Courant de court-circuit et tension à vide

On distingue le courant de court-circuit I_{cc} , la tension à vide U_0 et le point de fonctionnement à puissance maximale MPP dont les grandeurs caractéristiques sont U_{MPP} et I_{MPP} .

-Influence de l'éclairement E

Plus l'éclairement augmente et plus le module est performant puisque la puissance PV produite augmente.

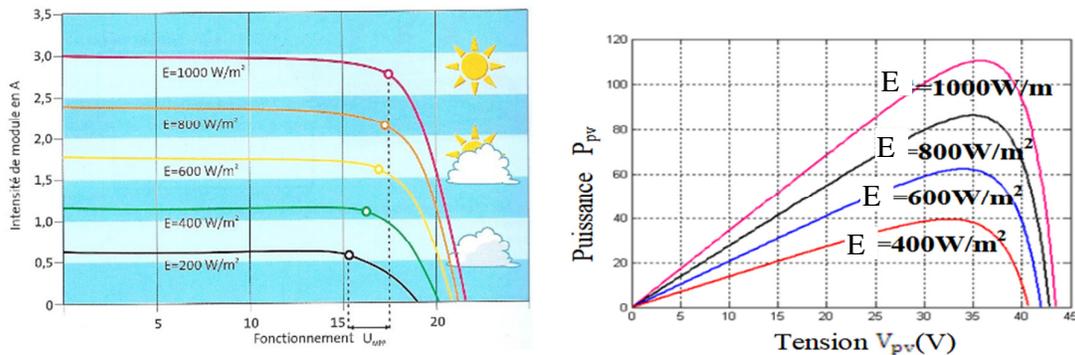


Figure 9

-Influence de la température

Le réchauffement d'une cellule solaire conduit à une diminution du rendement (environ 0,5% par degré Celsius). La perte de rendement pour des modules mal ventilés est ainsi de 4 à 6% supérieure à celle des modules munis d'une ventilation en face arrière.

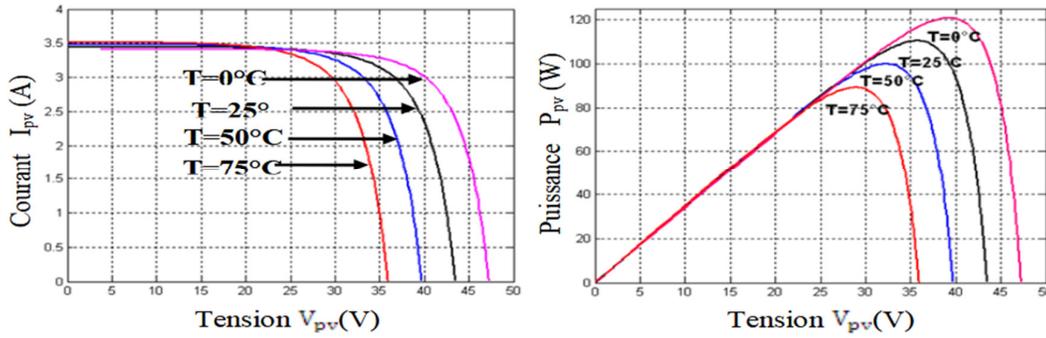


Figure 10

Une élévation de la température de jonction des modules solaires provoque une diminution de la tension et une augmentation du courant. Dans le cas de cellules au silicium, le courant augmente d'environ 0.025 mA/cm² °C; alors que la tension diminue de 2.2 mV/°C. Plus la température augmente et moins le module est performant.

4. Classification des systèmes photovoltaïques

4.1. Autoconsommation avec stockage

Le principe est de stocker l'énergie l'énergie produite par le générateur photovoltaïque en journée et de la restituer le soir pour la consommation locale. Cependant, pour des raisons économiques, le stockage est limité à quelques heures de fonctionnement et ne permet pas de s'affranchir totalement du réseau électrique, figure 6.

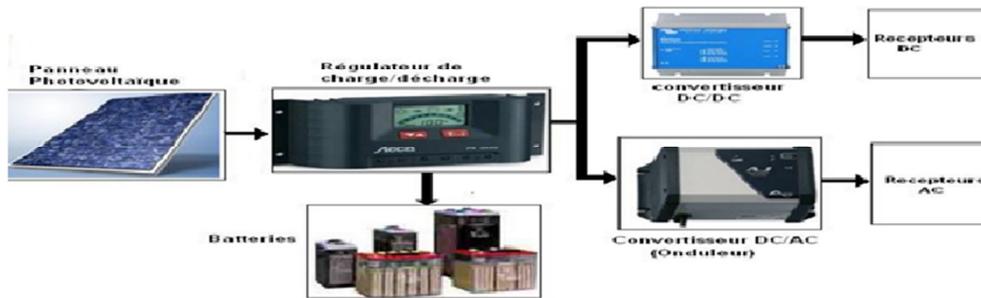


Figure 11

4.2. Autoconsommation sans stockage

ces systèmes ne comportent de batteries de stockage. L'énergie produite sera consommée, figure 7.

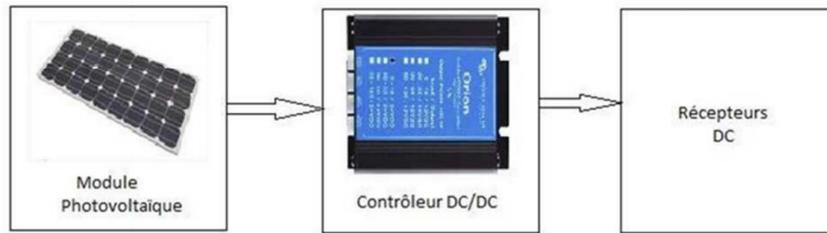


Figure 12

4.3. Les systèmes raccordés au réseau

Un système photovoltaïque connecté au réseau, c'est un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.

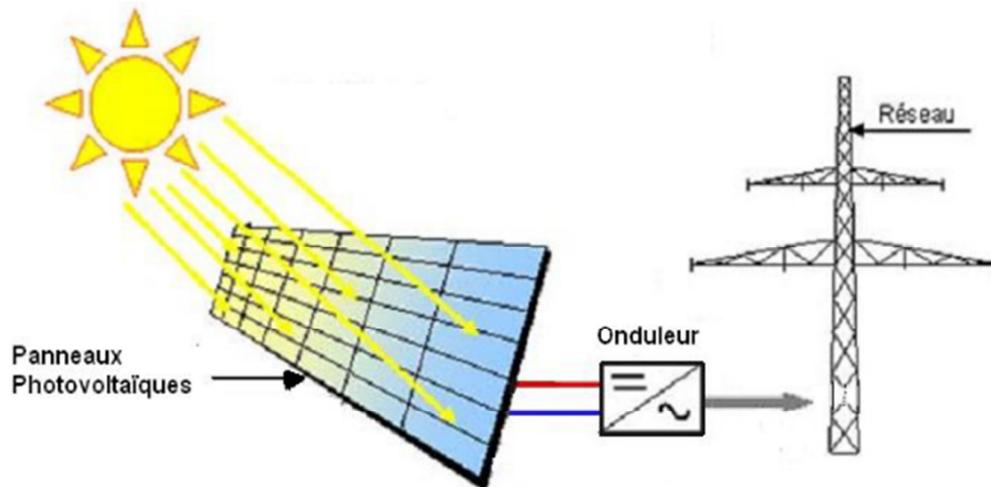


Figure 13

5. Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10^6 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autre sources d'énergie. Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à $10 \mu\text{m}$, l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande visibles (0.4 à $0.8 \mu\text{m}$).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$).

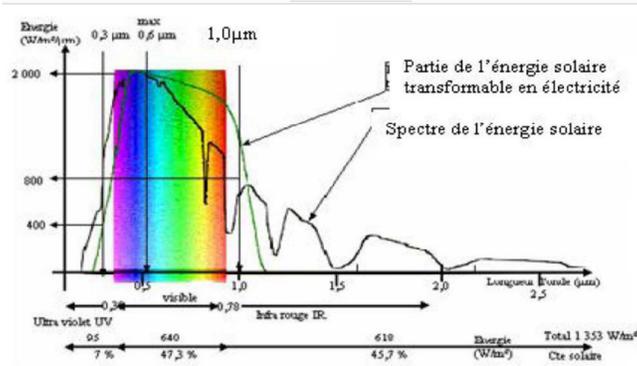


Figure 14

6. Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays. Le tableau 2.2 résume le potentiel solaire en Algérie.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m2/an)	1700	1900	2650

Le potentiel solaire de l'Algérie est de 169,440 Tera-Watts.heure/an (TWh/an) pour le solaire thermique et de 713,9 TWh/an pour le photovoltaïque.

L'irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien au mois de juillet est montrée dans la figure 15.

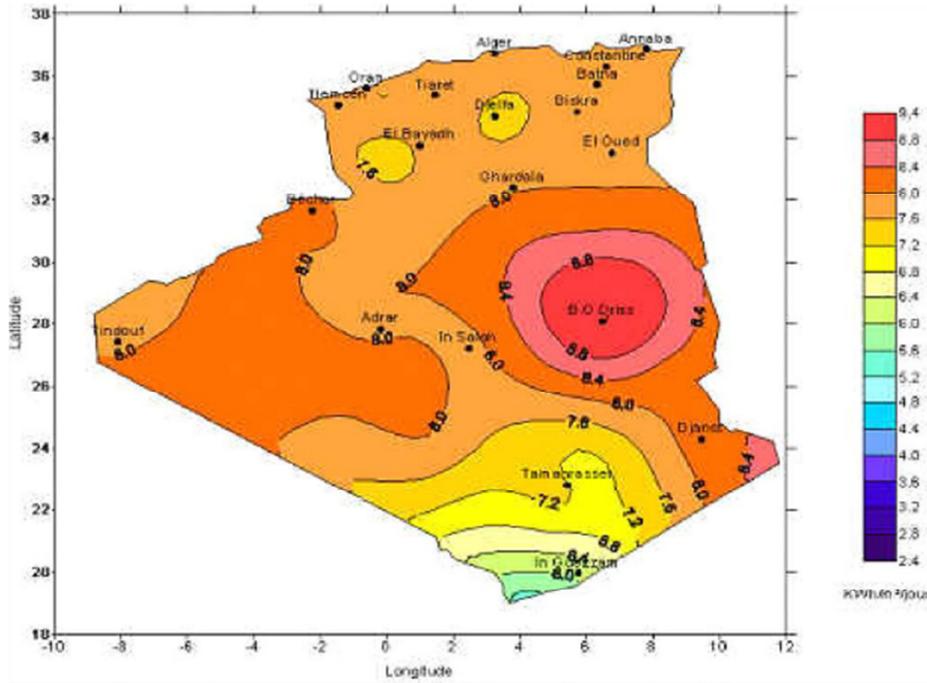


Figure 15

7. Constitutions du système photovoltaïque

7.1. Modules photovoltaïques

Les modules sont un assemblage de photopile (ou cellule) montée en série, afin d'obtenir la tension désirée (12V, 24V...). La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion du rayonnement. Plusieurs cellules sont associées dans un module qui est la plus petite surface de capacité transformable, montable et démontable sur un site. Les modules sont regroupés en panneaux, qui sont à leur tour associés pour obtenir des champs photovoltaïques selon les besoins. Les cellules photovoltaïques sont réalisées principalement par le silicium cristallin, qui est utilisé sous forme monocristalline ou multi-cristalline en plaquette ou en ruban ou encore en couches semi-minces sur substrat selon les technologies récentes. Les modules sont associés en série et en parallèle pour obtenir des puissances importantes et la tension voulue. On protège chaque cellule PV contre l'échauffement en lui montant une diode dite »diode by-pass « en parallèle qui court-circuite. Aussi on évite qu'un module PV soit récepteur en mettant en série à chaque branche une diode dite « diode anti retour » de chute de tension négligeable.

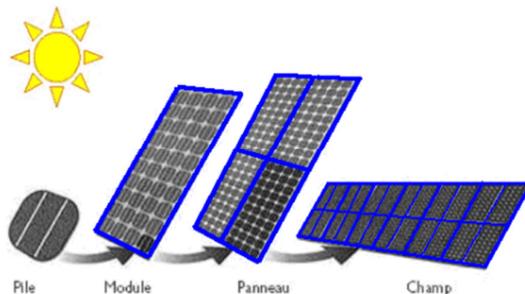


Figure16.a

7.1.1. Différent types des cellules solaires

Lorsque nous avons présenté le fonctionnement des cellules solaires, nous avons évoqué pour quelques-uns les matériaux qui les constituent. [13,14]. On peut distinguer deux grandes familles de matériaux photovoltaïques utilisés dans des installations:

- les matériaux cristallisés, d'épaisseur de 0.15 à 0.4 mm,
- les couches minces, d'épaisseur faible d'ordre du micron.

Le matériau le plus répandu de nos jours est le silicium, semi-conducteur tétravalent. Le silicium est soit cristallin, soit amorphe:

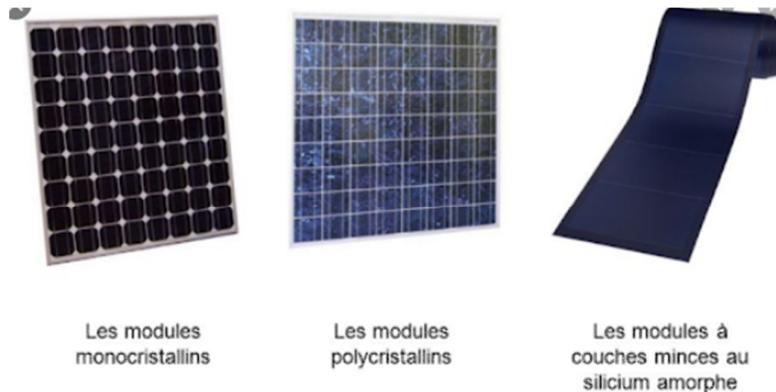


Figure 16.b

7.1.1.1. Silicium monocristallin

Les cellules qui en sont composées sont les plus performantes sur le marché: elles présentent un bon rendement à fort et moyen éclairage. Toutefois, leur prix reste élevé.

Le silicium monocristallin est un matériau pur à 99,999 % et se présente sous la forme d'un cristal unique de grandes dimensions. Il affiche les meilleurs rendements sur le marché des produits actuellement disponibles.

- Rendement électrique des panneaux : 15 % STC :
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc
- Gamme d'éclairage : 100 à 1 000 W/m²
- Usage: tous usages extérieurs de forte et moyenne puissance (télécommunication, balisage, relais, habitat.) [13,14].2.3.3.2

7.1.1.2. Silicium multicristallin

Il est le plus répandu actuellement et les caractéristiques électriques des cellules multicristallines sont similaires aux monocristallines. Toutefois, il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairages modérés, et également moins onéreux du fait d'une fabrication moins complexe.

- Rendement électrique des panneaux : 12 à 14 % STC
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc
- Gamme d'éclairage : 200 à 1 000 W/m²
- Usage : même usage que le silicium monocristallin

7.1.1.3. Modules en couches minces

Les modules en couches minces commencent à se développer pour leurs qualités physiques qui représentent de gros avantages par rapport au silicium cristallin. Quand le matériau est rare et cher pour le silicium polycristallin, il est d'autant plus intéressant d'essayer d'en utiliser le moins possible, c'est le principe des cellules en couches minces. Plusieurs technologies existent:

Le silicium amorphe (a-si, filière historique),

- le silicium cristallin en couche mince,
- le tellure de Cadmium (CdTe, filière innovante),
- le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS ; filières innovantes),
- les cellules à double (tandem) ou à triple jonction (3a-si),
- les cellules à base d'oxyde de titane.

7.1.1.3.1. Silicium Cristallin

Le Silicium cristallin dit couche mince repose sur le principe de déposer une couche mince de silicium polycristallin sur divers substrats de silicium métallurgique peu purifié, quartz, céramique ou métal.

7.1.1.3.2. Silicium amorphe

Le silicium amorphe est non cristallin et est produit par pulvérisation cathodique de silicium ou de décomposition du silane. Les modules à base de silicium en couches minces présentent également l'avantage de garder un bon niveau de production lorsque la luminosité est faible ou lorsque la température est élevée. Etant en couche très mince, il répond à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est moins onéreuse et permet de réaliser de petits formats de panneaux.

- Rendement électrique des panneaux : 5 à 7 % STC (jusqu'à 9 % pour les multijonctions)
- Puissance des panneaux extérieurs : 0.5 à 60 Wc.
- Gamme d'éclairement : de 20 lux à 1 000 W/m².
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculatrices.), électronique de faible consommation en extérieur.

7.2. Régulateur de charge et décharge

Le régulateur électronique dans un système photovoltaïque gère la charge et la décharge de la batterie. Il limite la tension de la batterie afin d'éviter une surcharge, en déconnectant la batterie trop chargée des modules PV. Quand la batterie est trop déchargée, il la déconnecte de l'utilisation, par un disjoncteur automatique pour la protéger contre la décharge profonde. Dans un système PV, en l'absence d'un régulateur, les accumulateurs seront exposés à une perte d'eau donc un vieillissement prématuré et à la sulfatation des plaques. Le régulateur dans un système photovoltaïque peut assurer aussi le rôle de la compensation thermique. Il est situé entre le champ de modules et les batteries accumulateurs.

Deux types se divisent le marché :

Le PWM et le MPPT.



7.3. Batteries d'accumulation

Dans un système photovoltaïque, la ressource solaire ne pouvant être disponible à tout moment, il est indispensable de stocker de manière journalière ou saisonnière de l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. On utilise pour cela des batteries d'accumulateurs. Les batteries les plus courantes sont de type plomb-acide a plaque plane pour les installations de faible puissance .Il existe aussi des accumulateurs de type nickel-cadmium qui sont chères et qui posent des problèmes de régulation de tension. A long terme, on pourra voir apparaître d'autre système de stockage. La batterie est constituée essentiellement des deux électrodes l'une positive et l'autre négative et une solution électrolytique : solution d'acide sulfurique de viscosité variable [15].Les batteries sont connectées au régulateur électronique car elles sont chargées à travers le régulateur et elles alimentent les charges par biais du même régulateur. Nous pouvons associer plusieurs batteries en série pour obtenir une tension adaptée à l'utilisation et on les associe en parallèle pour avoir la capacité et la puissance nécessaire à l'autonomie désirée. Les tensions des batteries seront déterminées par rapport à celle aux récepteurs à courant continu et la tension des modules .Le nombre de batterie sera déterminé à partir de l'autonomie désirée.



Figure 17

7.4. Onduleur de tension

La tension produite par les modules photovoltaïques est continue et celle fournie par les batteries pour l'alimentation des charges est aussi de nature continue. Dans ces conditions, il faudra intégrer obligatoirement un onduleur au système PV destiné à alimenter des charges alternatives. L'onduleur est un convertisseur DC/AC, c'est-à-dire convertir la sortie continue (DC) du champ de module ou des batteries en électricité alternative(AC).



7.5. Contrôleur DC/DC

Il peut arriver que dans un système PV, la tension de sortie du champ ou de la batterie soit inférieure ou supérieure à celle de l'utilisation, qui doit être alimenté en continu. Il est donc

nécessaire pour ces système, un convertisseur DC-DC transforme une tension continue de son entrée en une tension de sortie continue inférieure ou supérieure à celle de l'entrée selon qu'il soit abaisseur ou élévateur .Il permet de contrôler le signal d'alimentation de la charge et le stabilise. Les câbles relient électriquement tous les composants du système PV. Le câblage est un point critique de toute installation PV. Il est très important de bien dimensionner les conducteurs afin d'éviter la circulation d'un courant très fort dans les câbles même pour de petites puissances dans le cas d'utilisation de faibles tensions. Le choix des câbles dont l'enveloppe est adaptée aux conditions d'utilisation est nécessaire.

7.6. Récepteurs et charges

Les récepteurs ou charges (utilisation) font partie du système PV. Leurs tensions d'usage et leurs puissances déterminent les caractéristiques des éléments du système. Les récepteurs doivent être choisis avec soin. Lorsque c'est possible, il faut choisir les récepteurs de grand rendement .Après le choix des charges à alimenter par notre mini-centrale PV, nous relèverons leur caractéristiques qui nous permettrons de déterminer la puissance à installer.

PARTIE 2 Méthode de Dimensionnement des Systèmes Photovoltaïques

1. INTRODUCTION

«Dimensionner», c'est fixer la «taille», les caractéristiques optimales de chaque élément d'un système dont on connaît la configuration. En effet, le dimensionnement peut amener finalement à changer le système, par exemple s'il s'avère que des éléments «optimaux» sur le plan technique sont très chers, ou indisponible, etc... La méthode de dimensionnement consiste à déterminer d'abord la puissance crête qui fournit l'énergie électrique nécessaire pendant le mois le moins ensoleillé (généralement décembre). Elle consiste à déterminer le moment où vous avez besoin d'électricité, et à mesurer votre consommation. Cette étape comporte peu de calculs, mais demande relativement beaucoup de réflexion car une erreur à ce stade faussera vos résultats jusqu'à la fin.

2. Les besoins en énergie électrique

Il s'agit d'estimer la consommation d'équipements supposés connus. L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour et par période (été, hivers, vacances...) L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour $E(Wh/j)$ est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, à savoir la télévision, les lampes d'éclairage, les appareils électroniques, etc...;

Elle est donnée par la loi suivante:

$$E = \sum E_i \tag{1}$$

Le temps moyen d'utilisation est plus délicat à cerner; il faut le rapporter à:

- La saison,
- Le nombre d'occupants.

Pour les équipements qui ne sont pas utilisés quotidiennement et pour tous les équipements à forte consommation, partez de la durée du cycle de fonctionnement de la tâche. Ainsi, la consommation de chaque équipement peut être calculée comme suit:

$$E_i = P_i \times t_i \tag{2}$$

L'énergie journalière consommée d'un équipement (Wh/j) = la puissance de cet équipement (W) × la durée d'utilisation de chacun (h).

Exemple :

Appareils	Nombre	Puissance unitaire	Fréquence ou durée d'utilisation quotidienne	Puissance	Energie
Tubes fluos	2	18 W	Fonctionnement permanent 12h	36 W	432 Wh
Lampes fluo compactes - Extérieur	2	20 W	En soirée 2 h	40 W	80 Wh
Lampes fluo compactes - Salle resto.	2	20 W	Fonctionnement 4h	40 W	160 Wh
2 Lampes fluo compactes - Etage	3	20 W	En soirée 2 h	40 W	80 Wh
1 Lampes fluo compacte - Annexe	1	20 W	Occasionnel 1h/jour	20 W	20 Wh
1 lampes fluo compacte - WC	1	20 W	Occasionnel 2h/jour	20 W	40 Wh
1 lampes fluo compacte - Douche	1	20 W	Occasionnel 1h/jour	20 W	20 Wh
1 lampe fluo compacte - Hall douche	1	20 W	Occasionnel 2h/jour	20 W	20 Wh
Congélateur 1	1	0.75 A / 110 W	Permanent 12h	110 W	1320 W
Congélateur 2	1	110 W	Permanent 12 h	110 W	1320 W
Congélateur 3	1	90 W	Permanent 12 h	90 W	1080 W
Spot fluo resto	1	30 W	Occasionnel 1 h	30 W	30 Wh
TOTAL				P_{TOT} = 576 W	Ec = 4602 Wh

Ec est l'énergie journalière consommée en Wh.

3. L'énergie électrique fournie par le générateur photovoltaïque

Elle dépend bien sûr de l'ensoleillement reçu et de l'orientation du panneau. L'estimation de l'énergie solaire reçue sur le site est simple, mais il faut tenir compte des caractéristiques propres au site de l'installation lui-même.

3.1. Estimation de l'énergie solaire reçue sur un site donné

Cette estimation doit tenir compte à la fois:

- Des données statistiques concernant l'énergie solaire reçue sur la région d'installation;
- Des caractéristiques propres au site et susceptibles d'empêcher le panneau photovoltaïque de recevoir toute l'énergie possible (du fait des masques, neige, poussière...).

3.2. Choix de la tension du fonctionnement

Le choix de la tension nominale d'un système dépend de la disponibilité de matériels (modules et récepteurs), aussi, il dépend des niveaux de puissance et d'énergie nécessaire selon le type d'application.

Les tensions du système correspondantes à chaque intervalle de puissance crête sont données dans le tableau ci-dessous :

Puissance crête (W _c)	< 500 W _c	500W _c - 2KW _c	>2KW _c
Tension du système (V)	12 VDC	24 VDC	48 VDC

W_c : Watt crête ; P_c : Puissance du champ PV

3.3. Courant produit par le champ PV

Le courant produit par le champ PV est :

$$I_{dc} = P_c / U_{DC \text{ système}} \quad (3)$$

Avec P_c est la puissance produite par le champ photovoltaïque PV, $U_{DC \text{ système}}$ est la tension du système.

3.4. Calcul de la puissance crête P_c du champ PV et le nombre de panneaux PV

Tout d'abord il faut trouver l'énergie à produire E_p qui peut être calculée par :

$$E_p = E_c / k \quad (4)$$

Avec $k=0.65$

Le coefficient k tient compte des facteurs suivants :

- L'incertitude météorologique
- L'inclinaison non corrigée des modules suivant les saisons
- Le point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut-être aggravé par :
 - ✚ La baisse des caractéristiques des modules
 - ✚ La perte du rendement des modules dans le temps (vieillessement et poussières)
- Le rendement des cycles de charge et de décharge de la batterie (90%)
- Le rendement de l'onduleur (de 90 à 95%)
- Les pertes dans les câbles de connexions

Remarque :

Pour les systèmes avec parc batterie, le coefficient k est en général compris entre 0.55 et 0.75. La valeur approchée que l'on utilise pour le système avec batterie sera souvent de 0.65.

Maintenant on peut calculer la puissance crête du champ PV par :

$$P_c = E_p / HSC \quad (5)$$

Avec HSC est le nombre d'heures d'ensoleillement crête donnée en h/jour.

Le nombre de panneaux PV est calculé par :

$$N_p = P_c / P_{cp} \quad (6)$$

Avec P_{cp} est la puissance crête du panneau donnée dans la fiche caractéristique du panneau PV.

3.4.1. Nombre de panneaux PV en série

Le nombre de panneaux PV en série est :

$$N_{PV_série} = U_{tension \text{ système}} / V_{mp} \quad (7)$$

Avec $U_{tension \text{ système}}$ est la tension du système choisie en fonction de la puissance à produire, V_{mp} est la tension de la puissance maximale du panneau.

3.4.2. Nombre de panneaux PV en parallèle

Le nombre de panneaux PV en parallèle est :

$$N_{PV_parallèle} = I_{dc} / I_{mp} \quad (8)$$

Avec I_{dc} est le courant du système calculé par (1.3) en fonction de la puissance à produire, I_{mp} est le courant de la puissance maximale du panneau.

3.5. Calcul des sections des fils de connexion

La section du fil de connexion se calcul par :

Détermination de la longueur du fil de connexion : la longueur consiste de la longueur du fil positif et le fil négatif.

- Connaître la chute de tension maximale ΔU autorisée entre le champ PV et le parc de batteries ou le régulateur de charge ou bien entre les batteries et l'onduleur.
- Calcul du courant max.:

$$I_{max} = Pc / \Delta U \quad (9)$$

avec Pc la puissance crête du champ PV.

- Détermination de la résistance du fil par :

$$R_{fil} = \Delta U / I_{max} \quad (10)$$

- La section du fil est calculée par : $R = \rho l / s$ d'où :

$$s = \rho l / R \quad (11)$$

Avec $\rho = 1.8 \times 10^{-8} \Omega/m$ est la résistivité du cuivre, s est la section du fil et l sa longueur.

3.6. Détermination de la capacité nécessaire du parc batteries

La capacité du parc de batteries peut-être calculé par :

$$C(Ah) = E_c \cdot N / D \cdot U \quad (12)$$

Avec E_c est l'énergie consommée en Wh/j, N est le nombre de jour d'autonomie, D est la profondeur de décharge appelé aussi DOD, U est la tension du système.

3.7. Calcul du nombre de batteries nécessaires au parc

Le nombre de batteries est calculé par :

$$N_b = C / C_B \quad (13)$$

Avec C est la capacité du parc de batterie en Ah et C_B est la capacité d'une seule batterie.

3.7.1. Nombre de batteries en séries

Le nombre de batteries en séries est :

$$N_{BS} = U / U_B \quad (14)$$

Avec U la tension du système et U_B est la tension de la batterie choisie.

3.7.2. Nombre de string de batteries en parallèle

Le nombre de string de batteries en parallèle est :

$$N_{BP} = N_b / N_{BS} \quad (15)$$

Avec N_b est le nombre de batteries du parc de batteries, N_{BS} est le nombre de batterie en série.

4. Caractérisation du régulateur de charge MPPT

4.1. Courant maximal du régulateur de Charge

Le courant maximal du régulateur de charge peut-être calculé par :

$$I_{CC}=I_{SC}\times SF\times N_p \quad (16)$$

Avec I_{CC} est le courant du régulateur de Charge, I_{SC} est le courant court-circuit du panneau PV, SF et un facteur de marge de sécurité qui est pris toujours 25% d'où $SF=1.25$, N_p est le nombre de lignes (string) PV en parallèle puisque leurs courants s'ajoutent.

4.2. Tension maximal du régulateur de Charge

Le courant maximal du régulateur de charge peut-être calculé par :

$$V_{CC}=V_{OC}\times SF\times N_s \quad (17)$$

Avec V_{CC} est la tension du régulateur de Charge, V_{OC} est la tension circuit-ouvert du panneau PV, SF et un facteur de marge de sécurité qui est pris toujours 20% d'où $SF=1.20$, N_s est le nombre PV en série puisque leurs tension s'ajoutent.

4.3. Nombre de régulateur de charge

Le nombre de régulateurs de charge à utiliser est :

$$N_{CC}=I_{CC_nécessaire}/I_{CC_disponible} \quad (18)$$

Avec $I_{CC_nécessaire}$ est le courant que doit supporter le régulateur de charge dans le système, $I_{CC_disponible}$ est le courant max que peut supporter le régulateur de charge disponible.

5. Caractérisation de l'onduleur

5.1. Puissance totale nécessaire de l'onduleur

Il faut séparer les charges qui fonctionnent à courant AC telles que la machine à laver, le réfrigérateur, climatiseur, ... des charges DC telles que les lampes à LED, téléphone portable, ordinateur, ...

$$P_{DC}=P_{ordinateur}+P_{téléphone\ portable}+P_{lampes\ à\ LED}+\dots$$

$$P_{AC}=P_{climatiseur}+P_{réfrigérateur}+P_{machine\ à\ laver}+\dots$$

$$P_{onduleur}=(P_{DC}+3.P_{AC}).1.25 \quad (19)$$

5.2. Calcul du courant DC d'entrée de l'onduleur

Le courant DC d'entrée de l'onduleur peut être calculé par :

$$I_{DC_onduleur}=P_{onduleur}/(U_{tension\ système}\cdot\eta_{onduleur}) \quad (20)$$

Avec $\eta_{onduleur}$ est le rendement de l'onduleur

5.3. Calcul du courant AC de sortie de l'onduleur

Le courant AC de sortie de l'onduleur peut être calculé par :

$$I_{AC_onduleur}=P_{onduleur}/V_{AC_onduleur} \quad (21)$$

Avec $P_{onduleur}$ est la puissance charge calculée par (18) et $V_{AC_onduleur}$ est la tension AC de l'onduleur.