



LES NOTIONS DE BASE EN PHOTOVOLTAÏQUE

Dr. Nadjoua BELLEL

ISBN: 978-9931-9243-9-5

Sommaire :

Chapitre 1 : L'électricité

1	L'électricité, c'est quoi ?.....	6
2	Les grandes valeurs en électricité:	7
2.1	La Tension ou différence de potentiel (U) :	7
2.2	L'intensité (I) :.....	7
2.3	La résistance (R) :.....	7
2.4	La puissance électrique (P) :.....	8
2.5	La consommation d'énergie :	8
3	Les types de courant :	9
3.1	Le courant continu (DC direct current) :	9
3.2	Le courant alternatif (AC alternative current) :	9
4	Les groupements d'éléments :	10
4.1	Les éléments en Série :	10
4.2	Les éléments en parallèle :	11
5	Mesures électriques :.....	12

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

1	L'énergie solaire :.....	14
2	Les types de l'énergie solaire :.....	14
2.1	Le solaire thermodynamique :	14
2.2	Les différents types de centrales solaires thermodynamiques :.....	14
2.3	Le solaire thermique :.....	17
2.4	Le solaire photovoltaïque :	19
3	Gisement solaire :	20
3.1	Le système terre-soleil :.....	20
3.2	Le rayonnement solaire :	21
3.3	Appareils de mesures du rayonnement solaire :	22
3.4	Repérage du soleil dans le ciel :	24
3.4.1	La longitude	24
3.4.2	La latitude	25
3.4.3	L'altitude (Z) :.....	25
3.4.4	La déclinaison solaire	25

3.4.5	L'angle horaire	26
3.5	Les coordonnées célestes horizontales:	26
3.6	Les cinq temps :	27
3.6.1	Temps universel :	27
3.6.2	Temps solaire local :	27
3.6.3	Equation du temps :	27
3.6.4	Temps solaire vrai :	28
3.6.5	Heure légale :	28

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

1	La conversion photovoltaïque :	30
2	Le principe de la conversion photovoltaïque:	30
3	L'absorption de la lumière dans le matériau:	31
4	Le transfert de l'énergie des photons aux charges électriques:	32
5	Les semi-conducteurs :	34
5.1	Le dopage de semi-conducteur :	35
5.1.1	Dopage de type N :	35
5.1.2	Dopage de type P :	35
5.2	La Jonction PN :	36
6	Effet photovoltaïque :	37
7	Principe de fonctionnement d'une cellule PV :	37
8	Les types des cellules photovoltaïques :	39
8.1	Cellule en silicium monocristallin :	39
8.2	Cellule en silicium poly-cristallin :	40
8.3	Cellule amorphe :	41
9	Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :	41
9.1	Zones de fonctionnement du module photovoltaïque :	42
9.2	Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque :	42
9.2.1	Le courant de court-circuit I_{cc} :	43
9.2.2	La tension en circuit ouvert U_{co} :	43
9.2.3	Influence de la température et de l'éclairement :	44
9.2.4	Facteur de forme (FF) :	45

10	Cellules, panneaux et champs photovoltaïques :.....	46
11	Groupements de cellules :	47
11.1	Principe :.....	47
12	De la cellule au module PV :.....	48
12.1	L'encapsulation des cellules PV :	48

Chapitre 4 : Installation solaire

1	Installation Solaire :	52
2	Le Panneau Solaire :	52
2.1	Performance du panneau Solaire :	54
3	Le régulateur :	55
3.1	Fonctionnement du régulateur :	56
3.1.1	Régulation PWM (Pulse Width Modulation) :.....	56
3.1.2	Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) :	56
3.2	Paramètres qui définissent un régulateur :.....	57
4	L'onduleur :	58
4.1	Caractéristiques de fonctionnement:	59
5	La batterie :	59
5.1	Principe de fonctionnement :	61
5.2	Paramètres de la batterie :.....	61
5.3	La durée de vie d'une batterie solaire :.....	61
5.4	Association de batteries :	62
6	Le câblage :	62

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

1	Dimensionnement :	65
1.1	Consommation énergétique :	65
1.2	Energie solaire récupérable :	66
1.2.1	Inclinaison et orientation optimales des capteurs photovoltaïques :	66
1.2.2	Ombrage :	68
1.3	Dimensionnement du générateur photovoltaïque :	68
1.3.1	Puissance crête d'un générateur photovoltaïque :	68

1.3.2	Tension de fonctionnement du champ photovoltaïque :	69
1.3.3	Nombre de panneaux photovoltaïques à utiliser :	69
1.4	Dimensionnement du parc de batteries :	71
1.4.1	Nombre de batteries en séries :	71
1.4.2	Nombre de batterie en parallèles :	72
1.5	Dimensionnement du régulateur de charge :	73
1.6	Dimensionnement de l'onduleur :	73
1.7	Le dimensionnement des câbles électriques solaires :	74
2	Installation solaire :	75
	Références	78

Chapitre 1 : L'électricité

Chapitre 1 : L'électricité

1 L'électricité, c'est quoi ?

C'est une énergie qui existe à l'état naturel (l'éclair lors de l'orage) mais qui est difficilement stockable.

L'électricité est un phénomène électromagnétique créé par l'interaction de particules présentes dans la matière qui sont chargées positivement ou négativement et dont les effets peuvent être utilisés pour générer de l'énergie. La matière est composée d'atomes constitués d'un noyau central formé de protons et de neutrons. Les protons ont une charge positive et les neutrons, comme leur nom l'indique, sont neutres et n'ont pas de charge. Autour du noyau de l'atome gravitent plusieurs électrons qui ont une charge négative.

Normalement, dans un atome, la charge négative des électrons et la charge positive des protons sont de même grandeur. L'atome est alors électriquement neutre. Cependant, dans certaines conditions, un électron peut quitter l'atome ou s'y ajouter. Ainsi les électrons peuvent circuler dans la matière et créer un courant électrique, ou peuvent s'accumuler en certains endroits et créer de l'électricité statique. Un courant électrique est la circulation d'électrons libre entre 2 points d'un conducteur. Un électron libre est un électron qui peut se détacher facilement du noyau de l'atome qu'il constitue.

Les corps qui possèdent des électrons libres sont appelés des conducteurs (ex. les métaux, mais aussi le corps humain et la terre). Ceux qui n'en possèdent pas, des isolants (ex. verre, plastique, bois,...).

L'énergie du mouvement de ces électrons libres constitue l'énergie électrique. Si on organise ces mouvements et que tous les électrons libres se déplacent dans la même direction en même temps, on crée un courant électrique. Produire de l'électricité consiste donc à obliger les électrons à se déplacer ensemble dans un matériau conducteur qui facilite le mouvement.

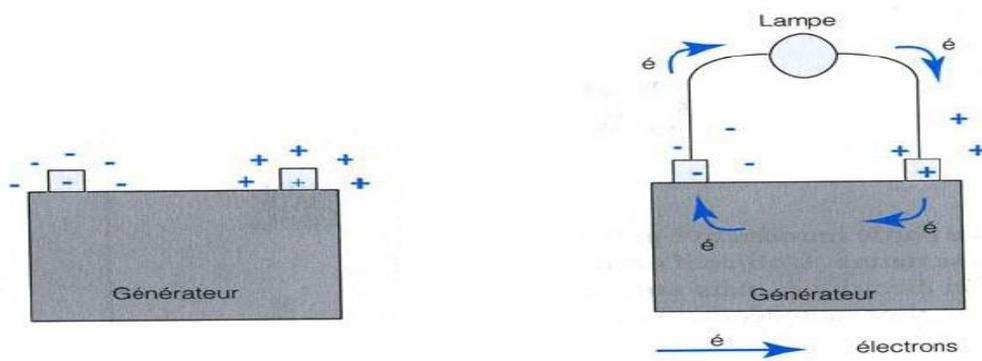


Figure 1 : Générateur d'un courant électrique.

Chapitre 1 : L'électricité

2 Les grandes valeurs en électricité :

Pour maîtriser l'électricité, il convient de distinguer les différentes valeurs qui la caractérisent et de comprendre ses bases fondamentales.

2.1 La Tension ou différence de potentiel (U) :

La tension caractérise la force qui doit être imposée pour faire circuler les électrons dans un matériau conducteur.

Le générateur agit comme une « pompe à électrons ». Il existe une dépression à ses bornes de sortie que l'on appelle différence de potentiel ou tension et qui s'exprime en volt (V). Il existe une différence de charge entre le pôle + et le pôle – du générateur. On appelle cette différence : la différence de potentiel ou **Tension**.

2.2 L'intensité (I) :

L'intensité correspond au débit d'électrons qui traverse un circuit.

Lorsque l'on branche une lampe sur un générateur, une certaine quantité d'électrons transite par les fils et le filament de la lampe. Ce flux d'électrons correspond à l'intensité exprimée en ampère (A).

2.3 La résistance (R) :

La résistance empêche les électrons de circuler. C'est la tension qui pousse le courant au travers du fil électrique.

Une résistance est un matériau qui permet à l'énergie électrique de se transformer en énergie **calorifique**. Elle s'exprime en Ohm (Ω). Plus la résistance est grande, plus le courant a des difficultés à passer. Inversement, plus la résistance est faible, plus le courant passe facilement.

La relation entre la valeur R d'une résistance, la tension U à ses bornes et l'intensité I qui la traverse est appelée la loi d'Ohm. Elle s'écrit :

$$U = R \times I$$

Chapitre 1 : L'électricité

U : tension aux bornes de la résistance, en volt (V).

I : intensité qui traverse la résistance, en ampère (A).

R : valeur de la résistance, en Ohm (Ω).

2.4 La puissance électrique (P) :

La puissance électrique indique la quantité d'énergie qu'un appareil transforme durant une période de temps. Elle se calcule en multipliant la tension par l'intensité et s'exprime en Watt (W). On en déduit que plus le récepteur est puissant, plus il absorbe de courant.

La puissance électrique est calculée avec la formule suivante :

$$P=U \times I$$

P : la puissance électrique, en watt(W).

U : tension aux bornes de la résistance, en volt (V).

I : intensité qui traverse la résistance, en ampère (A).

2.5 La consommation d'énergie :

La consommation d'énergie s'obtient en multipliant la puissance d'un appareil par sa durée d'utilisation exprimée en heures. C'est la quantité d'électricité produite ou consommée pendant une période de temps donnée. Elle s'exprime en kilowattheures (kWh) avec la relation :

$$E=P \times t$$

E : l'énergie consommée, en kilowattheures (kWh).

P : la puissance électrique, en kilowatt (kW).

t : le temps, en seconde (s).

Exemple : une lampe de 100W qui fonctionne 5H aura une consommation de 500Wh, soit 0,5 kWh.

Chapitre 1 : L'électricité

3 Les types de courant :

3.1 Le courant continu (DC direct current) :

Un courant continu est un courant électrique dont l'intensité est constante, le flux d'électrons circulant continuellement dans une seule direction. C'est le courant qui (théoriquement) ne varie pas dans le temps.

C'est le type de courant délivré par une batterie ou une dynamo.

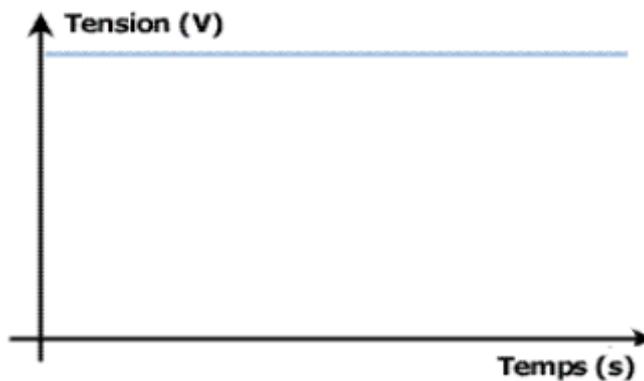


Figure 2 : Représentation graphique du courant continu.

3.2 Le courant alternatif (AC alternative current) :

Dans le courant alternatif (sinusoïdal), les électrons se déplacent alternativement dans une direction puis dans l'autre selon une fréquence donnée. Il n'y a plus de borne déficitaire et de borne excédentaire puisque le courant alterne en permanence : on ne parle donc pas de + et de - en alternatif mais de phase et neutre. C'est le courant fourni par les compagnies d'électricité. Tension et intensité varient selon une courbe sinusoïdale. En fait, la tension et l'intensité varient en continu entre une valeur maxi et une valeur mini mais lors de la mesure cette variation est gommée et fait apparaître une valeur stable moyenne, 220V par exemple.

La fréquence du courant alternatif est mesurée en hertz (Hz). Elle représente le nombre d'oscillations par seconde de la sinusoïde.

Chapitre 1 : L'électricité

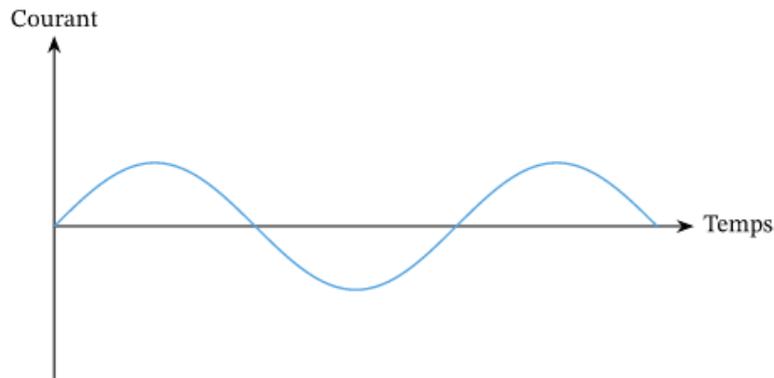


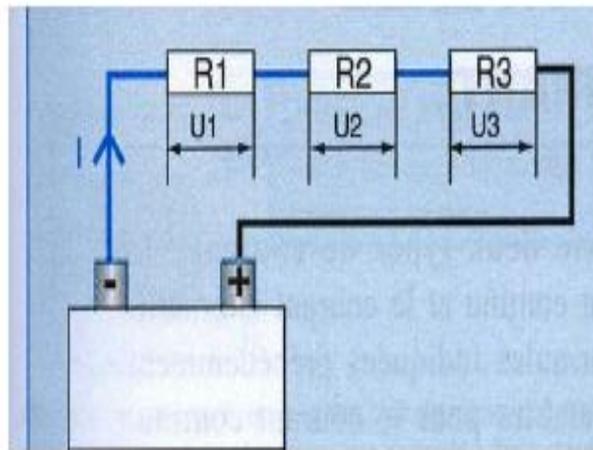
Figure 3 : Représentation graphique du courant alternatif.

Il existe 2 types de courant alternatif : le Monophasé et le Triphasé. Le Monophasé est le courant le plus utilisé pour tout type de matériel (télévision, machine à laver...). Le triphasé est un courant utilisé pour des niveaux de puissance élevés.

4 Les groupements d'éléments :

4.1 Les éléments en Série :

Les éléments sont en série quand ils sont placés les uns à la suite des autres.

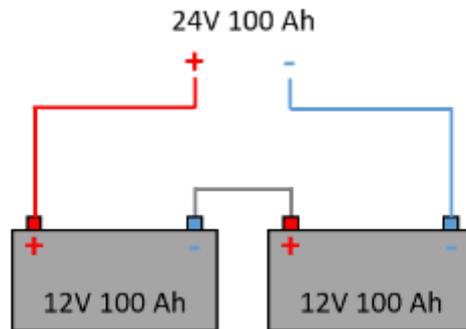


TENSION TOTALE = Tension élément 1 + Tension élément 2 + Tension élément 3

INTENSITE = intensité élément 1 = Intensité élément 2 = Intensité élément 3

Chapitre 1 : L'électricité

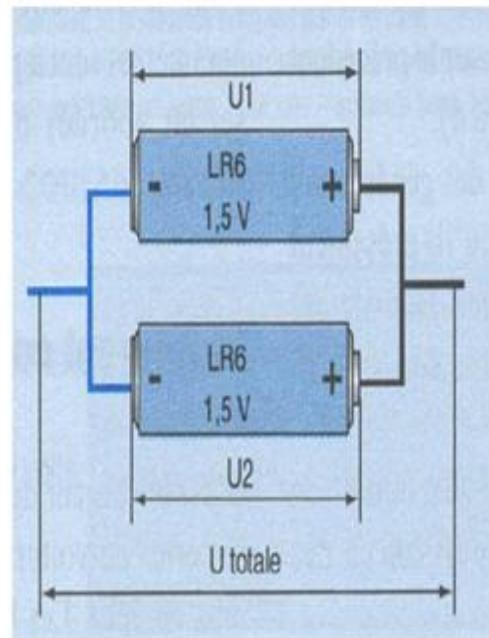
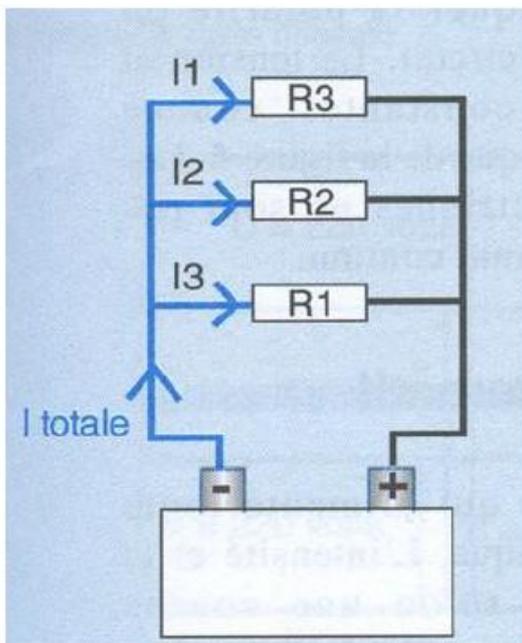
Le montage en série des batteries consiste à relier le pôle (+) d'une batterie au pôle (-) d'une autre :



Dans ce cas les tensions s'additionnent on obtient ainsi une batterie de tension double (avec 2 batteries identiques) $2 \times 12V = 24V$ et de capacité de 100Ah.

4.2 Les éléments en parallèle :

Un montage est dit en parallèle lorsque chaque élément est repris sur le précédent par une dérivation.

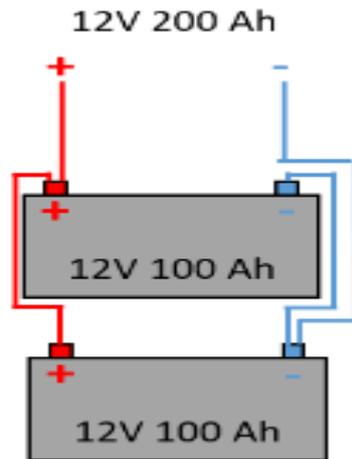


TENSION TOTALE = Tension élément 1 = Tension élément 2 = Tension élément 3

INTENSITE = intensité élément 1 + Intensité élément 2 + Intensité élément 3

Chapitre 1 : L'électricité

Le montage en parallèle des batteries consiste à relier les pôles plus (+) ensemble et les pôles moins (-) ensemble :



Dans le branchement parallèle les intensités s'additionnent, on obtient ainsi une batterie de capacité double (avec 2 batteries identiques) $2 \times 100 \text{Ah} = 200 \text{Ah}$ et une tension de 12V.

IMPORTANT :

Avant de réaliser une mise en série ou parallèle, il faut veiller à ce que les batteries utilisées soit identiques (même âge, même capacité), non déchargées.

En effet, deux installations identiques n'entraîneront pas le même vieillissement du parc batterie suivant leurs différentes utilisations.

5 Mesures électriques :

Les mesures électriques sont faites avec le multimètre.

Un multimètre, permet de réaliser plusieurs types de mesures électriques avec un seul appareil. Il remplit le plus souvent le rôle de Voltmètre, d'Ampèremètre et d'Ohmmètre.

En effet, il sert à mesurer la tension d'un courant qu'il s'agisse d'un courant continu ou d'un courant alternatif, à tester des résistances électriques ou des composants électriques mais également à mesurer les courants de faible intensité qui alimentent les circuits. Il est couramment utilisé dans le cadre de vérifications du bon fonctionnement d'un matériel électrique.

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

1 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est une énergie générée grâce aux rayonnements électromagnétiques produits par le soleil qui sont ensuite captés, puis transformés en chaleur ou en électricité utilisable. Alors que la plupart de l'électricité est produite en brûlant des combustibles fossiles qui dégagent du dioxyde de carbone (CO₂) et polluent, L'énergie solaire est propre, n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil est gratuite, inépuisable et disponible partout dans le monde. L'énergie solaire peut être exploitée à partir de panneaux et de réflecteurs (miroirs) :

- **Les capteurs solaires thermiques :** les capteurs solaires utilisent des miroirs ou des panneaux pour concentrer les rayons du soleil. Ces rayons chauffent un fluide qui crée de la vapeur pour actionner une turbine et produire de l'électricité.
- **Les systèmes photovoltaïques (PV) :** dispositifs électroniques qui convertissent directement la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet dit "photoélectrique" par lequel certains matériaux sont capables d'absorber des photons et des électrons libres, générant ainsi un courant électrique.

2 Les types de l'énergie solaire :

2.1 Le solaire thermodynamique :

Le solaire thermodynamique est l'une des valorisations du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels.

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer, via des miroirs réflecteurs, pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel. Le récepteur absorbe l'énergie réfléchi par le miroir et la transfère au fluide thermodynamique.

2.2 Les différents types de centrales solaires thermodynamiques :

D'une superficie pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de mètres carrés, les centrales solaires thermodynamiques recouvrent l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis à convertir cette chaleur en énergie électrique. Selon le mode de concentration du rayonnement solaire, une grande variété de configurations différentes est possible pour les centrales solaires thermodynamiques. Les applications sont diverses : production d'électricité, production de vapeur pour procédés

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

industriels ou encore appoint solaire pour des installations utilisant des combustibles biomasse ou fossiles.

- **Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques :** Ce type de centrale se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal, dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température atteint en général 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou un générateur électrique.



Figure 4 : Centrale à collecteurs cylindro-paraboliques.

- **Les centrales à capteurs paraboliques :** Ayant la même forme que les paraboles de réception satellite, les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes afin de réfléchir et de concentrer les rayons du soleil vers un point de convergence appelé foyer. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui est monté en température sous l'effet de la concentration. Cela entraîne un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité. Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000 ° C. Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Pour ce type de système, le stockage n'est pas possible.

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement



Figure 5 : Centrale à collecteurs paraboliques.

- **Les centrales solaires à miroir de Fresnel :** Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques repose sur la mise en forme du verre pour obtenir sa forme parabolique. Une alternative possible consiste à approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans. C'est le principe du concentrateur de Fresnel. Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes. En circulant dans ce récepteur horizontal, le fluide thermodynamique peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500°C. La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur.



Figure 6 : Centrale solaire à miroir de Fresnel.

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

- **Les centrales à tour :** Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 ° C à 1000 ° C. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée au fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines. Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité.

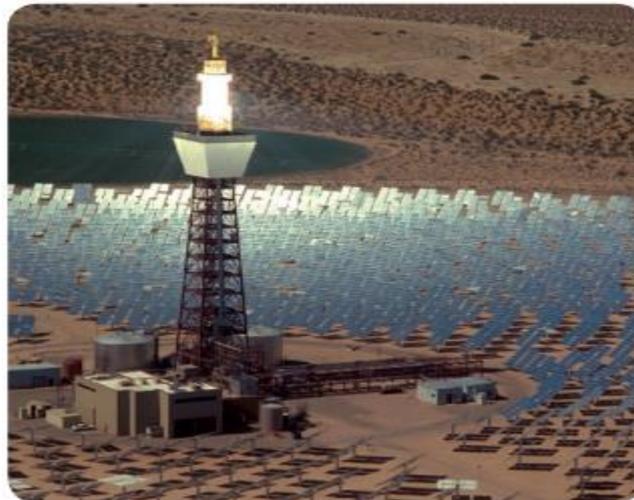


Figure 6 : Centrale à tour.

2.3 Le solaire thermique :

Le solaire thermique consiste à produire de la chaleur à partir des rayons du soleil et à utiliser celle-ci directement. Il s'agit de dispositifs opérant à basse température (moins de 100 °C) pour les usages de l'habitat et du secteur tertiaire (eau chaude sanitaire et chauffage) et pour les divers besoins de l'industrie. C'est aujourd'hui la part prépondérante du solaire dans le monde.

On utilise des capteurs thermiques, destinés à absorber la chaleur solaire et à la restituer à un fluide caloporteur qui circule vers les lieux d'utilisation. Différents types de capteurs vont des plus simples pour les usages domestiques aux plus sophistiqués pour les installations industrielles.

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

Dans les utilisations les plus courantes, il s'agit de capteurs plans, composés d'un corps noir absorbant le rayonnement solaire, d'un isolant thermique et d'une vitre assurant l'effet de serre. L'élévation de température par rapport à l'air ambiant peut atteindre +70 °C. Il existe aussi des capteurs à air (pour le séchage agricole par exemple) et des capteurs non vitrés, en caoutchouc ou en plastique, utilisés notamment pour chauffer les piscines. Les capteurs sous vide sont adaptés aux applications industrielles nécessitant de hautes températures (nettoyage d'abattoirs, pasteurisation de conserves, etc.). Ils sont constitués de tubes en verre mis sous vide (pour une isolation thermique optimale). À l'intérieur, un récepteur (appelé absorbeur) capte l'énergie solaire et la transfère au fluide.

Les types de panneaux solaires thermiques diffèrent selon la nature du fluide caloporteur qui transporte la chaleur : de l'eau ou de l'air. Les capteurs solaires à eau sont utilisés pour le chauffage et/ou pour produire de l'eau chaude sanitaire. Dans les capteurs thermiques à air, l'air circule et s'échauffe au contact des absorbeurs. Il est ensuite ventilé dans les habitats pour le chauffage.

Les capteurs solaires peuvent également se différencier par leur structure :

- **Les capteurs non-vitrés** : leur structure est assez simple, puisque composée d'un réseau de tubes plastiques noirs où circule le fluide caloporteur. Ils sont utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines, en été.



Figure 7 : Capteur plan non vitré.

- **Les capteurs plans vitrés** : le fluide caloporteur, très souvent de l'eau mélangée à un antigel, passe dans un circuit en serpentin placé derrière une vitre.

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

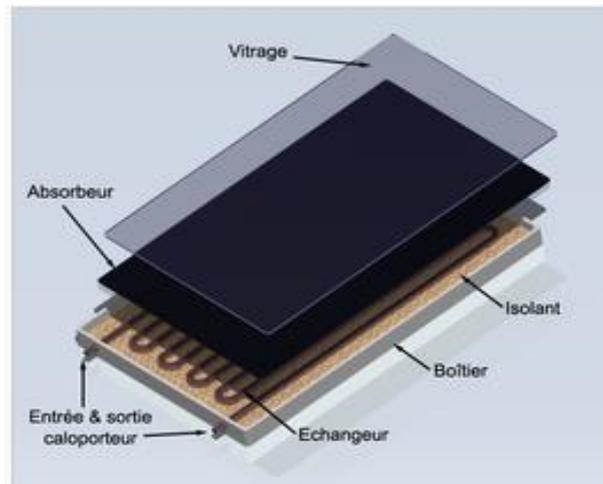


Figure 8 : Les différents composants d'un capteur plan vitré.

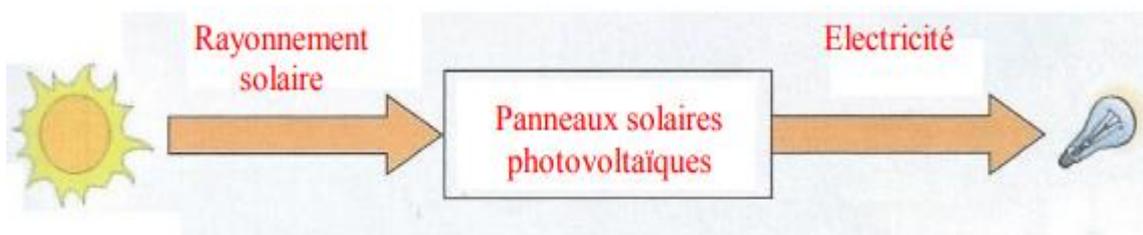
- **Les capteurs à tubes sous vide :** le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un double tube sous vide. Le principe est le même que pour les capteurs plans vitrés, l'isolation étant simplement assurée par l'absence de molécules d'air (sous vide).



Figure 9 : Capteur à tubes sous vide.

2.4 Le solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque transforme le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.



Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

L'élément de base de l'énergie solaire photovoltaïque est la cellule photovoltaïque : exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie d'une partie des photons lumineux. Ceux-ci mettent en mouvement des électrons qui sont happés par un champ électrique interne. Les électrons collectés à la surface de la cellule génèrent un courant électrique continu.



Figure 10 : Panneau photovoltaïque.

3 Gisement solaire :

3.1 Le système terre-soleil :

Le soleil est une sphère de matière gazeuse, composée principalement d'hydrogène et d'hélium, dont le diamètre atteint environ 1.4 million de km.

La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil Occupe l'un des foyers. Sa distance moyenne est de 149.6 millions de km, avec une variation De $\pm 1.7\%$.

La Terre, comme les autres planètes du système solaire, tourne autour du soleil dans un plan appelé plan de l'écliptique. Son axe de rotation est incliné de $23,5^\circ$ par rapport à la verticale à ce plan.

La Terre tourne sur elle-même en 24 h et effectue sa révolution en 365,25 jours. Sa position relative par rapport au Soleil conditionne le cycle des saisons.

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

3.2 Le rayonnement solaire :

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de 3.10^{10} les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et $8\mu\text{m}$. On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir porté à une température de 5762 K dite température apparente du soleil ne correspondant pas à la réalité physique.

Le rayonnement solaire au sol se divise en rayonnements (Figure 11): directs, diffus, réfléchis et globale.

- ***Le rayonnement solaire direct*** : C'est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclination des rayons par rapport au sol.
- ***Le rayonnement diffus*** : C'est le rayonnement qui se manifeste lorsque le rayonnement solaire direct se disperse dans les nuages et les particules atmosphériques. Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol.
- ***L'albédo*** : L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- ***Le Rayonnement solaire réfléchi*** : C'est le rayonnement qui provient du sol par suite à la réflexion. Cette composante Dépend de la nature du sol et de sa couleur.
- ***Le rayonnement solaire global*** : Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements diffus et direct.

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

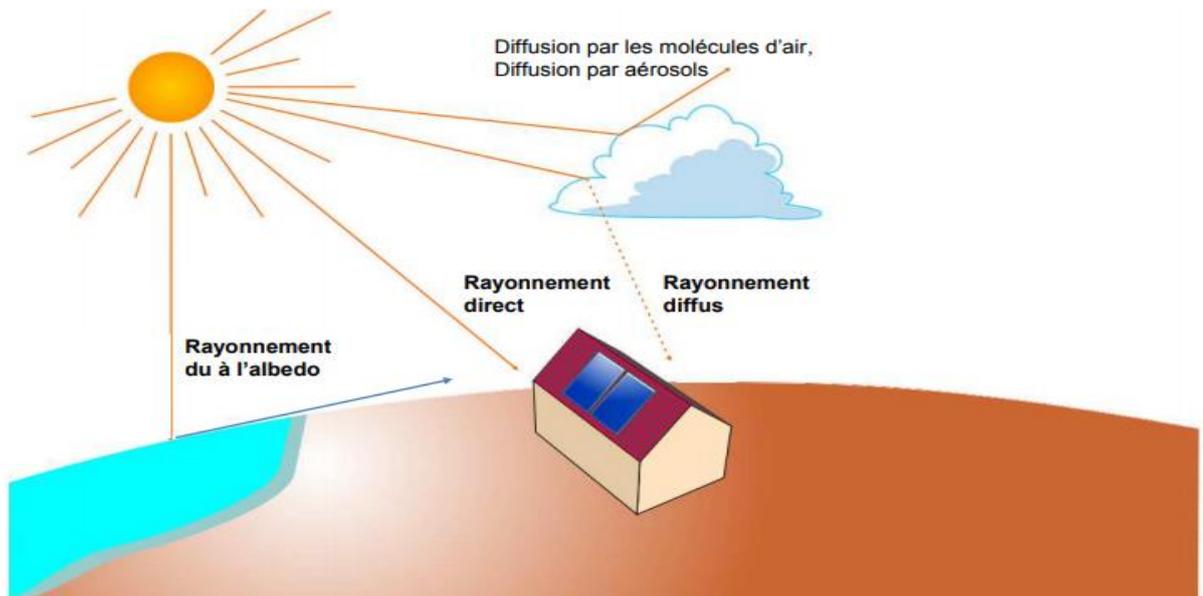


Figure 11 : Représentation des rayons solaires au sol.

3.3 Appareils de mesures du rayonnement solaire :

- **Le pyranomètre** : Cet appareil est utilisé dans la mesure du rayonnement global (Figure 12). Il reçoit l'énergie solaire provenant de tout l'hémisphère céleste c'est à dire d'un horizon à l'autre dans toutes les directions. Le spectre de longueur d'onde mesuré par se situe approximativement entre $0.3\mu\text{m}$ et $3\mu\text{m}$ (lumière visible et proche infrarouge). La plupart des pyranomètres sont des thermopiles adaptées à cet usage. La surface réceptrice se compose de deux anneaux concentriques, en argent ; l'anneau intérieur ou soudure chaude est recouvert de noir, l'anneau extérieur ou source froide, maintenu à la température de l'air, est recouvert de blanc. La différence de température entre ces anneaux, mesurée par des thermocouples, est proportionnelle au flux lumineux incident. L'ensemble est hermétiquement scellé à l'intérieur d'un hémisphère de verre. L'appareil est généralement complété par un intégrateur et un enregistreur.

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement



Figure 12 : Pyranomètre (rayonnement global).

Le pyranomètre est aussi utilisé pour la mesure de l'irradiation diffuse en lui ajoutant un dispositif supplémentaire qui sert d'écran et occulte le rayonnement direct (Figure 13).

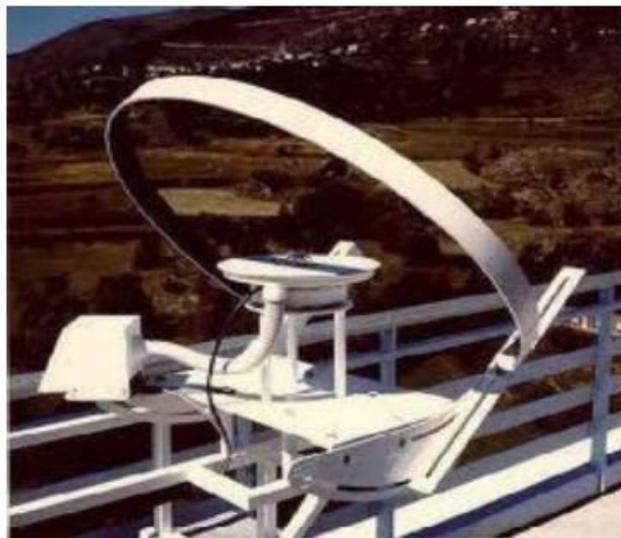


Figure 13 : Pyranomètre (rayonnement diffus).

- **Solarimètre :** Le solarimètre est un autre instrument utilisé pour la mesure du rayonnement global. Son principe est basé sur l'effet photovoltaïque. La mesure de l'éclairement est obtenu à l'aide d'une cellule solaire, on relève au bornes de cette dernière une tension qu'est de l'ordre de mV, proportionnelle à l'éclairement. Un élément de mesure, gradué en W/m^2 , est associé afin de visualiser les paramètres.

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

- *L'héliographe* : Le plus répandu étant l'héliographe de Campbell-Stockes, il se compose d'une sphère de verre d'environ 10 cm de diamètre, qui permet de concentrer les rayons du soleil sur une bande de carton spécial où une trace de brûlure indiquant la durée d'ensoleillement (Figure 14).



Figure 14 : L'héliographe.

3.4 Repérage du soleil dans le ciel :

La hauteur du soleil est une donnée fondamentale pour au moins deux raisons :

- cette hauteur intervient explicitement dans les calculs d'apport énergétique.
- l'implantation dans un site donné demande une étude des ombres portées par l'environnement bâti ou naturel.

3.4.1 La longitude λ :

Un point à la surface de la terre est repéré par deux coordonnées angulaires : la latitude φ et la longitude λ . C'est la mesure de l'angle entre le méridien du lieu et le méridien origine des longitudes (Greenwich en Angleterre). Les lieux qui sont situés à l'Est sont comptés avec le signe +. Le grand arc de cercle qui joint le pôle Nord, Greenwich et le pôle Sud s'appelle méridien origine. Il y a 23 méridiens séparés de 15° donnant naissance aux 24 fuseaux horaires.

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

3.4.2 La latitude φ :

Permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de 0° à l'équateur à 90° au pôle Nord.

3.4.3 L'altitude (Z) :

Correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de Référence, le géoïde, figurant le niveau moyen de la mer.

3.4.4 La déclinaison solaire δ :

Est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons. La Figure 12 en donne les valeurs remarquables.

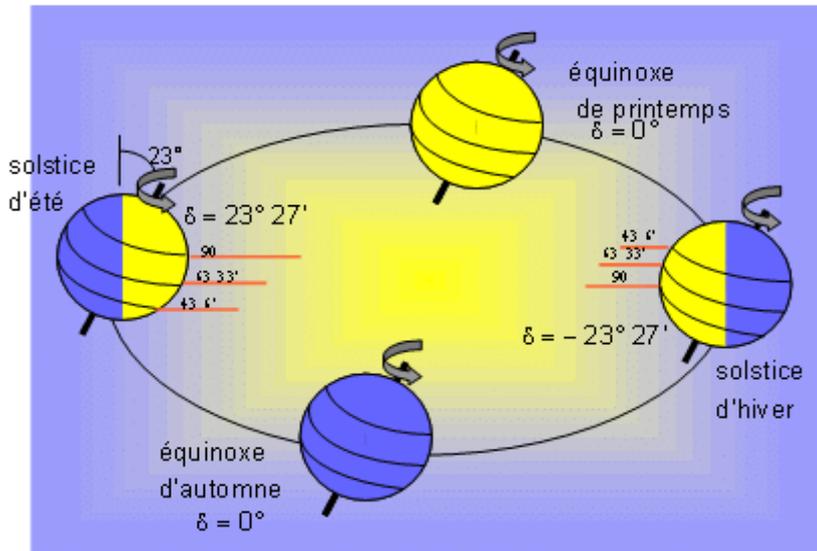


Figure 15 : Mouvement de rotation de la Terre.

Equinoxe de printemps : 21 Mars $\delta = 0$

Solstice d'été : 22 Juin $\delta = + 23^\circ 27'$

Equinoxe d'automne : 23 Septembre $\delta = 0$

Solstice d'hiver : 22 Décembre $\delta = - 23^\circ 27'$

La déclinaison solaire δ peut se calculer par la relation :

$$\delta = 23,45 \times \left(\frac{360}{365} \times (n - 81)\right)$$

Avec n nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} Janvier.

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

3.4.5 L'angle horaire ω :

L'angle horaire du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Exprimé en ° d'angle, $\omega = 15(\text{TSV}-12)$ où TSV est le temps solaire vrai exprimé en heures.

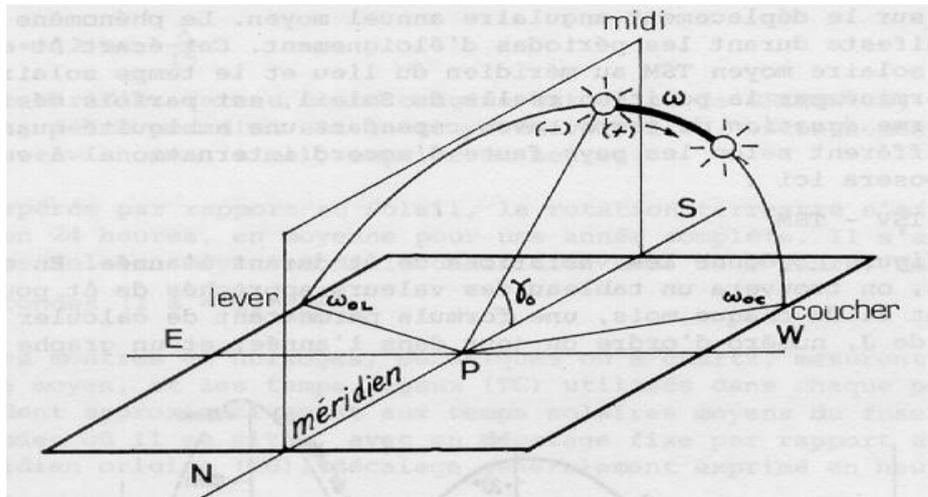


Figure 16 : Angle horaire ω du soleil.

3.5 Les coordonnées célestes horizontales :

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles représentés dans la Figure 17 qui sont :

L'azimut (a) est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = \cos(d) \times \frac{\sin(\omega)}{\sin(h)}$$

La hauteur du soleil (h) est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal, elle est donnée par la formule :

$$\sin(h) = \sin(L) \times \sin(d) + \sin(L) \times \cos(d) \times \cos(\omega)$$

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

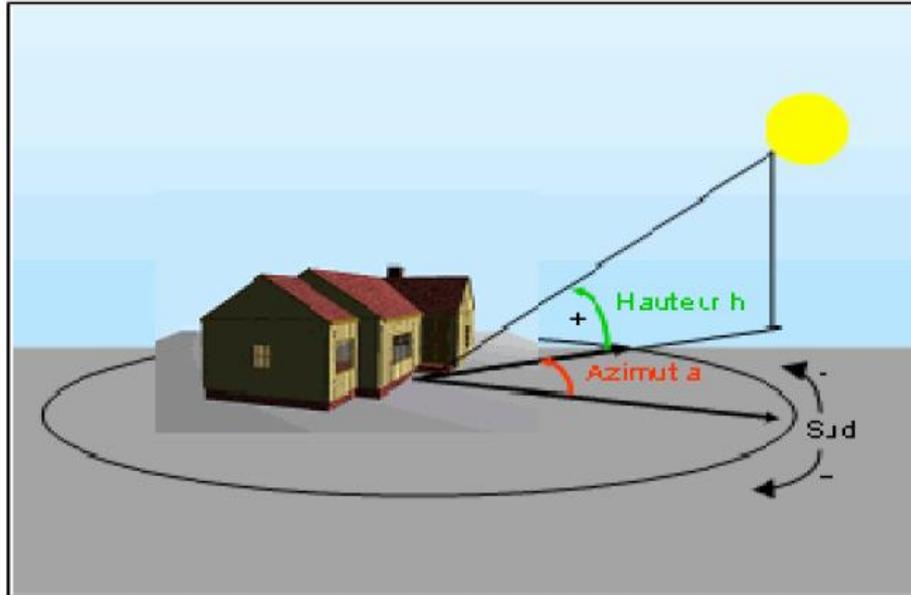


Figure 17 : Les coordonnées célestes horizontales.

3.6 Les cinq temps :

3.6.1 Temps universel :

Le temps universel (TU) est défini par l'heure de passage du soleil au méridien origine. En France métropolitaine, les longitudes sont comprises entre -5° (Ouessant) et $+8^\circ$ (Strasbourg), entraînant des écarts de -20mn à +32mn entre le temps solaire local (TSL) et le temps universel (TU).

3.6.2 Temps solaire local :

La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude. En France métropolitaine, les longitudes sont comprises entre -5° et $+8^\circ$, entraînant des écarts de -20mn à +32mn entre le temps solaire local (TSL) et le temps universel (TU).

La correction de longitude est donnée par la formule :

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15}$$

3.6.3 Equation du temps :

L'écart Δt entre temps solaire local (TSL) et temps solaire vrai (TSV) est désigné sous le terme d'équation du temps. Avec l'expression proposée par Duffie et Beckman :

Chapitre 2 : L'énergie solaire et son gisement

$$E = 229,2 \times (0,000075 + 0,001868 \cdot \cos B - 0,032077 \cdot \sin B - 0,014615 \cdot \cos 2B - 0,04089 \cdot \sin 2B)$$

$$\text{Avec : } B = \frac{360}{365} (n - 1)$$

3.6.4 Temps solaire vrai :

C'est le temps solaire local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil :

$$\text{TSV} = \text{TSL} + \Delta t$$

Pour un lieu de longitude λ , il existe une correspondance directe entre angle horaire ω , temps solaire vrai TSV, temps solaire local TSL et temps universel TU:

$$\omega = 15(\text{TSV} - 12) \quad \text{TSV} = \text{TSL} + \Delta t \quad \text{TSL} = \text{TU} + \frac{\lambda}{15} \quad \omega = 15\left(\text{TU} + \frac{\lambda}{15} + \Delta t - 12\right)$$

3.6.5 Heure légale :

Pour des raisons évidentes de commodité, il est bon que les horloges d'un même pays indiquent la même heure. On définit ainsi le temps des horloges de façon arbitraire pour tout un territoire.

Chapitre 3 :

La conversion

photovoltaïque

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

1 La conversion photovoltaïque :

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).

Le développement des cellules solaires a suivi les progrès de l'industrie des semi-conducteurs, en particulier ceux de l'industrie du silicium qui constitue le principal matériau à partir duquel sont fabriquées les cellules. Les premières cellules ont été conçues pour permettre une alimentation électrique fonctionnant plusieurs années sur les satellites. De grandes sociétés de l'électronique se sont au début intéressées à cette technologie pour alimenter des sites isolés (mesures, télécommunications, balises...) avant que les successifs chocs pétroliers relancent leur intérêt dans les années soixante-dix. A partir de cette période, des sociétés spécialisées dans ce domaine se sont créées, tout d'abord aux USA, ensuite au Japon et en Europe. La technologie des cellules au silicium est maintenant bien maîtrisée et les nouveaux développements se concentrent sur l'amélioration du rendement et l'abaissement des coûts de fabrication. En parallèle avec ces produits existants, de nouvelles cellules, utilisant des phénomènes proches de la photosynthèse, pourraient apparaître sur le marché dans la prochaine décennie si les développements prometteurs obtenus en laboratoire se concrétisent par des produits industriels. Les cellules solaires ont pour rôle de convertir directement le rayonnement lumineux (rayonnement électromagnétique provenant du soleil ou autre) en électricité. Elles s'appuient pour cela sur le phénomène photovoltaïque.

On peut décomposer ce phénomène en trois catégories : l'absorption de la lumière dans le matériau, le transfert d'énergie des photons aux charges électriques et la collecte des charges. Suivant les matériaux utilisés pour la fabrication de la cellule photovoltaïque, il y aura des différences dans les catégories énoncées ci-dessus.

2 Le principe de la conversion photovoltaïque :

Tout rayonnement électromagnétique, y compris le rayonnement solaire est composé de particules énergétiques appelées photons. Un photon, caractérisé par sa longueur d'onde et donc son énergie grâce à la relation (1) peut être soit transmis, soit réfléchi, soit absorbé, lorsqu'il rencontre un matériau.

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Avec h est la constante de Planck ($m^2.kg.s^{-1} = J.s$), c la célérité de la lumière ($m.s^{-1}$) et λ la longueur d'onde du photon (m).

Le rayonnement lumineux composé de plusieurs couleurs (photons d'énergies différentes) aura donc une plage de longueurs d'onde. Par conséquent, une partie du spectre lumineux sera transmise, une partie réfléchi et une autre partie absorbée lorsque la lumière rencontrera le matériau :

- La partie réfléchi dépend de l'indice de réfraction (n) des matériaux traversés.
- La partie transmise correspond aux photons qui traversent le matériau sans interaction, leur énergie étant trop faible, le matériau est transparent pour ces photons.

Nous nous intéresserons tout particulièrement au phénomène d'absorption car c'est grâce à lui qu'une partie du flux lumineux sera restituée sous forme d'électricité.

3 L'absorption de la lumière dans le matériau :

Pour l'absorption de la lumière, une caractéristique importante du matériau est son gap. C'est l'écart entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction d'un matériau. La bande de valence est présumée être entièrement occupée par des électrons et la bande de conduction entièrement vide.

Il existe deux types de gap : le gap direct et le gap indirect

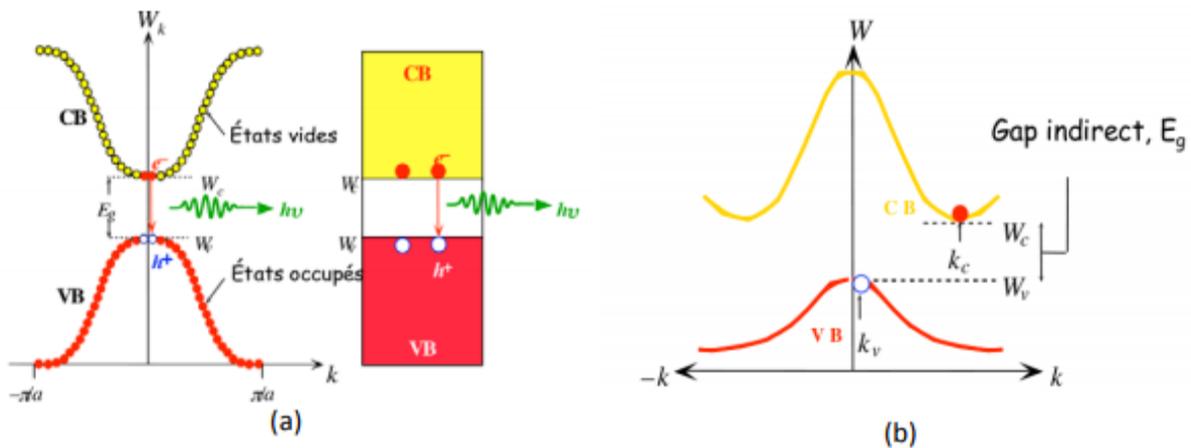


Figure 18 : Représentation schématique du gap direct (a) et du gap indirect (b).

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

- **Le gap direct :** Lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence correspondent à la même valeur du vecteur d'onde (k), le gap est direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives.
- **Le gap indirect :** on remarque cette fois-ci sur Figure (b) que la transition des extrema des bandes ne se fait pas verticalement mais de façon oblique : les transitions électroniques sont non radiatives. A énergie égale ou un peu supérieure à celle du gap, il n'est possible d'absorber le photon que grâce à l'intervention d'un phonon. Ce qui ajoute une nouvelle condition à l'absorption et diminue ainsi grandement ses probabilités. Le silicium cristallin est un exemple de semi-conducteur à gap indirect.

Lorsque l'énergie du photon est inférieure à celle du gap du matériau, la transition n'est pas possible et le photon n'est pas absorbé. L'interaction photon/semi-conducteur, dans le cas d'un photon suffisamment énergétique $h\nu \geq E_g$, se traduit par la génération d'une paire électron-trou qui modifie localement la conductivité du matériau.

4 Le transfert de l'énergie des photons aux charges électriques :

Les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons périphériques des atomes. Ces électrons seront alors, si l'énergie apportée par le photon le permet, autrement dit si l'énergie apportée par le photon est supérieure à celle du gap du matériau, libérés de l'attraction de l'atome. Il y aura, par conséquent, création d'un électron libre et d'un trou. Un trou correspond au comportement d'une bande entièrement pleine privée d'un électron. Pour simplifier, on assimile ce comportement à celui d'une charge positive dans une bande entièrement occupée. La circulation des électrons dans un sens et des trous dans l'autre formeront un courant électrique, lorsqu'une charge sera branchée.

Ce phénomène peut être mis en jeu dans les semi-conducteurs. Pour les isolants, soit le gap est très large et il est quasi impossible d'engendrer des paires électron-trou. C'est le cas du diamant par exemple, soit le nombre de défauts, très grand en raison de la structure amorphe du matériau, est tel que les porteurs sont constamment piégés et ne peuvent donc pas créer de courant par leur déplacement, c'est le cas du verre.

Dans le cas du verre, la représentation schématique des diagrammes de bandes de l'isolant n'est en réalité pas juste car, de part sa structure amorphe, les électrons ne respectent pas le schéma de bande. Ce schéma permet néanmoins de bien comprendre la difficulté de porter un électron

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

dans la bande de valence pour les isolants. Dans le cas du diamant si on peut engendrer des porteurs dans la bande de conduction leur mobilité est extrêmement grande et la conductivité est très grande également. Pour les conducteurs, il existe déjà une forte densité d'électrons totalement libres.

On voit clairement sur la figure 19 qu'il faut fournir une énergie au moins égale à celle du gap, qui est dépendant du matériau, pour faire monter un électron de la bande de valence à la bande de conduction et avoir création d'une paire électron-trou.

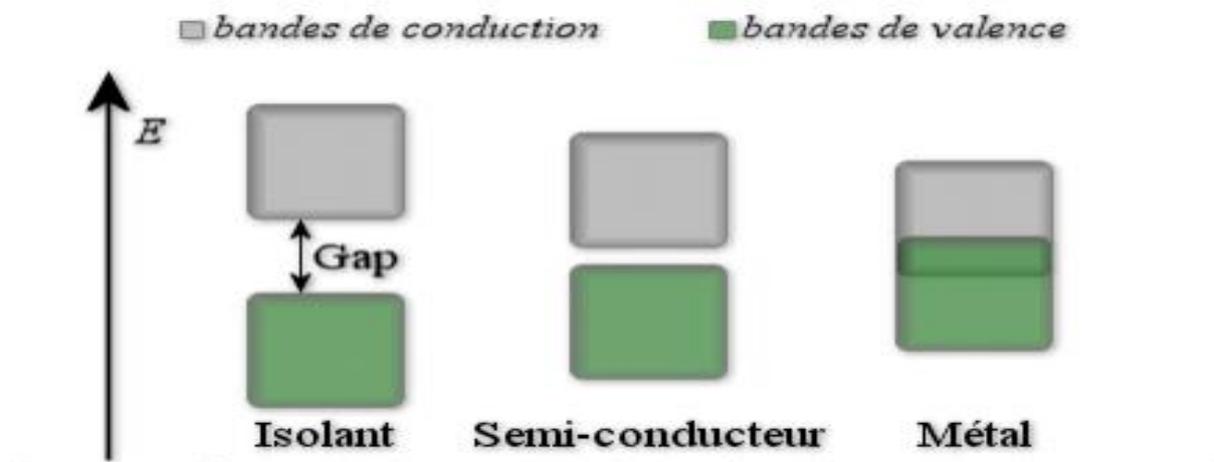


Figure 19 : Représentation schématique des diagrammes de bandes.

De plus, l'énergie du photon supplémentaire à celle du gap, sera convertie en chaleur. On a donc création d'une paire d'électron-trou par photon au maximum. Il y a donc deux phénomènes qui limitent le rendement théorique :

- l'impossibilité de convertir des photons d'énergie inférieure au gap optique. Le gap optique représente l'énergie minimum requise à un électron de la bande de valence pour accéder à la bande de conduction.
- la perte de l'énergie du photon qui dépasse celle du gap optique.

Cette absorption incomplète du spectre solaire, est responsable des principales pertes de rendement des cellules : si l'on additionne les pertes par absorption incomplète des photons (23.5%) et celles des excès d'énergie des photons (33%), la perte due à ces deux phénomènes s'élève à 56.5% pour du silicium cristallin dont le gap est égal à 1.12 eV. Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront l'énergie suffisante pour créer du courant mais la tension en circuit-ouvert sera plus grande. Il existe donc un compromis qui a été quantifié par Shockley et

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

Quessier: La limite de Shockley-Quessier place le maximum du rendement de conversion à 33.7% pour une simple jonction p-n avec un gap de 1.34 eV, sous conditions standards de test.

La collecte des charges Le fait de créer des paires électron-trou ne suffit pas car celles-ci peuvent se recombiner naturellement provoquant uniquement de l'énergie thermique. Il faut séparer les charges pour qu'elles puissent circuler sans se recombiner. Une solution est de créer un champ électrique dans le matériau. Pour cela, on dope une partie d'un semi-conducteur en atomes ayant un électron de valence supplémentaire par rapport à l'atome du semi-conducteur.

Il y aura, dans cette partie de semi-conducteur, un excédent de charges négatives. Cette partie sera par conséquent donneuse d'électrons. On dit qu'elle est dopée de type n. Une autre partie de semi-conducteur sera dopée en atomes ayant un électron de valence de moins que l'atome du matériau semi-conducteur. Il y aura cette fois un excédent de charges positives. Le matériau deviendra alors accepteur d'électrons. On dit qu'il est dopé de type p.

5 Les semi-conducteurs :

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité électrique est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique.

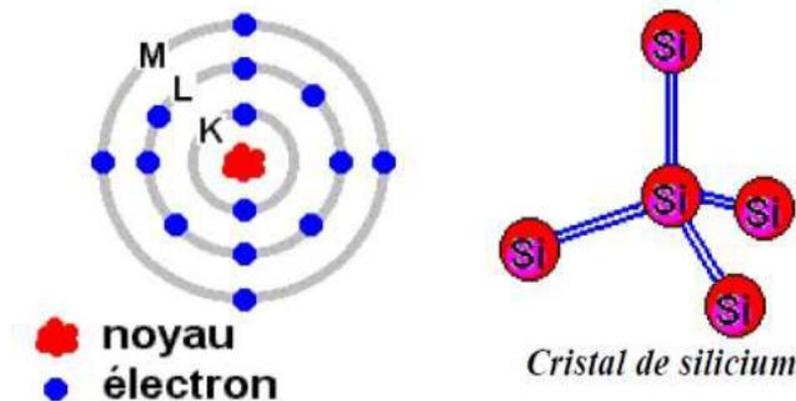


Figure 20 : Représentation de la structure atomique du silicium.

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

5.1 Le dopage de semi-conducteur :

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

5.1.1 Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent (phosphore p). Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième reste disponible, il sera excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique.

D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

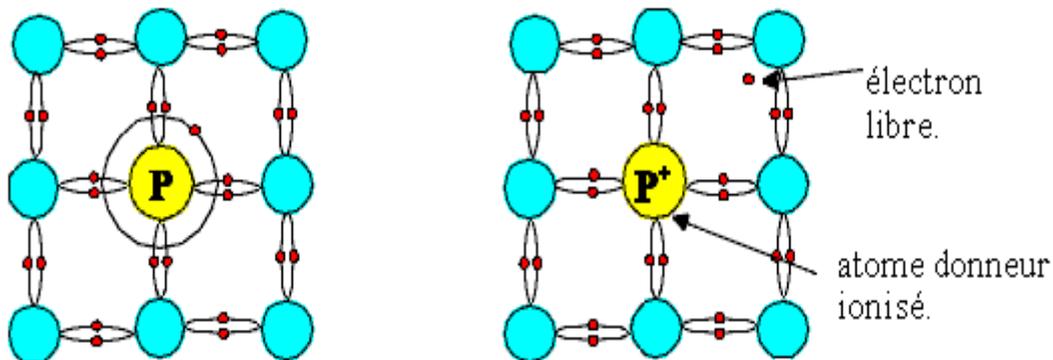


Figure 21 : dopage de semi-conducteur de type n.

5.1.2 Dopage de type P :

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant.

Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore B.

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

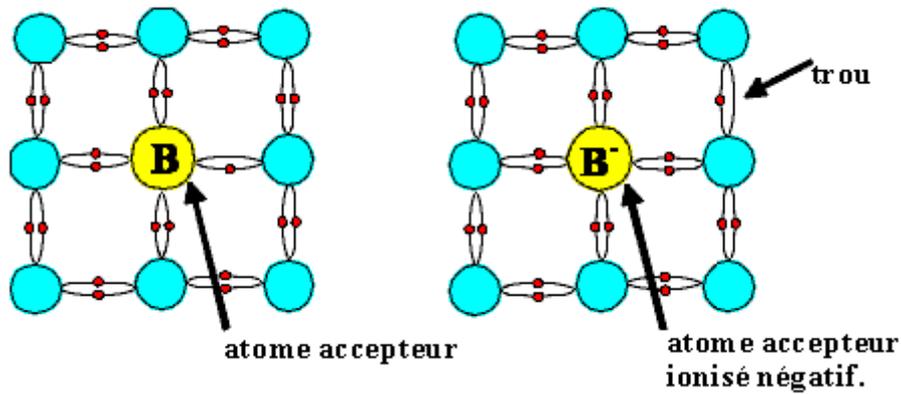
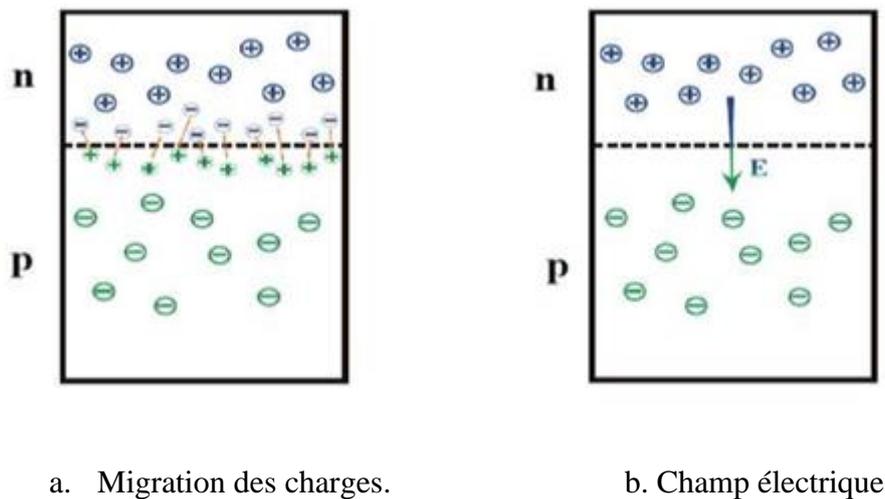


Figure 22 : dopage de semi-conducteur de type p.

5.2 La Jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.



a. Migration des charges.

b. Champ électrique.

Figure 23 : La jonction p-n.

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

6 Effet photovoltaïque :

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charges (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbée permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électrons-trous, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électrons-trous qui sont créés dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction.

Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension), s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque.

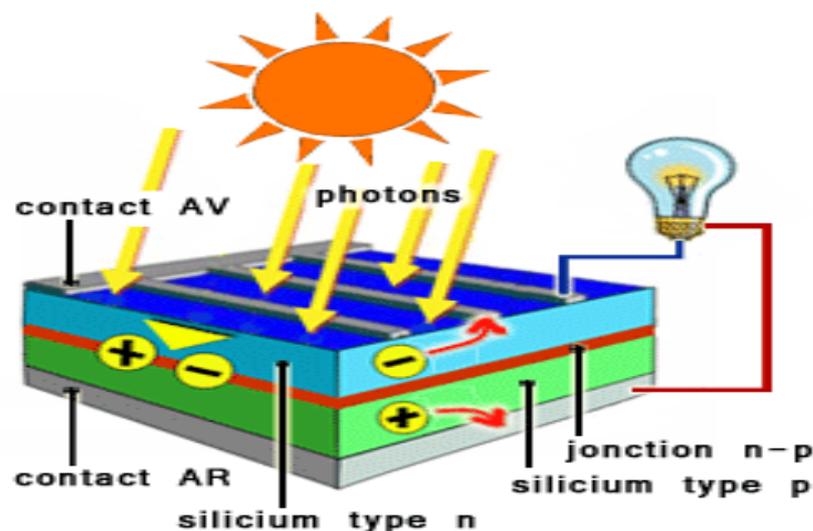


Figure 24: l'effet photovoltaïque.

7 Principe de fonctionnement d'une cellule PV :

La cellule est l'élément de base d'un panneau photovoltaïque. C'est elle qui convertit l'énergie lumineuse des photons en énergie électrique par effet photoélectrique.

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

Le principe général du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est décrit par le schéma de la figure 25. Les dispositifs classiques sont généralement constitués d'un matériau semi-conducteur, comme le silicium, qui absorbe les photons de la lumière incidente (absorbeur ou base). Un semi-conducteur est constitué d'une bande de valence et d'une bande de conduction, dans les quelles circulent les porteurs de charges, respectivement positives (les trous) et négatives (les électrons). On définit alors la bande interdite E_g (ou gap) par la différence d'énergie entre le haut de la bande de valence E_v et le bas de la bande de conduction E_c . Lorsque l'énergie des photons incidents $h\nu$ est supérieure à la bande interdite E_g du semi-conducteur, un électron de la bande de valence est excité dans la bande de conduction, ce qui crée un trou : on dit qu'il y a photo génération de paires électron-trou. En conséquence, la concentration des porteurs dans les bandes d'énergie augmente. L'énergie absorbée en excès par rapport à E_g est perdue sous forme de chaleur par désexcitation des porteurs : c'est le processus de thermalisation. Ces porteurs photogénésés doivent ensuite se déplacer vers les contacts et être collectés, afin de générer un courant dans le circuit électrique connecté ; vu de l'extérieur de la cellule, les électrons proviennent du pôle négatif (n) et les trous du pôle positif (p). Pour réaliser cette séparation des porteurs, il est nécessaire que la structure du matériau soit dissymétrique. Il faut faire en sorte que les électrons (respectivement les trous) souhaitant circuler vers le côté p (respectivement le côté n) rencontrent une barrière. Concrètement, c'est un champ électrique au sein du matériau ou des interfaces, orienté de la zone n vers la zone p qui permet d'orienter le mouvement des porteurs.

Pour transformer le semi-conducteur photosensible de composant passif en composant actif, il faut pouvoir générer un courant de porteurs, donc apporter une force qui obligera les électrons et les trous à s'écouler dans deux directions opposées.

Cette force sera réalisée par un champ électrique interne provenant du dopage du semi-conducteur.

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

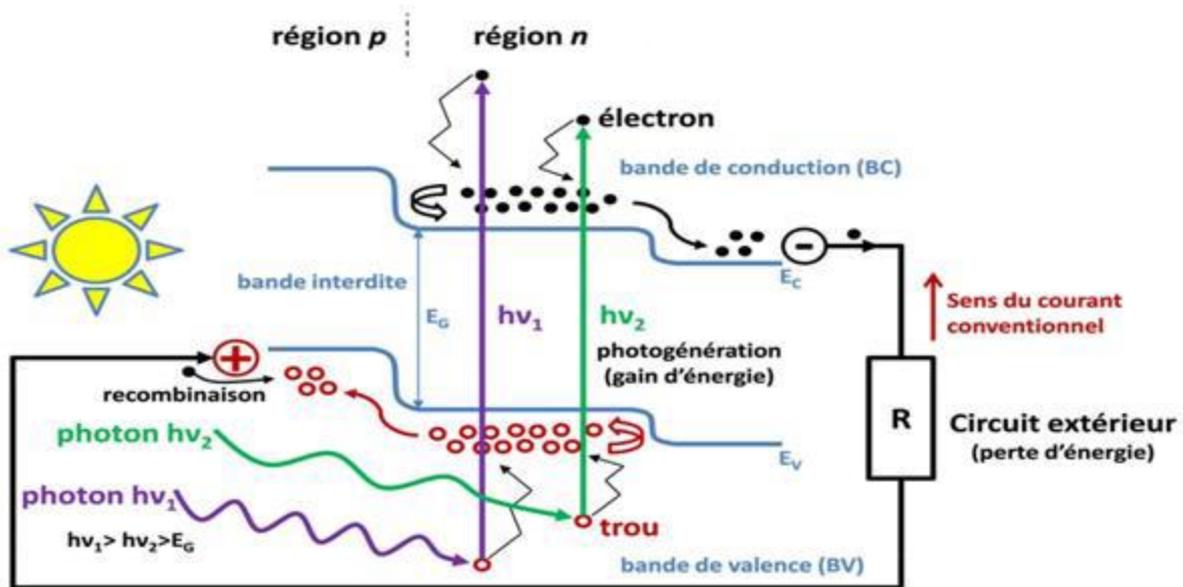


Figure 25: Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule PV.

8 Les types des cellules photovoltaïques :

Les différentes techniques utilisées de nos jours, ont permis de mettre au point divers types de cellules au silicium : monocristallin, poly-cristallin, amorphe.

Il existe aussi d'autres types de cellules qui utilisent d'autres types de matériaux.

8.1 Cellule en silicium monocristallin :

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques.

Pour les fabriquer, on fond du silicium en forme de barreau. Lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Durée de vie : 20 à 30 ans.

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque



Figure 26 : Cellule photovoltaïque monocristalline.

- Avantages :
 - Bon rendement, de 12% à 18% .
 - Bon ratio Wc/m^2 (environ $150 Wc/m^2$) ce qui permet un gain de place si nécessaire.
- Inconvénients :
 - Coût élevé.
 - Rendement faible sous un faible éclairement.

8.2 Cellule en silicium poly-cristallin :

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux.

La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix). Durée de vie : 20 à 30 ans

Avantages :

- Cellule carrée (à coins arrondis dans Le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module.
- Coût de production plus faible qu'une cellule monocristalline.

Inconvénients :

- Rendement inférieur à celui des cellules monocristallines 11 à 15%.
- Ratio Wc/m^2 moins bon que pour le monocristallin (environ $100 Wc/m^2$).
- Rendement faible sous un faible éclairement.

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

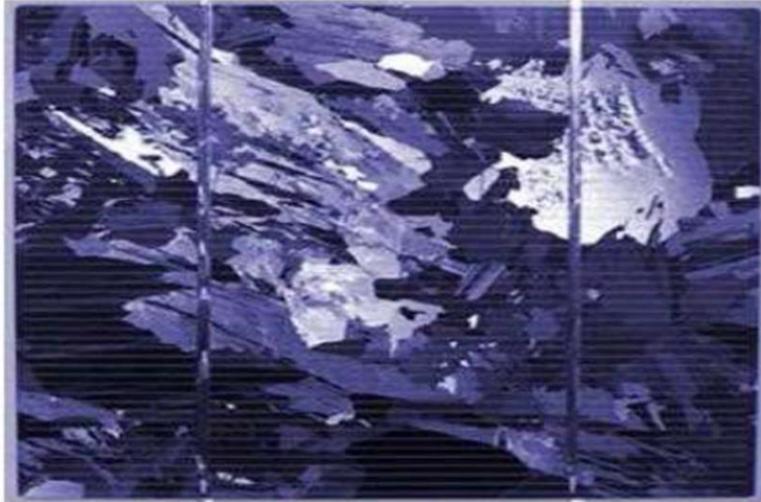


Figure 27 : Cellule photovoltaïque poly-cristalline.

8.3 Cellule amorphe :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est marronne. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires », leurs coûts de fabrication sont les plus intéressants, mais elles ont un rendement compris entre 6 et 8%.

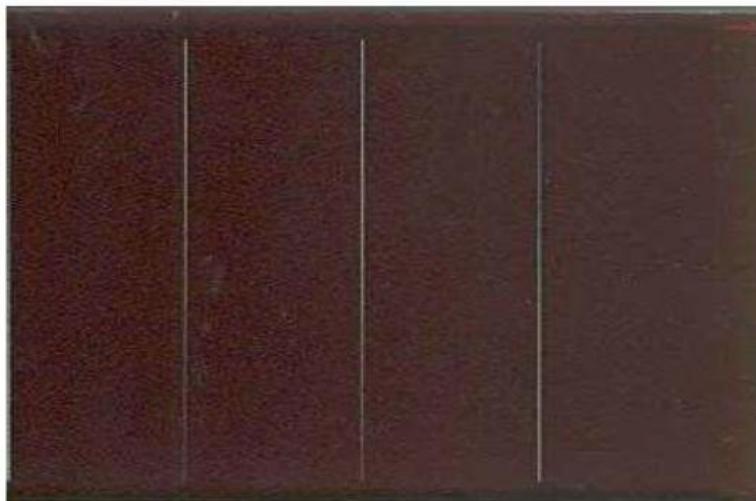


Figure 28 : Cellule photovoltaïque amorphe.

9 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

Il existe de nombreuses familles et sous familles de cellules photovoltaïques qui diffèrent chacune de la nature du semi-conducteur et du procédé de fabrication. Cependant, les propriétés électriques des cellules photovoltaïques sont semblables d'une technologie à une autre. Dans le

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

but de savoir dimensionner une installation photovoltaïque, il apparaît essentiel de comprendre et d'assimiler le comportement électrique des cellules photovoltaïques, et par similitude celui des modules photovoltaïques qui constitueront le générateur.

9.1 Zones de fonctionnement du module photovoltaïque :

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et de façon générale des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée.

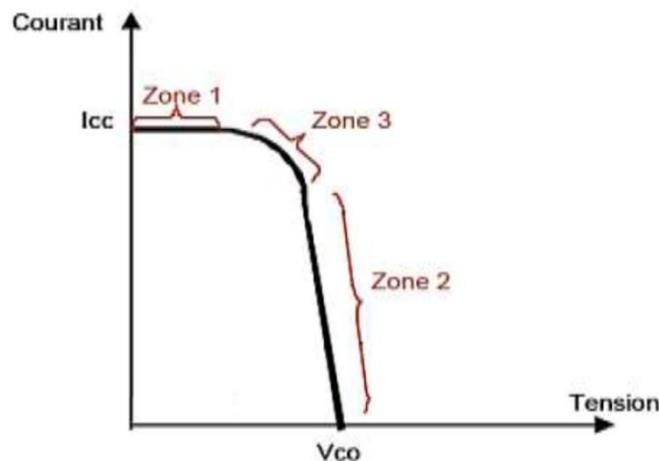


Figure 29 : Les différentes zones de la caractéristique I(V).

La caractéristique d'un générateur photovoltaïque constitué de plusieurs cellules à une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire. Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur PV en trois zones :

C'est dans la zone 3 que se situe le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale.

Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par couple (I_{opt} , U_{opt}), et seule une charge appropriée permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées.

9.2 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque :

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes. Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant tension.

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre. Une cellule photovoltaïque, en tant que (dipôle électrique), dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré ci-dessous :

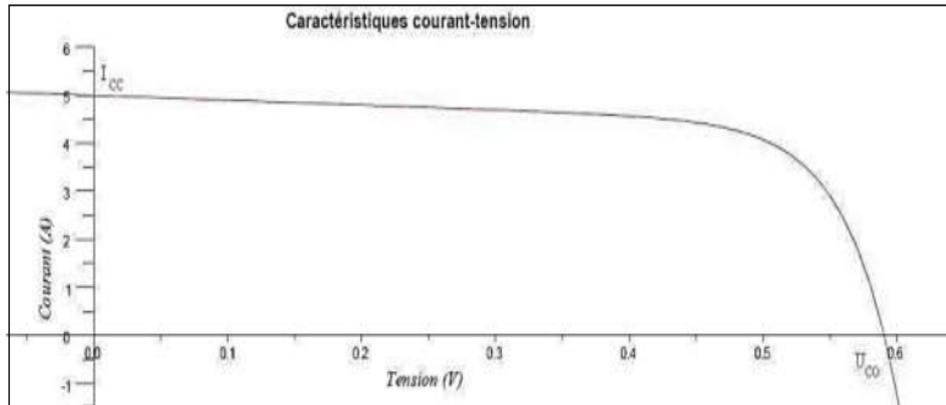


Figure 30 : Courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule photovoltaïque. Deux données importantes sont à relever :

9.2.1 Le courant de court-circuit I_{cc} :

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle).

Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule : ($P = U \times I$) est nulle.

9.2.2 La tension en circuit ouvert U_{co} :

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est à dire lorsque le pôle (+) et le pôle (-) sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P = U \times I$) est nulle. La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension.

A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ($P = U \times I$) en fonction de la tension U , qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension. La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque met en évidence un point de puissance maximum PMPP (MPP signifie en anglais Maximal Power Point, soit Point de Puissance Maximale). Ce point de puissance maximale est le produit d'un courant et d'une tension donnés. On appelle respectivement I_{MPP} et U_{MPP} le courant et la tension correspondant au point de puissance maximale, c'est-à-dire tel que :

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

$$IMPP \times UMPP = PMPP$$

Pour caractériser une cellule photovoltaïque on aura besoin de 4 paramètres majeurs sont :

- Le courant de court-circuit noté I_{cc} .
- La tension à vide notée U_{co} .
- Le courant de puissance maximale noté $IMPP$.
- La tension de puissance maximale notée $UMPP$.

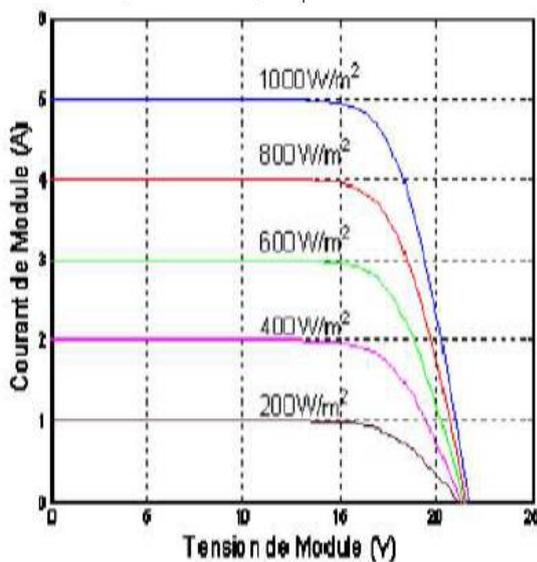
La valeur des 4 paramètres ci-dessus dépend d'un certain nombre de paramètres Dont :

- Le niveau d'éclairement de la cellule.
- La température de la cellule.

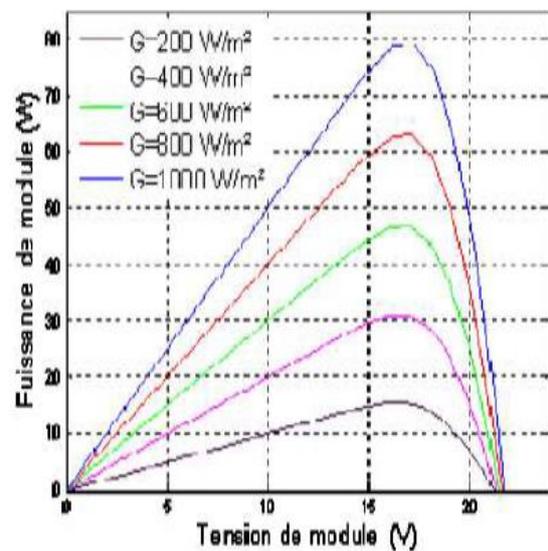
9.2.3 Influence de la température et de l'éclairement :

La caractéristique d'une cellule photovoltaïque (ou d'un générateur photovoltaïque) est directement dépendante de l'éclairement et de la température. Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, la Figure montre clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondantes aux Points de Puissance Maximale P_{max} .

Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert U_{co} (à vide) varie très peu.



(a)



(b)

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

Figure 31 : Evolution de la caractéristique I (V) (a) et P(V) (b) en fonction de l'irradiation.

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires.

La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La figure présente la variation des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque en fonction de température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à 1000W.m^{-2} .

Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension à vide U_{co} décroît avec la température. Plus la température est élevée plus U_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension.

L'influence de la température sur I_{cc} peut être négligée dans la majorité des cas. La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur photovoltaïque. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

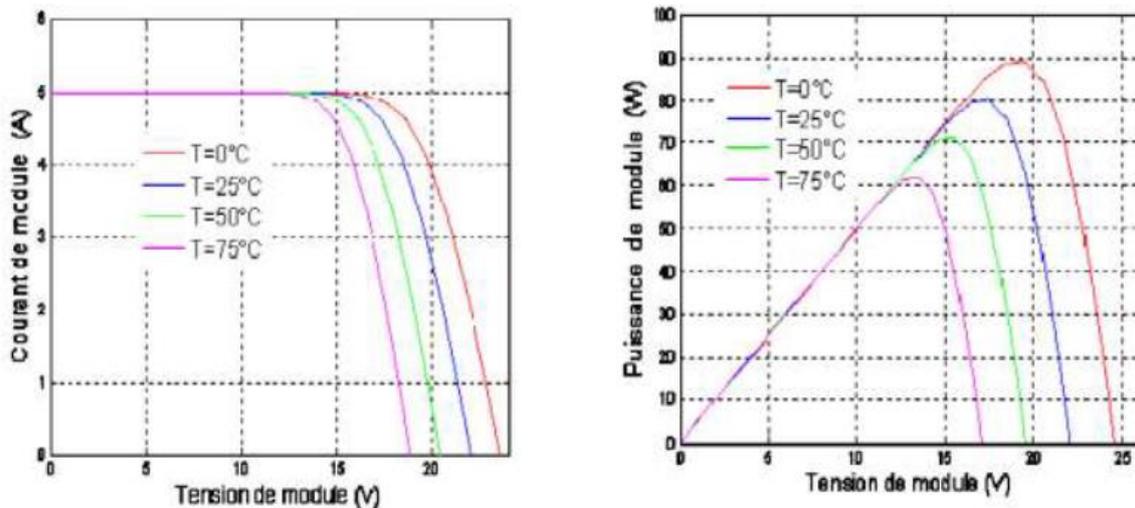


Figure 32 : Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) pour différentes Températures.

9.2.4 Facteur de forme (FF) :

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) d'une cellule ou d'un générateur PV, c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle ($I_{cc} \times U_{oc}$). Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

Il définit par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{\max}}{U_{\max} \times I_{cc}}$$

Avec :

$$P_{\max} = I_{\max} \times U_{\max}$$

9.2.5 Rendement des modules photovoltaïques :

Le rendement indiqué sur les fiches techniques des modules est le rendement dans les Conditions Standard de test (niveau d'éclairement $P_i=1000\text{W}/\text{m}^2$, Température de cellule (25°C)). Il vaut :

$$\eta_m = \frac{PCU}{E_{\text{nom}} \times S_m}$$

Avec :

P_{CU} : Puissance crête unitaire d'un module photovoltaïque en [Watt].

S_m : Surface du module photovoltaïque en [m^2].

E_{nom} : Eclairement nominal standard égal à $1000\text{W}/\text{m}^2$.

10 Cellules, panneaux et champs photovoltaïques :

La **cellule photovoltaïque** est l'unité de base qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Un **panneau photovoltaïque** est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques.

Parfois, les panneaux sont aussi appelés **modules photovoltaïques**.

Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site, on obtient un **champ photovoltaïque**.

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque



Cellule



Panneau



Champ

11 Groupements de cellules :

11.1 Principe :

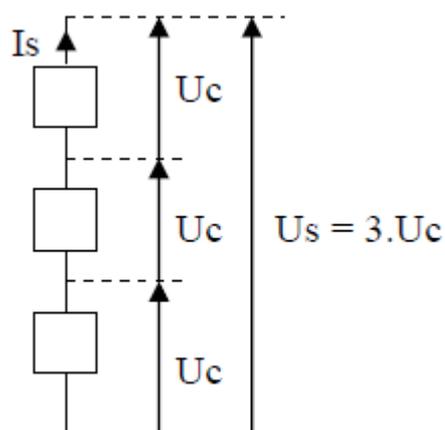
On peut grouper les cellules en série ou en parallèle.

- Le **groupement en série** permet d'augmenter la tension de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en série la tension de sortie U_s a pour expression générale :

$$U_s = n \cdot U_c \quad \text{Avec } U_c : \text{ tension fournie par une cellule}$$

Pour ce groupement, le courant est commun à toutes les cellules.

Exemple : groupement de 3 cellules en série



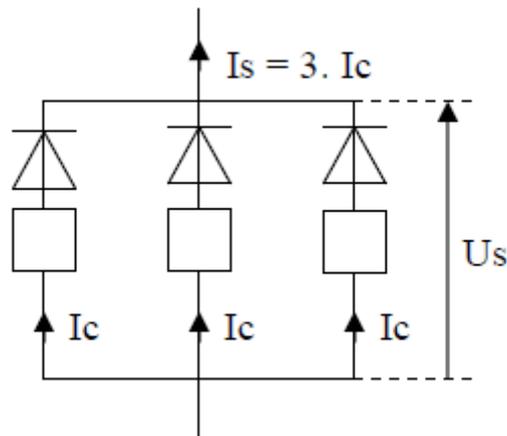
Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

- Le **groupement en parallèle** permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en parallèle, le courant de sortie I_s a pour expression générale :

$$I_s = n \cdot I \quad \text{Avec } I : \text{ courant fourni par une cellule}$$

Pour ce groupement, la tension est commune à toutes les cellules.

Exemple : groupement de 3 cellules en parallèle



12 De la cellule au module PV :

Le module PV est donc composé de plusieurs cellules associées en série et/ou parallèle, disposées en rangées. Cet assemblage de cellules se fait de manière différente suivant les technologies et peut entraîner des pertes supplémentaires à celles déjà évoquées précédemment au sein de la cellule (pertes optiques et électriques). Nous verrons dans cette partie comment se fait l'assemblage des cellules en fonction de la technologie utilisée et quelles sont les pertes dues à cet assemblage. Deux pertes peuvent intervenir : l'inadéquation des cellules et l'ombrage partiel.

12.1 L'encapsulation des cellules PV :

a. Le câblage de modules au silicium cristallin :

Pour connecter les cellules en série, on relie grâce à un contact à base d'étain ou d'argent le contact (-) en face avant d'une cellule au (+) de la face arrière de la cellule suivante. Une fois ces connexions faites, on encapsule les cellules dans une résine, la plupart du temps de l'EVA

Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

(éthylène-vinyl-acétate), transparente et d'indice proche de celui du verre. Cette enrobage est pris en sandwich entre deux supports : en face avant, du verre trempé à haute transmission dans la bande de longueur d'onde de 350 à 1200 nm (si on ajoute une couche anti-réflexion, il en résulte une transmission qui peut aller jusqu'à 96%), en général de 3-4 mm d'épaisseur, et, en face arrière, un film plastique, souvent une feuille de tedlar-aluminium-tedlar ou dumylar ou encore aussi du verre. La face avant doit pouvoir résister à la grêle, aux UV et à toutes les intempéries, dans le temps (25 ans). Il faut aussi protéger la face arrière, la sortie des connexions ainsi que les bords du panneau contre toutes les agressions atmosphériques, l'humidité, etc. L'encapsulation affecte également le rendement des modules en raison de ses propriétés optiques qui peuvent parfois se dégrader au cours du temps.

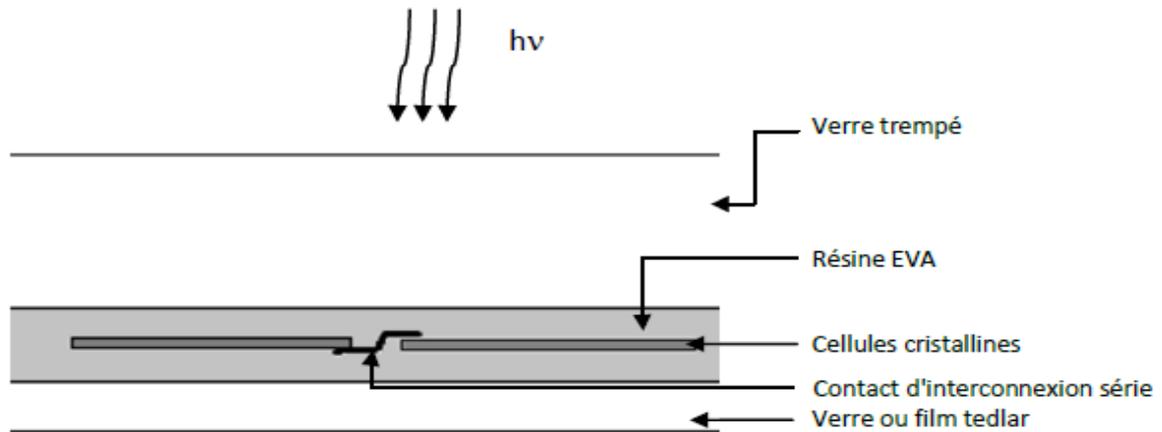


Figure 33: Représentation schématique d'une vue en coupe d'un module au silicium cristallin.

L'assemblage des cellules est une étape cruciale au regard de la durée de vie du module car c'est le facteur principal de dégradation.



Chapitre 3 : La conversion photovoltaïque

Figure 34 : Photographie de modules au silicium cristallin.

b. Le boîtier de connexion électrique :

Des boîtiers de connexion électrique sont en général fixés sous les modules de tout type, en partie basse. Ils représentent aussi un point critique car c'est un endroit favorable à l'accumulation d'eau de condensation, de poussières et insectes.

c. L'isolation électrique :

L'encapsulant doit être capable de supporter une différence de potentiel au moins aussi grande que celle délivrée par le panneau. Le cadre métallique doit également être relié à la terre pour les modules dont le U_{oc} est supérieur à 50 V.

d. Les protections mécaniques :

Les modules doivent être à la fois rigides, résistants et accepter un certain degré de torsion lors de leur montage ou encore lors de leur fonctionnement sur site (dilatation thermique, vent, grêle, etc.). Les points les plus sensibles sont les côtés, les coins, les interconnexions entre cellules et le support lui-même.

Chapitre 4 : L'installation solaire

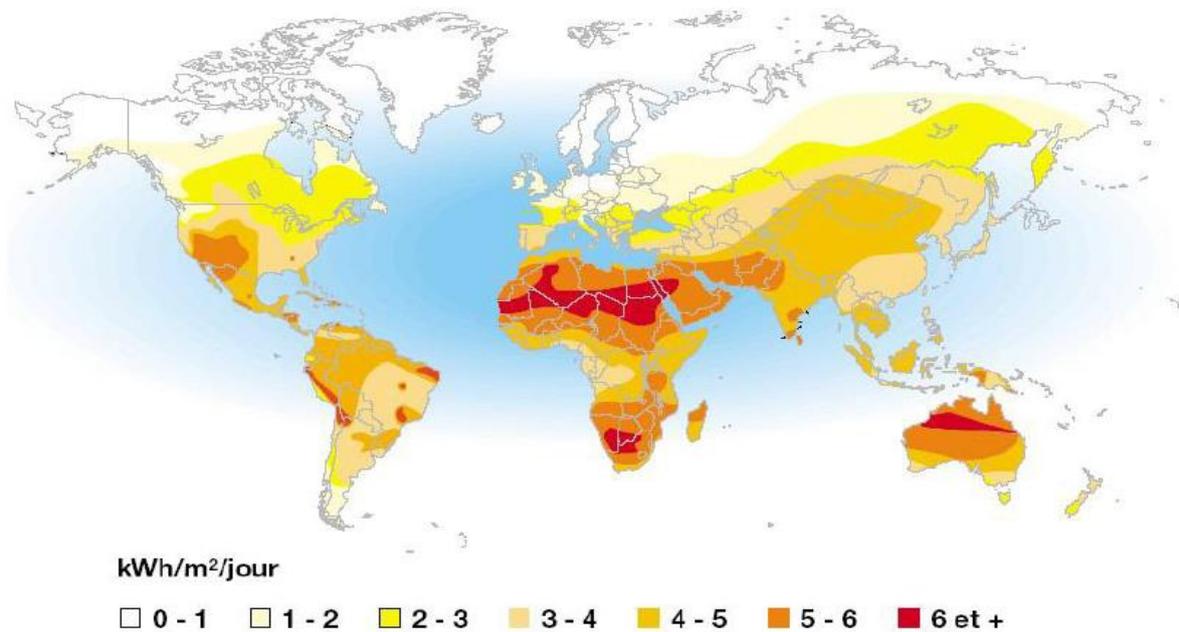
Chapitre 4 : L'installation solaire

1 Installation Solaire :

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.

Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel



2 Le Panneau Solaire :

Les caractéristiques du panneau sont en général indiquées sur une étiquette collée à l'arrière du panneau.

Chapitre 4 : L'installation solaire



SUNTECH	
Model Number	STP050-12/Md
Rated Maximum Power (P _{max})	50W
Output Power Tolerance	±5%
Maximum Power Current (I _{mp})	2.93A
Maximum Power Voltage (V _{mp})	17.4V
Short-Circuit Current (I _{sc})	3.13A
Open-Circuit Voltage (V _{oc})	21.8V
Nominal Operating Cell Temp. (T _{NOCT})	45°C±2°C
Weight	6.4Kg
Dimension	665×631×30(mm)
Maximum System Voltage	715V
Maximum Series Fuse Rating	5A
Cell Technology	Poly-Si
All technical data at standard test condition AM=1.5 E=1000W/m ² T _c =25°C	
Add: 17-6 ChangJiang South Road, New District Wuxi, China 214028	
Customer Service Hot Line: +86 400 888 009 Fax: +86 510 8534 3321	

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 STC.

Pour ce panneau solaire, on a donc :

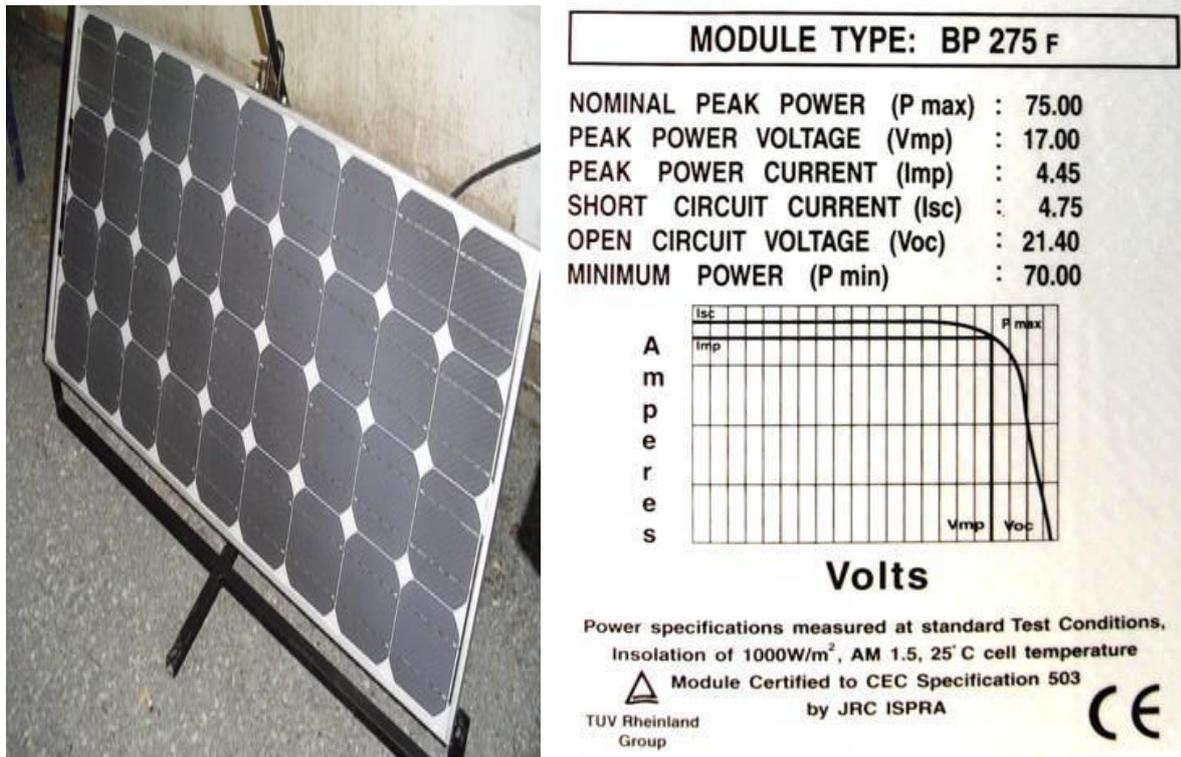
Puissance crête = tension crête x courant crête

$$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp}$$

$$50W_c = 17,4V \times 2,93A$$

Chapitre 4 : L'installation solaire

Autre modèle:



Pour ce panneau solaire, on a donc :

Puissance crête = tension crête x courant crête

$$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp}$$

$$75W_c = 17V \times 4,45A$$

Remarque : tous les panneaux utilisés sur une même installation doivent avoir les mêmes caractéristiques (tension et ampérage).

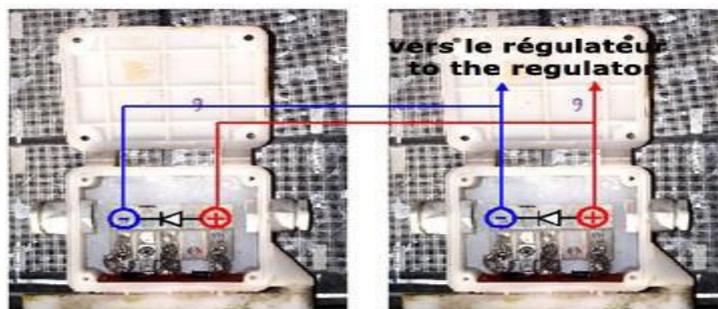
2.1 Performance du panneau Solaire :

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). Pas question de câbler ensemble un panneau de 12Vdc et un autre de 24Vdc.

Chapitre 4 : L'installation solaire

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 selon le schéma suivant:



Câblage parallèle

Remarque : 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.

3 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.

Chapitre 4 : L'installation solaire

3.1 Fonctionnement du régulateur :

3.1.1 Régulation PWM (Pulse Width Modulation) :

Le régulateur est inséré entre le champ photovoltaïque et la batterie. Il est composé d'un interrupteur électronique fonctionnant en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et d'un dispositif anti-retour (diode).

L'ouverture et la fermeture de l'interrupteur électronique s'effectuent à une certaine fréquence, ce qui permet de réguler le courant de charge en fonction de l'état de charge avec précision.

Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de limitation du régulateur, l'interrupteur est fermé. La batterie se charge alors avec le courant correspondant à l'ensoleillement. On est en phase "Bulk".

Lorsque la tension batterie atteint un seuil de régulation prédéterminé, l'interrupteur s'ouvre et se ferme à une fréquence fixe pour maintenir un courant moyen injecté dans la batterie. La batterie est chargée, on est en phase "Floating".

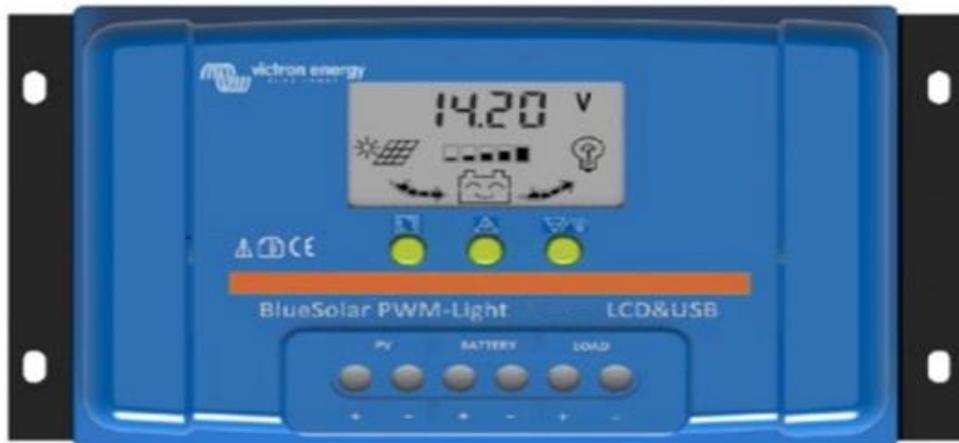


Figure 35 : Régulation PWM.

3.1.2 Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

Le régulateur de charge est composé d'un convertisseur DC/DC à découpage de haut rendement qui assure trois fonctions :

- Détection de la puissance maximale du champ photovoltaïque tant que la batterie n'est pas chargée.

- Conversion DC/DC.

Chapitre 4 : L'installation solaire

- Régulation de la tension de sortie en fonction de la phase de charge (Bulk, Absorption et Floating).

Remarque : Le convertisseur DC/DC est utilisé comme abaisseur de tension. Ce qui signifie que la tension MPP du générateur photovoltaïque doit toujours être supérieure à la tension batterie.



Figure 36 : Régulateur MPPT.

Le champ solaire est connecté à l'entrée du régulateur et la batterie à sa sortie. Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de régulation, le régulateur fait fonctionner le générateur photovoltaïque à puissance maximale P_{mpp} et transfère cette puissance à la sortie.

- Par conception, le régulateur MPPT permet un gain de production de 5 à 30% par rapport à un régulateur PWM. Ce gain augmentera en hiver et pendant les périodes de faible ensoleillement.

Le régulateur de charge MPPT permet une plus grande souplesse au niveau du choix des panneaux. En effet, tous les types de module photovoltaïque peuvent être utilisés du moment que l'on reste dans les tolérances de tension (V) et de courant (A) du régulateur.

3.2 Paramètres qui définissent un régulateur :

- Tension de travail : 12, 24 ou 48 V

Chapitre 4 : L'installation solaire

- Intensité maximale : Elle doit être supérieure au courant maximal du générateur photovoltaïque.

Le fabricant fournit aussi des autres données d'intérêt :

- Les valeurs de la tension d'arrêt de la charge (surcharge) et de la tension d'arrêt de la décharge (surdécharge).

- L'existence de compensation avec la température. Les tensions qui indiquent l'état de charge de la batterie changent avec la température, et c'est pour cette raison que quelques régulateurs mesurent la température et utilisent cette information pour corriger les tensions de surcharge.

- L'instrumentation de mesure et ses indicateurs : les régulateurs ont souvent un voltmètre qui mesure la tension de la batterie et un ampèremètre qui mesure le courant. La plupart d'eux ont des indicateurs qui notifient certaines situations comme : le bas état de charge de la batterie, déconnexion des panneaux avec la batterie, etc.

4 L'onduleur :

L'onduleur est un ensemble électronique qui permet de produire du courant alternatif (220V) à partir d'un courant continu (12V). Celui-ci est directement connecté sur les batteries (12 volts), puis relié aux consommateurs (220 volts).



Figure 37 : Onduleur DC/AC.

Chapitre 4 : L'installation solaire

Les systèmes solaires produisent de l'énergie électrique en courant continu mais beaucoup d'électrodomestiques et de récepteurs fonctionnent avec le courant alternatif.

Dans les installations solaires photovoltaïques connectées au réseau électrique, l'onduleur doit non seulement transformer le courant continu du générateur photovoltaïque en courant continu du générateur photovoltaïque en courant alternatif, mais aussi réaliser des autres fonctions.

Ses fonctions principales : (i) inversion de modulation de l'onde alternative ; (ii) régulation de la valeur efficace de la tension de sortie.

Les onduleurs peuvent être en monophasé ou en triphasé, avec des valeurs différentes pour la tension d'entrée et avec une puissance qui peut aller jusqu'à des mégawatts.

4.1 Caractéristiques de fonctionnement :

- Tension et courant d'entrée/sortie.
- Forme de l'onde.
- Limites de la tension d'entrée.
- Basse de consommation et haut rendement.
- Puissance de sortie.
- Capacité de surcharge (important quand il a accès au moteur).
- Facilité de réparation et la maintenance.
- Fonctionnement dans les points de puissance maximale.
- Conditions ambiantes (température de fonctionnement).

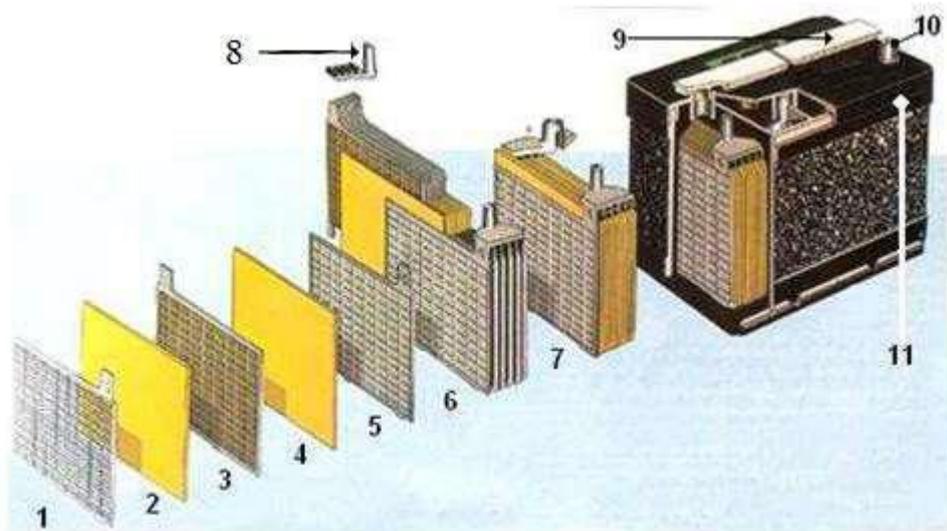
5 La batterie :

La batterie a pour fonction le stockage d'une partie de l'énergie produite par les panneaux (c'est-à-dire, la portion d'énergie qui n'est pas immédiatement consommée) afin qu'elle soit disponible dans des périodes où le rayonnement solaire est faible ou inexistant. Le stockage se fait sous la forme d'énergie électrique à travers l'usage de batteries, normalement de plomb-acide.

Chapitre 4 : L'installation solaire

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte.

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la batterie.



- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1 : Grille. | 7 : Élément couplet |
| 2 : Séparateur. | 8 : Pont |
| 3 : Plaque positive. | 9 : Rampe de bouchons. |
| 4 : Plaque négative. | 10 : Borne |
| 5 : Barrette | 11 : bac |
| 6 : Faisceau négatif. | |

Figure 38 : Composition d'une batterie monobloc.

La batterie a aussi ces deux importantes fonctions :

- Fournir une puissance instantanée supérieure à celle fournie par l'ensemble des panneaux et nécessaire pour la mise en place de quelques éléments.
- Déterminer la marge des tensions de travail de l'installation.

Chapitre 4 : L'installation solaire

5.1 Principe de fonctionnement :

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons.

L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions.

Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes.

5.2 Paramètres de la batterie :

- **Tension nominale** : Elle est normalement de 12 volts.

- **Capacité nominale** : Elle est la quantité maximale d'énergie qui peut être retirée de la batterie. Elle s'indique en ampères heure (Ah) ou en wattheures (Wh). Puisque la quantité d'énergie qui peut être retirée dépend aussi du temps nécessaire pour le processus d'extraction (plus le processus est long, plus d'énergie on pourra obtenir), la capacité est souvent indiquée en fonction du temps de décharge. Dans le cas des applications photovoltaïques, ce temps doit être égal ou supérieur à 100 heures.

- **Profondeur maximale de décharge** : Elle est la valeur (indiquée en pourcentage) extraite d'une batterie totalement chargée dans une décharge. La profondeur est limitée par les régulateurs, qui sont habituellement calibrés pour qu'ils puissent permettre des profondeurs de décharge de la batterie d'environ 70 %. En fonction de la profondeur maximale de décharge permise, la batterie peut avoir plus ou moins de cycles de charge et décharge pendant toute sa durée d'utilisation. Le fabricant doit fournir des graphs où la relation entre la quantité de cycles et la durée de la batterie puisse être vue.

- **Capacité utile ou disponible** : Elle est la capacité qui peut être véritablement utilisée.

Elle est égale au produit de la capacité nominale et de la profondeur maximale de décharge celle-ci divisée par un.

5.3 La durée de vie d'une batterie solaire :

La durée de vie d'une batterie solaire s'évalue selon le nombre de cycles de charge/décharge qu'elle est capable de supporter. Car il s'agit d'une donnée basée sur un niveau de décharge et sur des conditions atmosphériques données.

Chapitre 4 : L'installation solaire

La durée de vie d'une batterie solaire dépend d'abord de la technologie utilisée : plomb ouvert, AGM, GEL. Ensuite les batteries solaires vieillissent en raison des charges et décharges, le nombre de cycles dépend principalement de la profondeur habituelle de décharge. Pour donner un ordre d'idée, pour des décharges de l'ordre de 40%, on peut estimer les durées de

vie suivantes pour les différents types de batteries à décharge lente :

- Batterie solaire au plomb ouverte : 400 à 500 cycles.
- Batterie solaire AGM(Absorbed Glass Mat) : 600 à 700 cycles.
- Batterie solaire GEL : 800 à 900 cycles.
- batterie solaire GEL Long Life : 600 à 2400 cycles.

5.4 Association de batteries :

On associe des batteries en série pour obtenir des tensions multiples de (12 V ,24 V et 48V) et en parallèle pour augmenter la capacité.

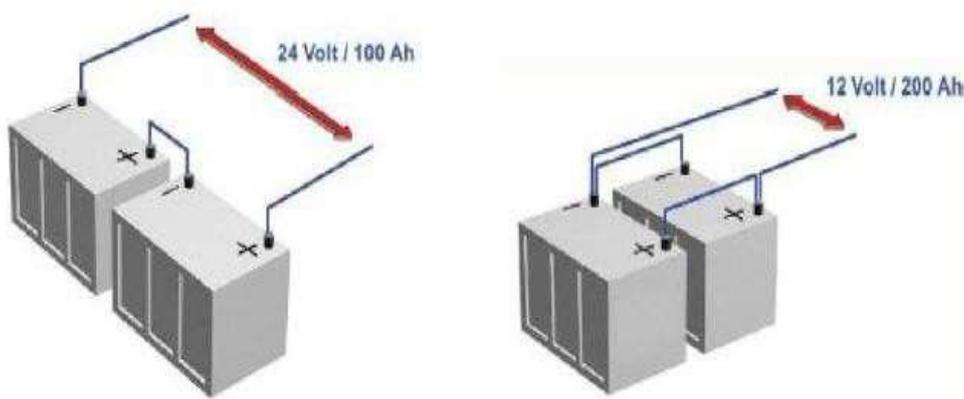


Figure 39 : Association de deux batteries en série / en parallèle.

6 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 :

Chapitre 4 : L'installation solaire

Régulateur – panneau : 10m environ

Régulateur - batterie : 1m environ

Régulateur – boîtier de distribution : 5m environ

En fonction du fusible du régulateur :

8A - 6mm²

12A - 10mm²

20A - 10mm²

30A - 16mm²

En pratique, essayez de toujours réduire la longueur de câbles et utilisez de fortes sections (minimum 2,5mm²).

Chapitre 5 :

Dimensionnement

d'une installation

solaire

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

1 Dimensionnement :

Les applications solaires en site isolé ont le mérite d'un fonctionnement simple et d'un entretien réduit, mais nécessite en revanche une prise en compte des propriétés de la source d'énergie dans leur utilisation.

La fiabilité de l'installation solaire photovoltaïque repose essentiellement sur la consommation raisonnée de l'électricité produite. Les différentes étapes du dimensionnement ainsi que les règles d'installation du générateur solaire :

1.1 Consommation énergétique :

Gérer les dépenses énergétiques, c'est la clé d'un fonctionnement autonome et fiable du générateur solaire photovoltaïque. D'une manière générale, toute application électrique doit être sobre et performante pour prétendre à une alimentation solaire. Les appareils utilisant des résistances chauffantes (convecteur, sèche-cheveux, four, machine à laver...), de l'éclairage peu performant (incandescent, halogène...) ou encore les applications motorisées (outillage) devront être proscrites de l'installation photovoltaïque.

Un système bien adapté nécessite l'évaluation de la puissance électrique des applications à alimenter. L'énergie nécessaire s'exprime par :

$$E_c = P \times t$$

Avec :

E_c : énergie consommée.

P : puissance de fonctionnement de l'appareil.

t : temps d'utilisation.

L'énergie est donc le produit de la puissance par le temps. Cette relation permet de calculer les besoins journaliers en énergie.

En effet, comme un système photovoltaïque doit fournir son énergie durant une journée entière, il est naturel de prendre la période de 24 heures comme unité de temps.

L'énergie E , est donc l'énergie électrique consommée en 24 heures par l'application et s'exprime en Watt- heure par jour (Wh/j). On l'appelle aussi consommation journalière.

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

Pour calculer la consommation totale d'une installation, on calcule d'abord la consommation journalière de chaque équipement ou chaque fonction électrique et ensuite on les additionne.

La consommation totale s'exprime par :

$$E_t = \sum P_i \times T_i$$

Avec :

P_i : Puissance électrique d'un appareil « i » exprimée en Watt (W).

T_i : Durée d'utilisation de cet appareil « i » en heure par jour (h/j).

Comme ces équipements fonctionnent en alternatif et que la consommation énergétique passe par un onduleur, il est nécessaire de tenir compte du rendement de l'onduleur pour évaluer la puissance requise, on écrit alors :

$$\text{Puissance corrigée} = \text{puissance des appareils à alimenter} \times \text{Rendement de l'onduleur}$$

1.2 Energie solaire récupérable :

1.2.1 Inclinaison et orientation optimales des capteurs photovoltaïques :

L'énergie fournie par les capteurs photovoltaïques est directement proportionnelle à l'ensoleillement. Afin d'optimiser au mieux l'installation solaire il faut donc tenir compte de ce facteur, qui dépend à son tour du lieu de l'installation, de l'orientation et de l'inclinaison de ces capteurs.

Idéalement, Ils doivent être orientés en plein Sud dans l'hémisphère Nord et en plein Nord dans l'hémisphère Sud, à l'écart des zones ombragées, et inclinés d'un angle qui permet l'optimisation de l'énergie récupérée.

Un plan incliné est caractérisé par son inclinaison β (par rapport à l'horizontale), et son orientation ou azimut χ par rapport au sud.

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

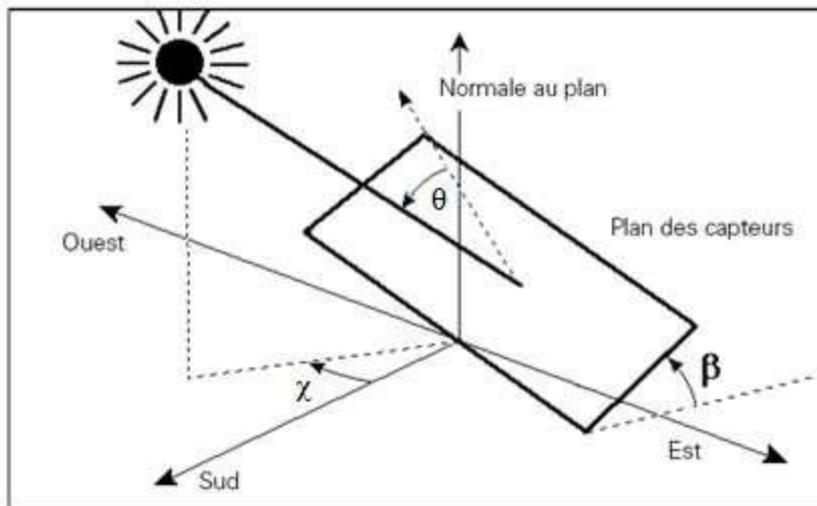


Figure 40 : Définition des angles pour un plan incliné : inclinaison β , azimut χ et l'angle d'incidence θ .

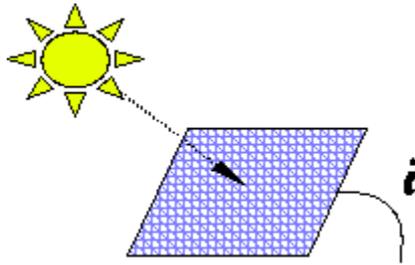
Plus les rayons sont proches de la perpendiculaire au plan des panneaux, plus la quantité d'énergie disponible est importante.

- En moyenne, sur l'année, l'inclinaison optimale pour maximiser l'énergie annuelle produite est égale à la latitude du lieu.
- Une inclinaison plus forte que la latitude peut augmenter l'énergie récupérée en hiver (la trajectoire du soleil étant basse dans le ciel), au détriment de celle récupérée en été.
- L'inverse est réalisé pour une inclinaison plus faible que la latitude.

Ces considérations sont prises en compte lors du dimensionnement d'un système photovoltaïque.

L'inclinaison du module se base sur la valeur de la latitude du lieu, ce qui constitue un bon compromis été/hiver pour une production annuelle.

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire



i = angle correspondant à la latitude du site d'implantation.

1.2.2 Ombrage :

Il arrive que les modules soient placés face à un type d'obstacle qui forme des effets d'ombrage sur le rayonnement incident.

Ces effets d'ombrage sur le rayonnement reçu sont très difficiles à estimer intuitivement, cependant, il faut faire attention aux ombrages puisqu'ils influent sur la production d'énergie et provoque un déficit de production important dont il faut tenir compte.

Lorsqu'une cellule est ombrée, c'est le courant de toute la chaîne des cellules en série qui est limité.

1.3 Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

Cette étape consiste à calculer la quantité de modules photovoltaïques que l'on devra posséder pour couvrir les besoins en électricité.

1.3.1 Puissance crête d'un générateur photovoltaïque :

La puissance crête des panneaux à installer dépend de l'irradiation du lieu d'installation. On la calcule en appliquant la formule suivante :

$$P_{ch} = \frac{E_c}{K \cdot I_r}$$

P_{ch} : Puissance crête de champs photovoltaïque en Watt crête (Wc).

E_c : Energie consommée par jour (Wh/jour).

I_r : Temps moyen d'ensoleillement journalier (h/jour).

En Algérie : $2 \geq I_r \leq 8$. On prend la moyenne de 5 h/Jour.

K : Coefficient correcteur, ce coefficient tient compte :

- De l'incertitude météorologique.
- De l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison.

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

- Du point de fonctionnement des modules.
- Du rendement moyen charge/décharge de la batterie (90%).
- Du rendement de régulateur (95%).
- Des pertes dans les câbles et connexions pour les systèmes avec batterie.

K est en générale compris entre 0,55 et 0,75. La valeur souvent utilisée dans les calculs du système avec batterie est $k=0,65$.

1.3.2 Tension de fonctionnement du champ photovoltaïque :

On choisit la tension de fonctionnement en fonction de la puissance crête du champ photovoltaïque en watt. De façon générale :

Puissance crête(W_c)	Moins de 500 W_c	De 501 W_c à 2000 W_c	De 2001 W_c à 10000 W_c	Plus de 10000 W_c
Tension de champ (V)	12	24	48	96

Tableau : Tension du champ en fonction de sa puissance crête.

1.3.3 Nombre de panneaux photovoltaïques à utiliser :

A partir de la puissance crête des panneaux on peut déterminer le nombre de :

- Panneaux solaire nécessaires à l'installation :

$$N_m = \frac{P_{ch}}{\text{Puissance crête unitaire panneau}}$$

- Le nombre de modules connectés en série sera égale à :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_n}$$

V_{ch} : Tension total du champ.

V_n : La tension délivrée par un seul panneau photovoltaïque.

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

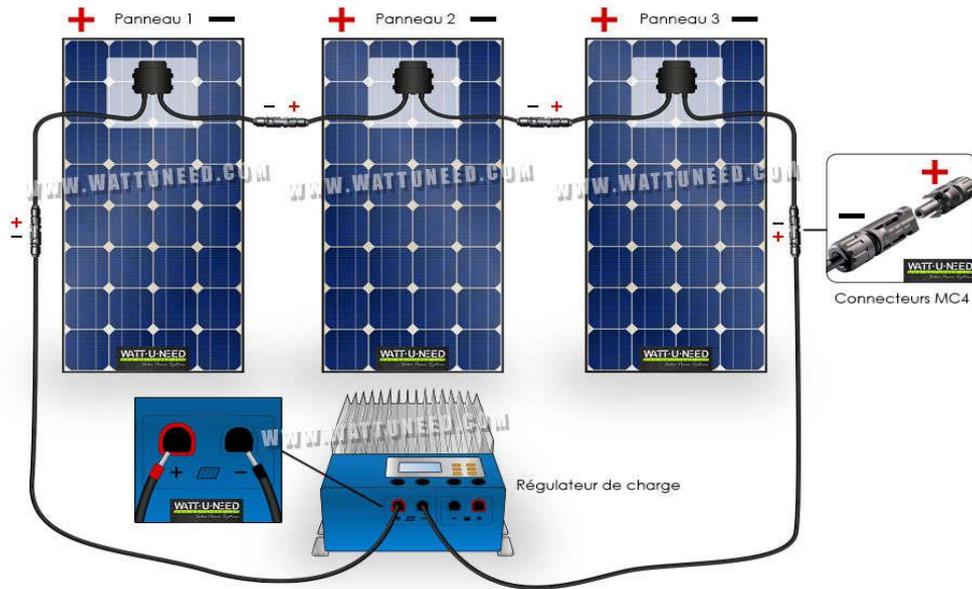


Figure 41 : Montage en série de panneaux solaires.

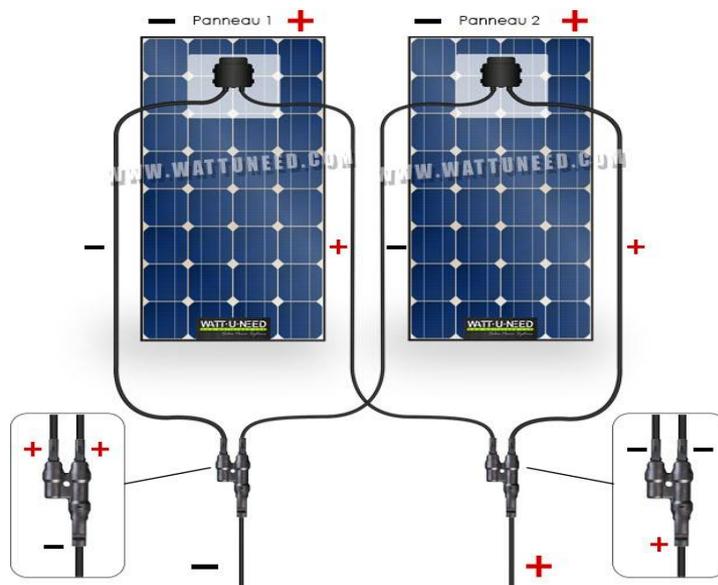
- Le nombre de modules connectés en parallèles s'exprime par :

$$N_p = \frac{I_{ch}}{I_n}$$

Avec :

I_{ch} : Courant total du champ.

I_n : Le courant d'un seul panneau photovoltaïque.



Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

Figure 42 : Montage en parallèle de panneaux solaires.

1.4 Dimensionnement du parc de batteries :

Pour réaliser le dimensionnement des batteries, on procède de la façon suivante :

- On calcule l'énergie consommée (E_c) par les différents récepteurs.
- On détermine le nombre de jours d'autonomie nécessaires.
- On détermine la profondeur de décharge acceptable pour le type de batterie utilisé.
- On calcule la capacité (C) de la batterie en appliquant la formule ci-dessous :

$$C_{ch} = \frac{E_c \times N}{D \times U}$$

C_{ch} : capacité du champ de batterie en ampère heure (Ah).

E_c : énergie consommée par jour (Wh/j).

N : nombre de jour d'autonomie.

D : décharge maximale admissible (0,8 pour les batteries au plomb).

U : tension de la batterie (V).

1.4.1 Nombre de batteries en séries :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_{batterie}}$$

V_{ch} : tension du champ

$V_{batterie}$: la tension de la batterie

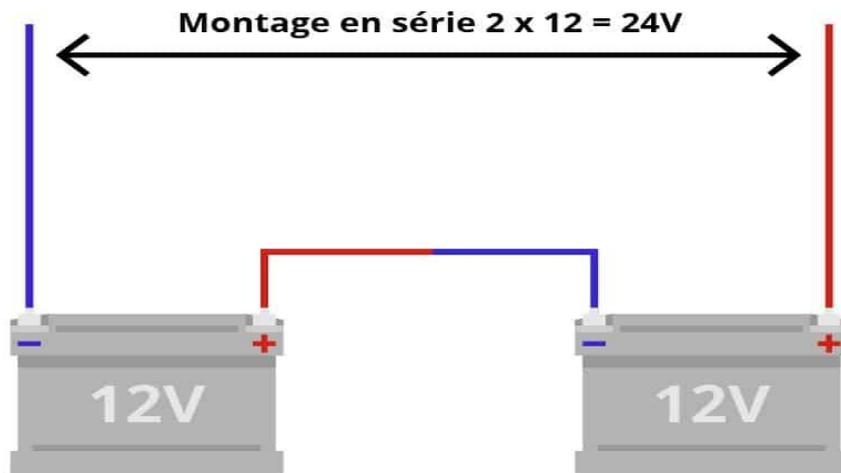


Figure 43 : Montage en série de batteries solaires.

1.4.2 Nombre de batterie en parallèles :

$$N_p = \frac{C_{ch}}{C_{batterie}}$$

Avec :

C_{ch} : capacité totale du champ de batteries associées à toute l'installation photovoltaïque.

$C_{batterie}$: capacité d'une batterie.

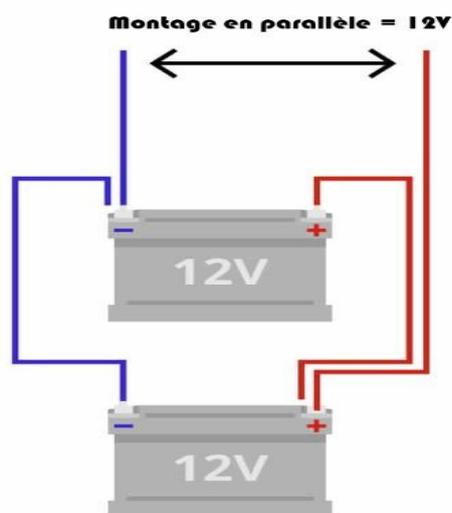


Figure 43 : Montage en parallèle de batteries solaires.

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

La durée de vie en d'une batterie décroît rapidement lorsque la profondeur de décharge augmente. En général, on essaie de limiter la profondeur de décharge à 50%, c'est-à-dire que l'on utilisera que la moitié de la capacité de batteries.

1.5 Dimensionnement du régulateur de charge :

Le régulateur est dimensionné d'après les paramètres suivants : tension, courant d'entrée et courant de sortie.

Tension nominale : Elle doit être celle du champ photovoltaïque.

Courant d'entrée I_e : C'est le courant de charge maximal que les modules sont susceptibles de débiter. Il doit être supporté sans problème par le régulateur. Pour estimer ce courant, le plus sûr est de prendre 1,5 fois le courant maximal.

Courant de sortie I_s : L'intensité du courant de sortie du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale que peuvent tirer les récepteurs simultanément. Elle peut être déterminée par la formule suivante :

$$I_{max} = P_{ch} / u$$

P_{ch} : la puissance crête du champ de photovoltaïque qui es calculé comme suit :

$$P_{ch} = P_c \times N_s \times N_p$$

Avec :

P_c : Puissance crête unitaire panneau.

N_s : Nombre de panneaux connectés en série.

N_p : Nombre de panneaux connectés en parallèle.

1.6 Dimensionnement de l'onduleur :

Le convertisseur de courant se dimensionne en fonction de plusieurs critères :

La tension d'entrée : c'est la même que la tension des batteries ou du régulateur (12, 24 ou 48V DC).

La tension de sortie : 220/230 V en Algérie pour une fréquence de 50Hz.

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

La puissance nominale : c'est la puissance que les appareils consomment en électricité pour fonctionner de façon "normale". Pour connaître cette puissance nominale, il suffit de faire la somme des puissances des appareils électriques susceptible d'être utilisés en même temps. Il faut toujours choisir un convertisseur dont la puissance est légèrement supérieure à celle des appareils.

La puissance maximale : l'onduleur doit être capable de fournir une grande puissance (généralement 2 ou 3 fois la puissance nominale). Cette particularité est utile pour les appareils qui possèdent un moteur (réfrigérateur, micro-onde, lave-linge, ...), car leur consommation augmente très fortement lors du démarrage.

Le rendement : Une partie de l'électricité transformée est consommée par le convertisseur de courant (entre 80 et 95% de l'énergie est restituée). Il est important de contrôler ce rendement, sachant qu'un bon produit se situe autour de 90%. De plus, la plupart des convertisseurs consomment de l'énergie même lorsqu'ils ne fonctionnent pas (stand-by). Certains sont équipés d'un système de marche/arrêt qui permet de grandes économies dans les petites installations photovoltaïques.

1.7 Le dimensionnement des câbles électriques solaires :

Pour assurer le transport de l'énergie des modules jusqu'au régulateur de charge, on ne peut pas utiliser n'importe quel câble électrique.

Les câbles solaires sont étudiés pour résister aux conditions liées à leur utilisation. Ils sont les seuls à pouvoir assurer une longue durée de vie (supérieure à 30 ans) tout en minimisant les pertes d'énergie.

La résistance d'un câble électrique ne dépend ni de la tension ni de l'intensité du courant qui le traverse, mais dépend de la résistivité (ρ) du matériau utilisé (cuivre, argent, fer, ...), de la longueur du câble, de sa section, et de sa température.

Le cuivre est de loin le conducteur le plus utilisé, et sa résistivité oscille entre $16 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ à $0^\circ C$ et $17 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ à $25^\circ C$. L'équation permettant de connaître la résistance est la suivante :

$$R = \rho \times L / S$$

Avec :

R : La résistance en (Ω).

ρ : La résistivité en ($\Omega \cdot m$).

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

L : La longueur du câble en (m).

S : La section du câble s en (mm²).

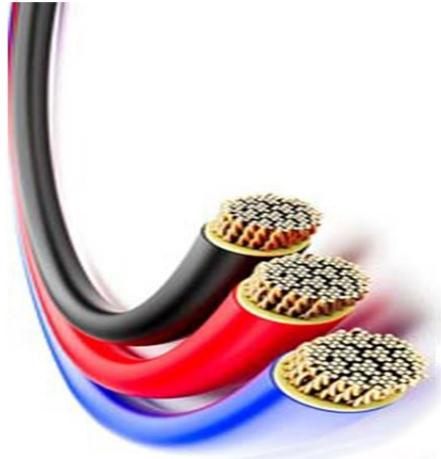


Figure 44 : Câble solaire photovoltaïque.

2 Installation solaire :

Un panneau solaire mal branché, c'est un panneau qui ne fonctionne pas. Voir pire, qui met en danger toute votre installation. Vous devez donc faire attention à respecter chacune des étapes suivantes :

- Relier les panneaux entre eux.
- Fixer le régulateur.
- Connecter le régulateur à la batterie.
- Connecter les panneaux au régulateur.
- Brancher l'onduleur solaire.

Il est primordial de respecter l'ordre de branchement, qui consiste à raccorder en tout premier la batterie au régulateur et de mettre sous tension car ce dernier doit pouvoir identifier la tension du système (12, 24 ou 48V). Si le panneau solaire est branché avant, il risque d'induire en erreur le régulateur, ce qui l'empêchera d'appliquer la bonne tension de charge à la batterie.

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

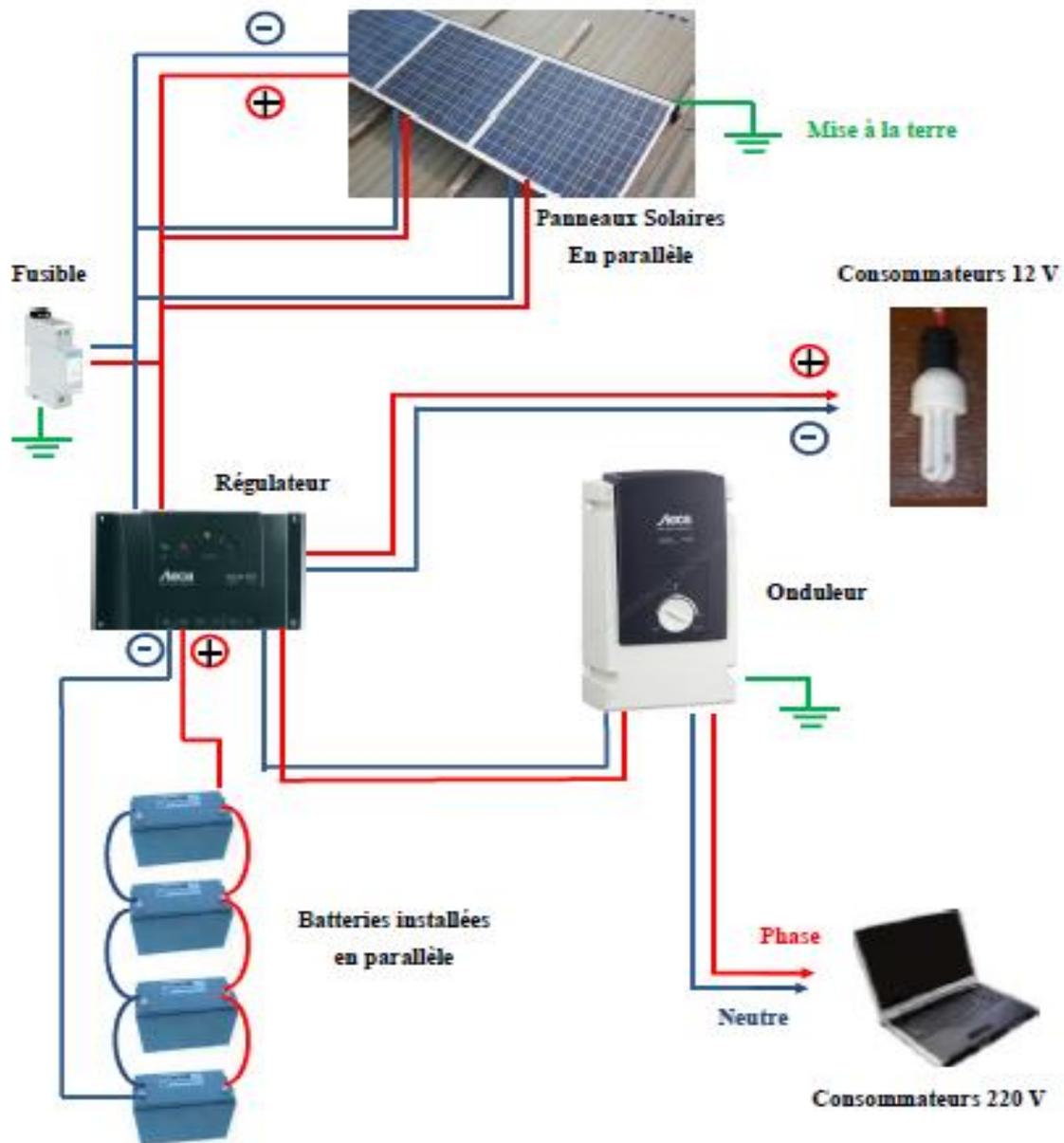


Figure 45 : Schéma d'installation solaire type.

La figure 46 illustre les différents éléments de l'installation photovoltaïque d'une maison.

Chapitre 5 : Dimensionnement d'une installation solaire

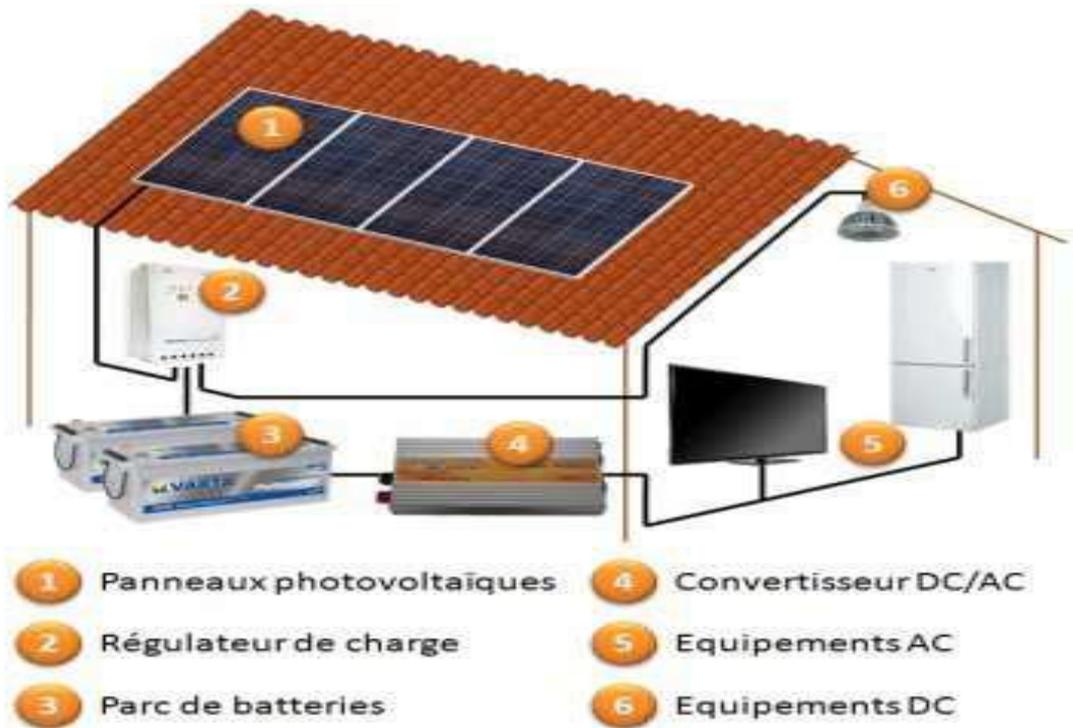


Figure 46 : Image d'une maison équipée d'une installation photovoltaïque.

Référence :

- A. Rahmouni, *Contribution à l'étude du comportement mécanique et acoustique des milieux hétérogènes et poreux : Application aux pierres calcarénites*, Thèse de doctorat, Université Mohammed V - Rabat, Maroc, 2016.
- Support Electrique pour Installation Solaire, Inter Aide, Sierra Leone, 2012.
- Connaissance des énergies, fiche pédagogique, électricité, 2016.
- Guide de montage des batteries en série/parallèle, myshop solaire.
- Energie solaire : fonctionnement, types, avantages, chiffres en France, énergie verte, climate consulting.
- Bal .J, L, Pujol.R, le livre blanc de la filière solaire thermodynamique Francaise, Des énergies renouvelables, Paris, 2013.
- Les deux formes du solaire, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique, Planète énergies, 2022.
- A. Ricaud, Gisement solaire et transferts énergétiques, 2011.
- Ch. Hamouda, Technologies des dispositifs et systèmes photovoltaïques, Université Batna 2, 2010.
- R. Belabed, Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- T. Mambrini, Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies, Thèse de doctorat, Université Paris SUD, 2014.
- A, Y. Rabia, Propriétés Optiques et Électriques du Silicium Amorphe Hydrogéné, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2017.

Les notions de base en photovoltaïque

Le photovoltaïque est une technologie qui convertit l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Voici quelques notions de base en photovoltaïque :

- **Cellule solaire** : C'est l'unité de base d'un panneau solaire. Une cellule solaire est composée de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs qui absorbent la lumière et créent un courant électrique.
- **Panneau solaire** : C'est un ensemble de cellules solaires reliées entre elles pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire.
- **Puissance nominale** : C'est la puissance maximale que peut produire un panneau solaire dans des conditions standardisées.
- **Rendement** : C'est le pourcentage de l'énergie solaire qui est converti en électricité par un panneau solaire. Le rendement dépend des caractéristiques des cellules solaires et de la qualité de la fabrication.
- **Système photovoltaïque** : C'est un ensemble de panneaux solaires reliés entre eux pour produire de l'électricité en continu. Le système peut être connecté au réseau électrique ou être autonome.
- **Onduleur** : C'est un équipement qui convertit le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif, utilisable dans les réseaux électriques domestiques ou commerciaux.
- **Installation photovoltaïque** : C'est l'ensemble des équipements et des travaux nécessaires pour installer un système photovoltaïque. Elle comprend le choix des panneaux solaires, la conception du système, l'installation et la mise en service.

