



INSTITUT DE LA FRANCOPHONIE
POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Manuel du cours en ligne

ÉLECTRICITÉ SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Maîtriser les bases de la conception
à la maintenance d'un système solaire
photovoltaïque

MODULE 2

Introduction au solaire photovoltaïque

Avec le soutien de
la



Wallonie

COMITÉ ÉDITORIAL

Direction de la publication

Cécile MARTIN-PHIPPS, Directrice IFDD

Coordination technique

Romarc SEGLA, Spécialiste de programme, IFDD

Équipe pédagogique

Marius AGBOKO

Gédéon Marlein DAHOU

Abigaël Ingrid YAROU BONI

Fernide Ghislaine AZANGBAN

Maurel HOUNDADJO

Modukpe AKPONIKPE

Judicaël SOMADOGANHOU

Comité éditorial

Marie SCHIPPERS, Conseillère en énergie, Service public de Wallonie

Tounao KIRI, coordinateur principal, IFDD

Ibrahima DABO, spécialiste de programme, IFDD

Kuami WOWOGNO, Expert, YIL Agence

Service de l'information et de la documentation de l'IFDD

Yves TESTET, Chargé de communication

Ce document a été préparé par l'Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD).

Le cours en ligne d'Introduction aux systèmes solaires photovoltaïques a été produit avec le soutien de la Région Wallonne, dans le cadre du projet de gestion et de partage de connaissances en français sur les énergies renouvelables.

Ce document est actualisé sur la base des informations disponibles à la date du 1^{er} décembre 2023.



Table des matières

2.1.	Irradiation solaire et gisement solaire	1
2.1.1.	Introduction à l'énergie solaire et son importance	1
2.1.2.	Gisement solaire : définition, mesure et facteurs influençant l'irradiation solaire	2
2.1.2.1.	Irradiation solaire	3
2.1.2.2.	Facteur influençant l'irradiation	4
2.1.2.3.	Facteur influençant directement la production d'un système solaire photovoltaïque	6
2.1.2.	Cartographie du gisement solaire dans le monde	9
2.1.3.	Méthodes de mesure et d'évaluation de l'irradiation solaire	10
2.2.	L'effet photovoltaïque et ses applications	12
2.2.1.	Principe de l'effet photovoltaïque et conversion de l'énergie solaire en électricité . 13	
2.2.2.	Description d'une cellule photovoltaïque	14
2.2.3.	Un module photovoltaïque	14
2.2.4.	Description des différentes technologies photovoltaïques : monocristallin, polycristallin, amorphe, etc.	15
2.2.4.1.	Les cellules de la première génération	15
2.2.4.2.	Les cellules de la deuxième génération	17
2.2.4.3.	Les cellules de la troisième génération	18
2.2.5.	Avantages et limitations de l'énergie solaire photovoltaïque	19
2.2.5.1.	Avantage	19
2.2.5.2.	Limite de l'énergie solaire photovoltaïque	19
2.3.	Systèmes solaires photovoltaïques	20
2.3.1.	Description globale d'un système solaire photovoltaïque domestique : composants, fonctionnement et interconnexion avec le réseau électrique	20
2.3.2.	Types de systèmes solaires photovoltaïques : raccordés au réseau, autonomes, hybrides, etc.	21
2.3.2.1.	Systèmes solaire autonomes	21
2.3.2.2.	Systèmes solaires raccordés au réseau	22
2.3.3.	Applications spécifiques des systèmes solaires photovoltaïques : pompage solaire, applications agricoles, éclairage solaire, application routière, etc.	24
	Référence bibliographique	30

Liste des tableaux

Tableau 1 : Masse d'air selon la position du soleil	6
---	---

Liste des figures

Figure 1 : le soleil	2
Figure 2 : Rayonnements directs, diffus et l'albédo	3
Figure 3 : Masse d'Air	5
Figure 4 : Effet de l'inclinaison sur l'énergie solaire reçue par une surface plane	7
Figure 5 : Irradiation solaire globale horizontale dans le monde.....	9
Figure 6 : Irradiation solaire globale horizontale en Afrique	10
Figure 7 : Transformation de l'énergie lumineuse en énergie photovoltaïque	13
Figure 8 : schéma d'une installation solaire autonome à utilisation en courant continue	21
Figure 9 schéma d'une installation solaire autonome à utilisation en courant alternatif	22
Figure 10 : Système PV connecté au réseau en autoconsommation	22
Figure 11 : Système PV connecté au réseau en injection avec rachat total	23
Figure 12 : Système PV connecté au réseau en injection avec comptage net.....	23
Figure 13 : Système solaire PV hybride	24
Figure 14 : Schéma d'un Système de pompage solaire	25
Figure 15 : Système solaire utilisé dans le domaine de la télécommunication	28

Liste des photos

Photo 1 : Pyranomètre.....	11
Photo 2 : Solarimètre	11
Photo 3 : Pyrhéliomètre	12
Photo 4 : Surface d'un panneau solaire photovoltaïque monocristallin	16
Photo 5 : Surface d'un panneau solaire photovoltaïque polycristallin	17
Photo 6 : Surface d'un panneau solaire photovoltaïque amorphe	18
Photo 7 : Système de pompage solaire, Tori - Bénin.....	25
Photo 8 : Irrigation solaire en installation Tori – Bénin	26
Photo 9 : Irrigation solaire dans un champ	26
Photo 10 : Lampadaire solaire à un bras, Tori – Bénin	27
Photo 11 : Lampadaire solaire à deux bras, Tori – Bénin.....	27
Photo 12 : Réfrigérateur solaire.....	28
Photo 13 : Feu tricolore, Cotonou - Bénin	29
Photo 14 : Radar solaire.....	29

2.1. Irradiation solaire et gisement solaire

2.1.1. Introduction à l'énergie solaire et son importance

Très grande source d'énergie inépuisable, le soleil est une sphère gazeuse d'hydrogène et d'hélium. Il dispose d'une puissance rayonnée de $3.83.8 \times 10^{26}$ W équivalente à une densité de 62.5MW par chaque mètre carré de superficie solaire. De cette énorme quantité, la petite partie envoyée à notre planète représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Soit une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Le grand défi c'est de pouvoir récupérer et tirer profit de toute cette quantité d'énergie que le soleil rend disponible. En effet, l'énergie solaire est dispersée sur toute la superficie de la terre et les océans. Elle est disponible pour des applications directes comme le séchage, le chauffage ou même en agriculture.

Appelé « **Constante solaire** », la quantité d'énergie traversant l'atmosphère extérieure équivaut à 1368 W/m² souvent arrondi à 1400 W/m². Elle se réduit en traversant les couches polluées jusqu'à atteindre 1000 W/m² pour atteindre la surface du sol, dans les zones tempérées.

Il faut remarquer que l'atmosphère agit comme un filtre qui laisse passer essentiellement le rayonnement visible du soleil, tandis que les rayonnements UV et les infrarouges sont bloqués. La terre réémet cette énergie par rayonnement infrarouge.

Comme caractéristique descriptif du soleil, il faut noter qu'il est âgé de $4,5 \times 10^9$ ans, avec un diamètre de $1,4 \times 10^6$ km (qui est 100 fois celui de la Terre = 12 600 km). Il est situé à une distance de 150×10^6 km de la terre, avec une masse de 2×10^{30} kg contre une masse de 6×10^{24} kg pour la terre. La masse volumique du soleil est de 1,41 g.cm⁻³ (eau = 1 g.cm⁻³; Terre = 5,5 g.cm⁻³). La température au centre du soleil est estimée à 15×10^6 K pour une température de surface de 5 800 K. La durée de vie du soleil est estimée à 10 Milliards d'années.

Il existe 3 utilisations de l'énergie solaire :

- L'utilisation ou la production de la chaleur : le "solaire thermique"
- La production d'électricité : le "solaire photovoltaïque"
- Le solaire thermodynamique.

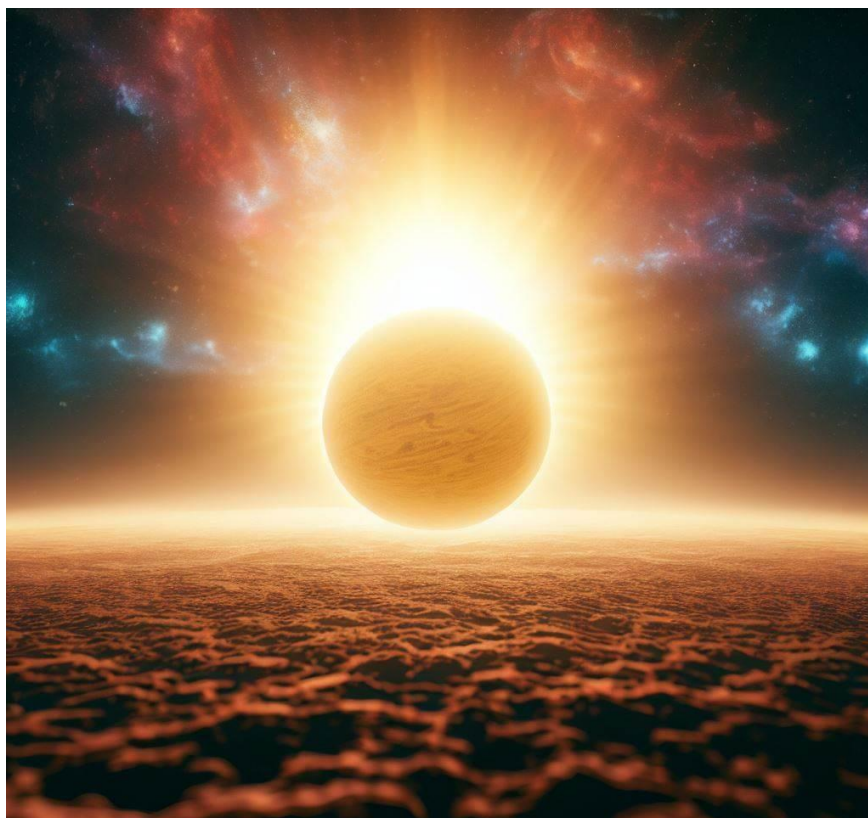


Figure 1 : le soleil

2.1.2. **Gisement solaire : définition, mesure et facteurs influençant l'irradiation solaire**

La radiation solaire est constituée d'ondes électromagnétiques de différentes fréquences, dont le rayonnement visible. Le rayonnement visible est constitué de longueurs d'ondes comprises entre 0.4 et 0.7 mm. Chaque groupe d'onde transporte une certaine quantité d'énergie. Trois type de rayonnement solaire arrivent à la surface de la terre, représentant le rayonnement global : il s'agit du rayonnement direct, du rayonnement diffus, et l'albédo.

Après une absorption de la vapeur d'eau, de l'ozone, du gaz carbonique et de l'oxygène, le rayonnement provenance directement du soleil est appelé « **rayonnement direct** ». C'est le rayonnement la plus intense qui atteint la surface des panneaux solaires, et qui influence l'orientation d'un module solaire.

Lors de la présence de molécules gazeuses, d'aérosols, et de gouttelettes d'eau, le rayonnement solaire direct donne naissance au « **rayonnement solaire diffus** » provenant de l'ensemble de la voûte du ciel. Contrairement au « **rayonnement direct** », le « **rayonnement solaire diffus** » est plutôt vaste et est plus important en conditions nuageuses.

L'albédo quant à lui, est due à la réflexion d'une partie de la radiation incidente sur la superficie du module ou d'autres objets voisins au module. Elle a une très faible contribution au rayonnement global. On peut retenir donc que le Rayonnement global est l'ensemble du rayonnement solaire direct, du rayonnement solaire diffus du ciel et de l'albédo.

La figure suivante montre la radiation et ses différentes parties.

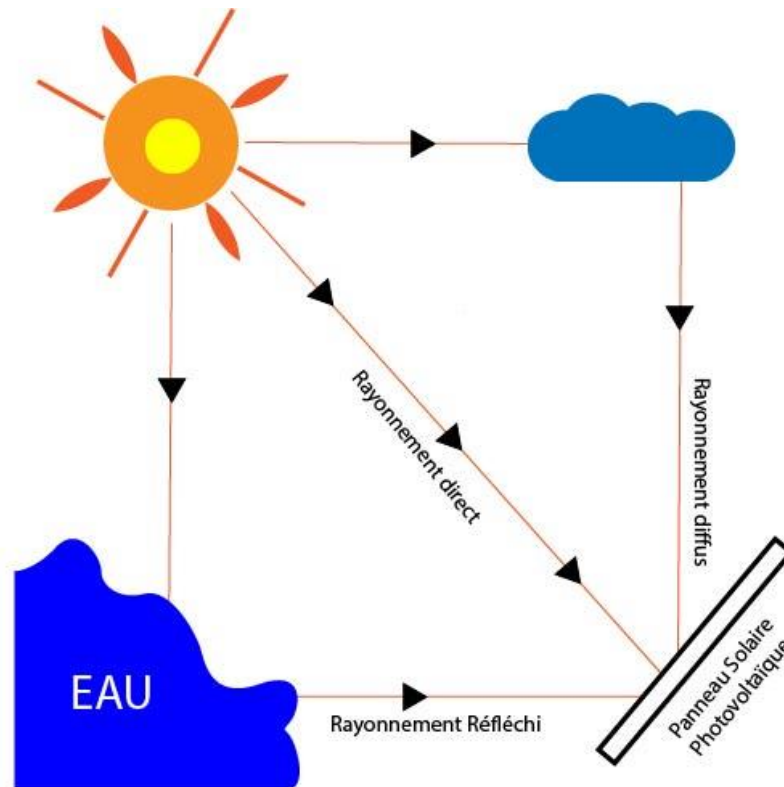


Figure 2 : Rayonnements directs, diffus et l'albédo

2.1.2.1. Irradiation solaire

La puissance du rayonnement solaire envoyée par le soleil sur une unité de surface d'un mètre carré est appelée l'irradiance. L'irradiance, étant donc la puissance du rayonnement solaire, elle s'exprime en W/m^2 . Le S.I. (système international d'unités) recommande le symbole E.

L'irradiation quant à elle, est l'énergie reçue par une surface au cours d'une période donnée (quotidiennement, mensuellement ou annuellement). Elle s'exprime en J/m^2 (joule par mètre carré). La Société Internationale de l'énergie Solaire recommande le symbole H. D'autres unités courantes sont le J/cm^2 (joule par centimètre carré) et Wh/m^2 (watt-heure par mètre carré) bien que ce dernier n'appartenant pas au système international d'unités (SI).

Pour résumer, l'irradiance mesure la puissance incidente du rayonnement solaire sur un plan donné en un instant et l'irradiation le fait sur un intervalle de temps défini (quotidiennement, mensuellement ou annuellement).

$$\text{Irradiation} (kWh/m^2/jour) = \text{Irradiance} (W/m^2) \times \text{Temps (heures)}$$

Plusieurs facteurs peuvent influencer l'irradiation journalière. Il s'agit du :

- taux d'humidité dans l'air ;
- la météo ;
- les saisons ;
- de la clarté de l'atmosphère (poussières) ;
- la durée du jour et ;
- la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon.

D'autre part, la géométrie sphérique est responsable de la répartition inégale de l'irradiation sur la surface de la terre. Ainsi, du fait de la terre, les régions situées sur l'équateur, ou proches de lui, reçoivent plus d'énergie que les régions situées vers les pôles, compte tenu de l'angle d'incidence des rayons solaires.

Il est estimé, que pour le soleil au Zenith à midi (Position du soleil au-dessus de notre tête), lors d'un clair, un air sec sans aucune poussière, et un ciel sans nuage, le rayonnement solaire maximal instantané est de 1000 W/m^2 .

En définitive, **la quantité d'énergie électrique qui sera produite par des modules solaires PV sera directement proportionnelle à l'Irradiation du site où sera installé le système.**

Il est donc essentiel de connaître les valeurs d'irradiation (la ressource énergétique solaire) correspondantes à un site donné.

2.1.2.2. Facteur influençant l'irradiation

2.1.2.2.1. La position géographique du lieu / territoire

La Terre tourne sur elle-même en 24 heures autour d'un axe appelé l'axe des pôles, qui fait un angle de 23° par rapport à la verticale. Cette inclinaison est constante tout au long de la course autour du Soleil et est responsable des variations saisonnières. La trajectoire de la Terre autour du Soleil décrit une ellipse légèrement aplatie.

Cette révolution autour du soleil et l'inclinaison de la Terre influencent l'angle avec lequel les rayons du Soleil frappent la surface du sol et la quantité d'ensoleillement quotidien sur un territoire donné. C'est ce qui détermine les saisons.

En effet, il y aura un moment, l'hémisphère Nord sera incliné au maximum vers le Soleil, et recevra une plus grande quantité d'énergie solaire, car les rayons solaires le frapperont presque perpendiculairement. Pendant ce temps, l'hémisphère sud est incliné en direction opposée au Soleil.

A une autre période de l'année, l'hémisphère Nord est incliné en direction opposée au Soleil. Il reçoit une plus petite quantité d'énergie solaire, car les rayons solaires le frappent de façon oblique. Les rayons y sont donc moins concentrés.

En fonction de la position d'un territoire sur la planète, et en fonction de l'orientation de l'hémisphère (nord ou sud), une saison sera définie. La production d'énergie électrique à partir d'une installation solaire sera donc influencée par la saison du territoire, qui elle, dépend de la position géographique du lieu.

Le paramètre décrivant la position géographique est la latitude. La latitude est l'angle entre l'équateur et un point sur le méridien.

La durée du jour est aussi un des facteurs qui peut influencer l'irradiation journalière. Elle dépend essentiellement de la latitude et du jour concerné.

Et même si deux régions sont à la même latitude, les différences d'irradiation peuvent être importantes. C'est le cas des régions désertiques (avec des climats très secs), reçoivent plus d'irradiation que des régions montagneuses ou des régions en bord de mer.

2.1.2.2.2. Le mouvement du soleil

Quand on parle du mouvement du soleil, on parle de son trajet diurnal (élévation du soleil) qui atteint sa hauteur maximale à midi, quand il est au zénith. Cette hauteur maximale, varie selon le cycle annuel.

2.1.2.2.3. L'atmosphère / Air mass

Les radiations solaires qui viennent sur la surface de la terre en parcourant l'atmosphère, dépendent des nuages, des gaz, et des petites particules présentent dans celui-ci.

L'atmosphère de la Terre joue un rôle important dans la manière dont la lumière du soleil atteint notre planète. Lorsque la lumière du soleil traverse l'atmosphère, différents phénomènes se produisent, comme la diffusion, l'absorption et la réflexion. Ces processus sont influencés par des éléments présents dans l'atmosphère, tels que les gaz, les petites particules et les nuages

Plus le soleil est proche de l'horizon, plus ses rayons doivent traverser une couche d'air épaisse, modifiant ainsi le spectre de la lumière solaire, donc l'énergie des photons et le rendement de conversion des cellules photovoltaïques. L'épaisseur relative de l'atmosphère traversée par le rayonnement solaire est appelée la masse d'air, et est noté AM. Lorsque le soleil est à la vertical, c'est-à-dire au zénith, AM vaut 1.

Dans le schéma qui suit, la masse d'air est égale à OM/OA qui est l'inverse de sinus h :

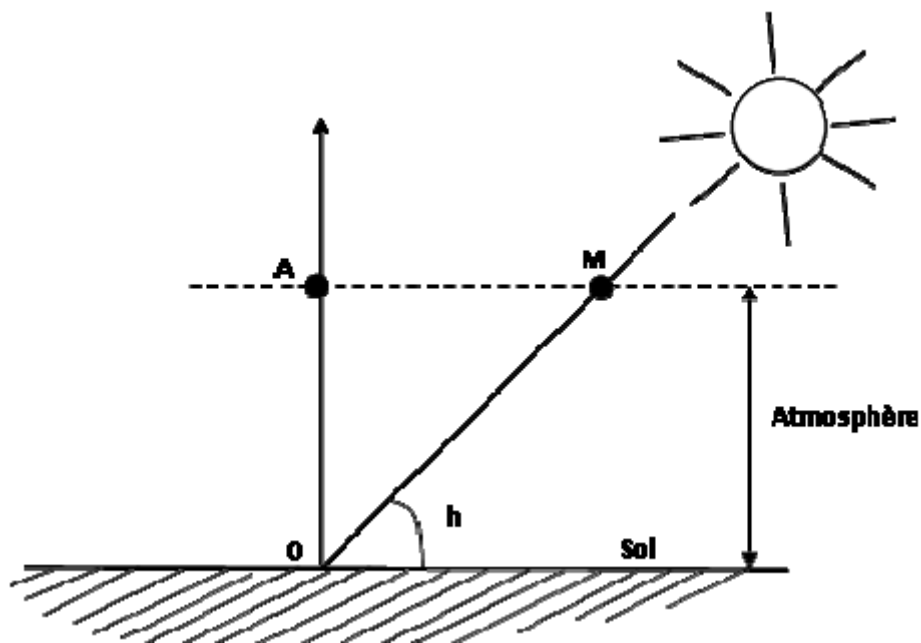


Figure 3 : Masse d'Air

Source : Base de l'énergie solaire photovoltaïque, Ahmed o BAGRE

Le tableau suivant donne quelques exemples de valeurs de Am en fonction de la position du soleil.

Tableau 1 : Masse d'air selon la position du soleil

Position du soleil	h	Sinus h	Am
Zenith	90°	1	1
45°	45°	0,707	1,41
15°	15°	0,258	3,86

Source : Base de l'énergie solaire photovoltaïque, Ahmed o BAGRE

La masse d'air de référence (AM = 1,5) inscrit sur les modules solaires correspond donc à une hauteur du soleil de : $m = 1,5$, $\sin h = 2/3$ et $h = 41,8^\circ$

- AM = 0 signifie qu'il n'y a pas d'atmosphère (cas des satellites) ;
- AM 1 signifie que le soleil est à la verticale ;
- AM 10 signifie que $\sin h = 0,1$ et donc que $h = 5,70$, le soleil est très bas sur l'horizon.
-

2.1.2.2.4. Effet de la nébulosité

La présence de nuage dans le ciel réduit l'irradiation solaire. Lorsque le ciel est couvert de nuages, une partie du rayonnement solaire est réfléchi, dispersée ou absorbée par les nuages avant d'atteindre la surface terrestre. Ce qui diminue la quantité de lumière solaire qui atteint la surface de la Terre.

Cependant, il est important de comprendre que l'impact de la nébulosité sur l'irradiation solaire est un aspect spécifique de la manière dont l'atmosphère interagit avec la lumière solaire.

En résumé, l'atmosphère dans son ensemble, y compris la nébulosité, les petites particules, la composition chimique et la densité de l'air, joue un rôle dans la manière dont la lumière solaire atteint la surface de la Terre. La nébulosité, en tant que facteur spécifique de l'atmosphère, diminue directement la quantité de lumière solaire en la diffusant et en l'absorbant avant qu'elle n'arrive sur la Terre.

2.1.2.3. Facteur influençant directement la production d'un système solaire photovoltaïque

2.1.1.1.1. L'orientation de la superficie

La radiation globale incidente sur une superficie quelconque dépend entre autres de l'orientation de la superficie. Une orientation face au soleil permet de capter une radiation maximale. Le soleil étant aussi en mouvement, il convient de trouver une orientation permettant de capter une radiation maximale.

Ainsi, l'orientation du soleil dépend à la fois de la position géographique et du mouvement du soleil.

Dans l'hémisphère nord les modules seront placés face au sud. Dans l'hémisphère sud les modules seront placés face au nord. L'angle d'inclinaison optimal est généralement la latitude du lieu.

Sous les tropiques (entre le Tropique du cancer et le Tropique du capricorne) le soleil peut être au nord ou au sud du module solaire. En général le module est toujours dirigé vers le vrai nord si vous êtes dans l'Hémisphère sud et le vrai sud dans l'Hémisphère nord.

2.1.1.1.2. L'angle d'inclinaison

L'angle d'inclinaison des panneaux solaires peut avoir un impact significatif sur la quantité d'énergie solaire qu'ils peuvent capter. Si une surface d'un mètre carré de panneaux solaires est inclinée de manière à être perpendiculaire aux rayons du soleil, elle recevra davantage d'énergie solaire.

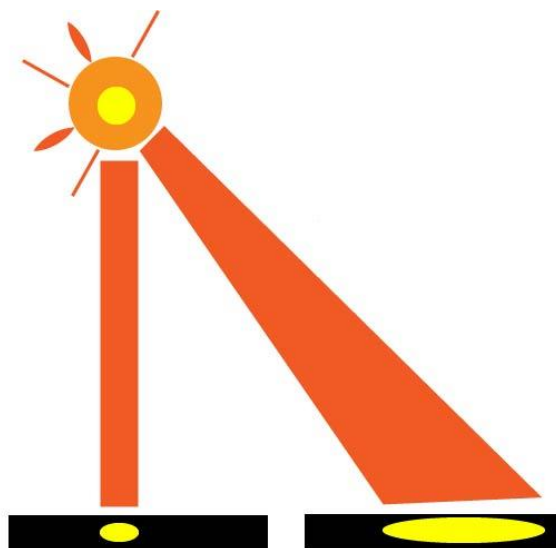


Figure 4 : Effet de l'inclinaison sur l'énergie solaire reçue par une surface plane

Dans les pays situés près de l'équateur, où la latitude est généralement comprise entre 0 et 10 degrés, il est recommandé d'incliner les panneaux solaires d'environ 10 degrés. Cette inclinaison optimale facilite également l'écoulement de l'eau de pluie sur les panneaux.

Pour les pays situés à des latitudes supérieures à 10 degrés, la recommandation courante consiste à incliner les panneaux solaires à un angle équivalent à la latitude du lieu. Cela permet de maximiser la réception du rayonnement solaire tout au long de l'année. Dans certains cas, il peut être avantageux d'augmenter légèrement l'angle d'inclinaison (latitude + 10 degrés ou latitude + 20 degrés) pour accroître la capture du rayonnement solaire pendant les mois les moins favorables.

En ajustant l'inclinaison des panneaux solaires en fonction de la latitude, on cherche à optimiser la quantité d'énergie solaire reçue sur une base annuelle. En inclinant les panneaux de manière à être perpendiculaires aux rayons du soleil, on permet une meilleure capture de l'énergie solaire. Cela permet d'exploiter au maximum le potentiel de rayonnement solaire disponible dans différentes régions.

L'utilisation d'un système de suivi du soleil permet de positionner le champ PV le plus perpendiculairement possible par rapport aux rayons du soleil. Un système PV avec suiveur solaire est une structure portante qui oriente les panneaux PV vers le Soleil tout au long de la journée. On optimise ainsi la quantité d'énergie solaire captée. Il y a différents types de systèmes de positionnement :

- **uniaxial** : Système permettant de faire tourner le champ PV autour d'un axe situé dans le même plan que le champ PV. L'orientation de cet axe peut être quelconque, mais le plus souvent, il s'agit d'un axe horizontal orienté Est-Ouest ou Nord-Sud, ou encore d'un axe parallèle à l'axe de rotation de la terre;
- **azimutal** : Système à un seul axe de rotation vertical, le champ PV conservant une inclinaison fixe;
- **biaxial** : Système à 2 axes de rotation permettant toujours de présenter la surface du champ PV perpendiculairement aux rayons du soleil.

L'utilisation des suiveurs solaires seraient idéal s'ils ne présentaient pas quelques inconvénients : ils sont complexes, fragiles et coûteux, en plus que leur usage ne peut se justifier qu'en cas d'absence de couverture nuageuse.

2.1.1.1.3. La température

Quand la température de la cellule croît, le courant produit croît de manière négligeable, et la tension décroît. La variation de la tension est directement proportionnelle à l'accroissement de la température. Ce qui montre qu'une augmentation de la température diminue la performance des panneaux solaires.

Les panneaux solaires fonctionnent plus efficacement à des températures plus basses.

L'effet de la température sur les cellules ou les modules dépend de leur coefficient de température.

2.1.1.1.4. La météo

Le rayonnement susceptible d'être capté par les panneaux solaires dépend de la météo. Plus il y a de nuage, plus l'ensoleillement sera faible et plus le rayonnement diffus sera important. Par ailleurs, des études récentes proposent d'orienter les modules solaires PV vers le zénith pendant des journées avec une nébulosité élevée.

2.1.1.1.5. L'ombrage

Il faut distinguer deux types d'ombrage :

Deux types d'ombrage :

- ❖ **les ombrages lointains:** Lorsque des objets tels que des montagnes, des immeubles ou de grands arbres sont situés loin de l'installation solaire, ils peuvent créer de l'ombre qui couvre une grande partie ou la totalité des panneaux solaires à certains moments de la journée. Cela se produit car ces objets sont grands et éloignés, ce qui crée une ombre qui couvre les panneaux solaires ;
- ❖ **les ombrages proches:** Lorsque des objets tels que des cheminées, des bâtiments ou des plantes sont proches des panneaux solaires, ils peuvent créer de petites ombres qui se limitent à quelques mètres carrés. Cependant, même une petite ombre sur un panneau solaire peut entraîner une forte baisse de production d'électricité.

L'ombrage a un impact sur la production d'un champ solaire. Voici quelques points importants :

- ❖ **Moins de soleil :** L'ombrage bloque le soleil et réduit la quantité d'énergie solaire que les panneaux solaires peuvent recevoir.
- ❖ **Effet sur les panneaux voisins :** L'ombrage d'un panneau peut également affecter les panneaux voisins, ce qui diminue leur production d'électricité.
- ❖ **Problèmes de tensions :** L'ombrage peut provoquer des déséquilibres entre les panneaux, ce qui diminue la production d'électricité et peut endommager les panneaux.
- ❖ **Risque de surchauffe :** L'ombrage partiel peut causer une surchauffe des panneaux non ombragés, ce qui peut les endommager.
- ❖ **Impact sur les onduleurs :** L'ombrage peut perturber le fonctionnement des onduleurs, ce qui peut réduire l'efficacité du système.

Pour minimiser l'impact de l'ombrage, il est important de planifier la disposition des panneaux solaires. Cela peut se faire avec des logiciels qui modélisent les bâtiments et objets autour du champ PV. Il faut également prendre en compte l'orientation et maintenir un environnement sans obstructions. Par exemple, en taillant les arbres ou en utilisant des systèmes de suivi solaire pour suivre le mouvement du soleil.

2.1.2. Cartographie du gisement solaire dans le monde

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. Elle est disponible en tout point de la surface terrestre, elle est totalement gratuite.

Le potentiel solaire varie à travers le monde en raison de facteurs tels que la latitude, l'altitude, le climat et la couverture nuageuse.

L'ensoleillement total de la Terre est de $1,6 \times 10^{18}$ kWh, soit 15 000 fois la consommation mondiale d'énergie.

Les régions proches de l'équateur, telles que les déserts, ont généralement un fort gisement solaire en raison de leur exposition directe au soleil et de leur faible couverture nuageuse.

Les pays situés dans des zones tropicales, comme certains pays d'Afrique, d'Asie du Sud-Est et d'Amérique latine, bénéficient généralement d'un gisement solaire abondant.

Les régions nordiques ou polaires peuvent avoir un gisement solaire plus faible en raison de la faible intensité du soleil pendant une partie de l'année et de la couverture nuageuse plus fréquente.

Des études ont montré que les déserts, tels que le Sahara et l'Atacama, sont parmi les régions du monde avec le plus fort gisement solaire.

L'Afrique est la partie la plus ensoleillée du globe après l'Australie

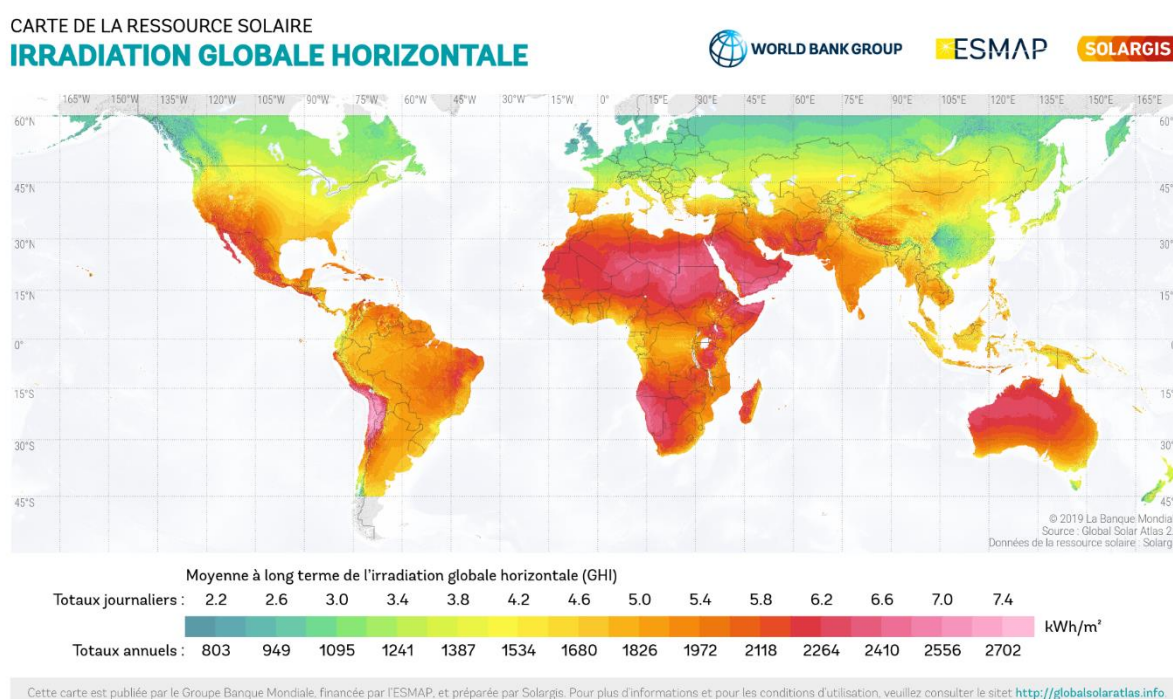


Figure 5 : Irradiation solaire globale horizontale dans le monde

Source <https://solargis.com/maps-and-gis-data>

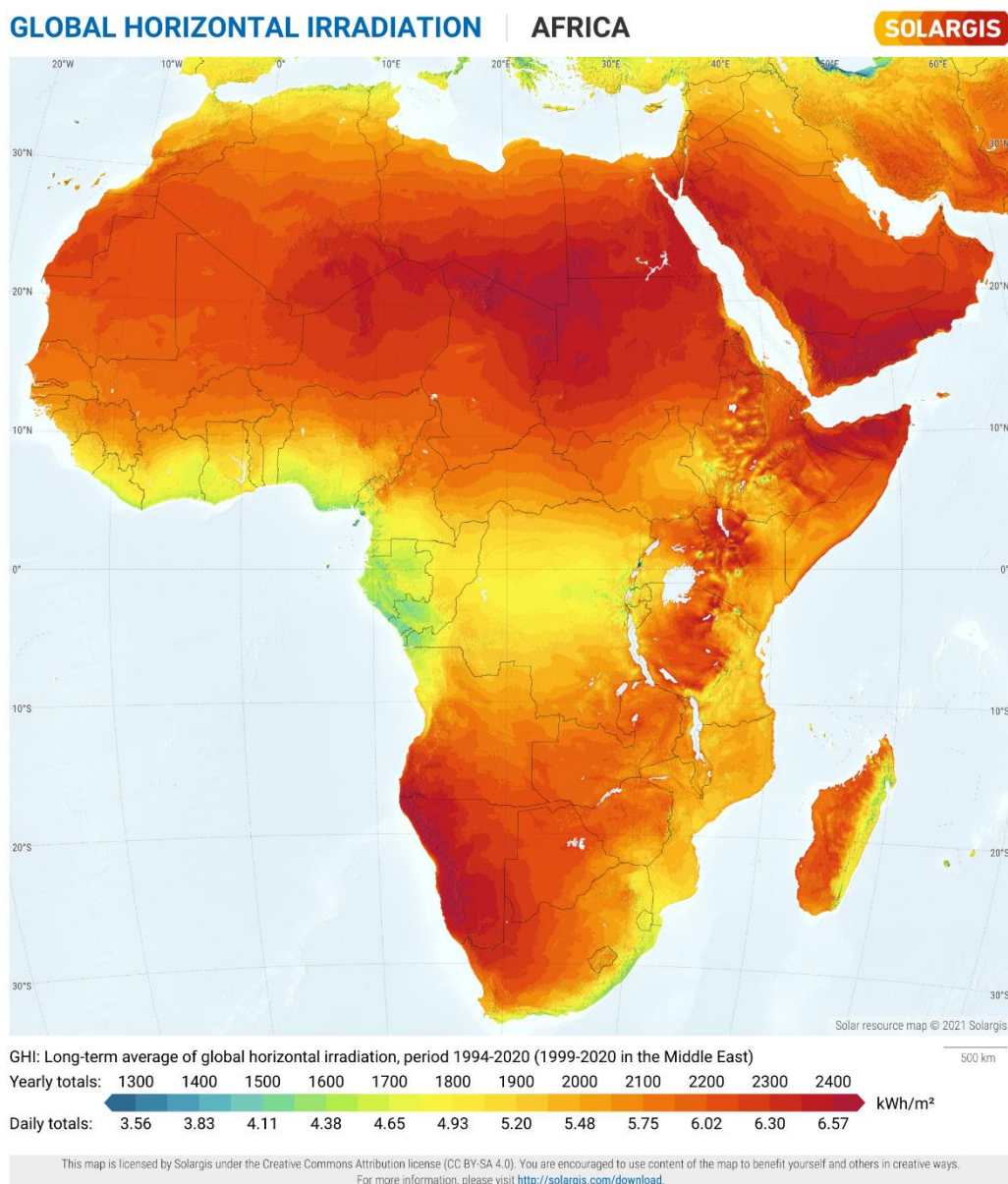


Figure 6 : Irradiation solaire globale horizontale en Afrique

Source <https://solargis.com/maps-and-gis-data>

2.1.3. Méthodes de mesure et d'évaluation de l'irradiation solaire

Pour évaluer l'irradiation solaire d'un site, il convient d'effectuer les mesures, tous les jours de l'année, 24h sur 24, et durant au moins une année entière.

Après cela, une moyenne permet d'évaluer l'irradiation solaire annuel du lieu. Mais pour le choix de l'irradiation dans le dimensionnement, il est recommandé de choisir l'irradiation du mois le moins ensoleillé.

S'il n'est pas possible de faire des mesures, il est possible d'évaluer l'irradiation solaire à partir de base de données de certains logiciels.

2.1.3.1.1. Appareil de mesure

Plusieurs appareils de mesure permettent de mesurer l'irradiance.

2.1.3.1.1.1. Le pyranomètre

Le Pyranomètre mesure le rayonnement diffus et global reçue sur une surface horizontal.

Les pyranomètres délivrent une tension directement proportionnelle à l'irradiance ou la puissance du rayonnement solaire. Cette tension provient d'une thermopile dont la partie supérieure s'échauffe par exposition à l'irradiation solaire alors que la partie inférieure protégée de cette irradiance sert de référence.



Photo 1 : Pyranomètre

2.1.3.1.1.2. Le solarimètre

Le solarimètre quant à lui mesure uniquement le rayonnement global



Photo 2 : Solarimètre

2.1.3.1.1.3. Le pyréliomètre :

Nous savons que le rayonnement global est composé du rayonnement diffus, l'albédo, et le rayonnement direct. La mesure de l'irradiation directe pour une incidence normale se fait avec le pyréliomètre.

Il est toujours monté sur un «sun tracker» qui suit la course apparente du soleil d'Est en Ouest.



Photo 3 : Pyrhéliomètre

2.1.3.1.2. Evaluation de l'irradiation

L'irradiation peut être fournie par les institutions (ex : Ministère de l'Energie), la météorologie nationale, ou bien auprès des fournisseurs ou fabricants de matériel photovoltaïque. Il est également possible d'obtenir des données d'ensoleillement sur certains sites internet.

Il existe des sources de données payantes auprès des services nationaux ou privés de météorologie comme par exemple :

- Météonorme 8, qui est une base de Données logicielles ;
- <https://solargis.com/> qui est une base de données en ligne
- Et SolarGIS iMaps / SolarGIS TMY qui offrent des cartes et logiciels en ligne pour les systèmes d'énergie solaire

D'autres sources de données gratuites, avec quelques limites d'accès selon le fournisseur sont : des applications libres en ligne

- **PVGIS** : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/ qui est une application libre en ligne
- <http://sourceforge.net/projects/carnaval> est un logiciel destiné au calcul de masques et d'ensoleillement ;
- <https://power.larc.nasa.gov/> qui est une base de données satellites dédiés aux données climatiques et météo
- www.gaisma.com base de données solaires par Continent, par pays, et par localité

Lorsque les valeurs d'irradiation ne sont pas disponibles pour le site concerné, il est possible de déterminer une valeur approchée à partir de valeurs connues sur des sites proches, ou utiliser les appareils de mesures.

2.2. L'effet photovoltaïque et ses applications

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

2.2.1. Principe de l'effet photovoltaïque et conversion de l'énergie solaire en électricité

L'effet photovoltaïque tire son nom du grec ancien "photos" signifiant lumière, clarté, et du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrique et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

Le principe de l'effet photovoltaïque consiste à convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques, qui sont des dispositifs semi-conducteurs généralement fabriqués à partir de silicium.

Lorsque la lumière du soleil (photons) frappe la surface de la cellule photovoltaïque, elle transmet son énergie aux électrons présents dans le semi-conducteur. Certains électrons absorbent suffisamment d'énergie pour se libérer de leurs atomes d'origine et entrent dans la bande de conduction, créant ainsi un courant électrique.

La transformation de la lumière en électricité ne nécessite pas d'action mécanique, ne produit pas de bruit, de pollution ou d'utilisation de combustible. Cette découverte remonte à 1839, lorsque le physicien français Antoine-César Becquerel a identifié la capacité des semi-conducteurs à convertir la lumière du soleil en électricité.

Au fil des ans, les avancées technologiques ont permis d'améliorer les rendements des cellules photovoltaïques, et elles ont été utilisées pour alimenter des satellites spatiaux dès les années 1950. Depuis, elles ont également trouvé des applications terrestres, notamment dans les panneaux solaires pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire.

En résumé, l'effet photovoltaïque est une conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en électricité grâce à des cellules photovoltaïques, et cela a ouvert la voie à une utilisation durable de l'énergie solaire pour alimenter diverses applications.

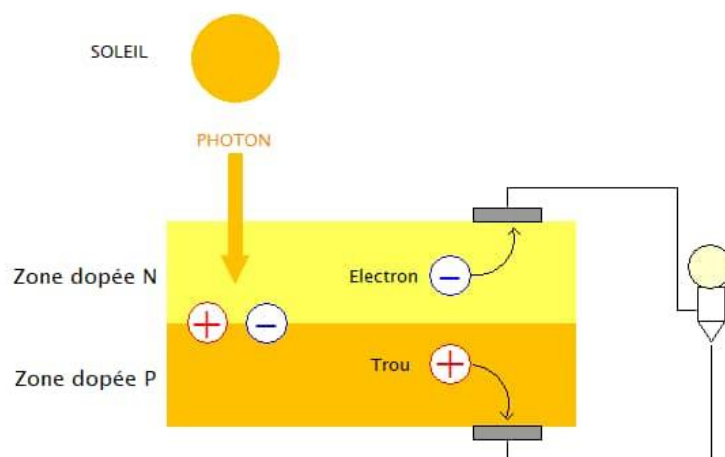


Figure 7 : Transformation de l'énergie lumineuse en énergie photovoltaïque

2.2.2. Description d'une cellule photovoltaïque

Un système photovoltaïque est un dispositif qui convertit directement l'énergie du rayonnement en énergie électrique.

L'élément de base d'un système photovoltaïque est la cellule photovoltaïque, appelée aussi cellule solaire.

Selon le GUIDE PRATIQUE des Installations photovoltaïques raccordées au réseau public de distribution C 15-712-1, une cellule photovoltaïque est un dispositif PV fondamental pouvant générer de l'électricité lorsqu'il est soumis à la lumière tel qu'un rayonnement solaire.

C'est un composant électronique qui a la forme d'une plaque mince, constituée d'une jonction entre deux couches semi-conductrices (ou entre une plaque métallique et une couche semi-conductrice). Chaque couche est reliée à un conducteur électrique, de sorte que l'on dispose de deux fils pour relier la cellule à un circuit électrique extérieur.

Ce matériau semi-conducteur est composé de deux parties. Une partie a un excès d'électrons et est dopée de type ***n***, tandis que l'autre a un déficit en électrons et est dopée de type ***p***. À la région de contact entre ces deux parties, les électrons en excès dans le matériau de type ***n*** diffusent dans le matériau de type ***p***. Cette diffusion crée une frontière isolante entre les deux matériaux.

Lorsque les photons sont absorbés dans le matériau de type ***p***, ils transportent des électrons à travers la zone isolante vers le matériau de type ***n***. Étant donné que ces électrons ne peuvent pas revenir en raison de la zone isolante, le matériau de type ***n*** devient chargé négativement (-) et le matériau de type ***p*** devient chargé positivement (+), créant ainsi une tension électrique.

2.2.3. Un module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est une association série – parallèle de plusieurs cellules solaires photovoltaïques. Il est composé de plusieurs éléments conçus pour garantir une performance optimale et une durabilité dans différentes conditions environnementales.

Face avant du module :

La face avant du module solaire est soumise à diverses contraintes et doit répondre à plusieurs critères :

Bonne transparence : La transparence de la face avant, généralement en verre trempé, est cruciale pour permettre le passage optimal de la lumière solaire à travers le module.

Résistance à l'impact et à l'abrasion : Elle doit résister aux chocs tels que la grêle, les jets de pierres, le vent de sable et même aux nettoyages répétés au chiffon.

Étanchéité à l'humidité : La face avant doit être hermétiquement scellée pour protéger les composants internes contre l'humidité.

Encapsulant pour l'enrobage des cellules : L'enrobage des cellules solaires est assuré par un matériau appelé Acétate d'éthylène-vinyl (EVA), qui offre les caractéristiques suivantes :

Face arrière du module :

La face arrière du module est également soumise à des exigences spécifiques :

Protection mécanique : Elle doit assurer une protection contre le poinçonnement et les chocs, réduisant ainsi le risque de mise à nu et de bris des cellules.

Étanchéité à l'humidité : Comme la face avant, la face arrière doit être étanche pour prévenir les dommages liés à l'humidité.

Bonne évacuation de la chaleur : Pour optimiser les performances, une bonne dissipation de la chaleur est nécessaire, particulièrement importante dans des conditions de forte luminosité.

Boîtier de connexion : Le boîtier de connexion offre plusieurs fonctionnalités essentielles :

Repérage des sorties : Il permet d'identifier clairement les sorties (+, -) et éventuellement le point milieu.

Connexion et passage des câbles : C'est là que les câbles de liaison sont connectés, assurant le transfert d'électricité.

Logement des diodes de protection : Il intègre des diodes pour protéger le module contre les problèmes de rétro-alimentation électrique.

Étanchéité à l'humidité : Le boîtier doit être complètement étanche pour éviter toute infiltration d'eau.

Joint périphérique : Le joint périphérique assure l'étanchéité entre la face avant et la face arrière, prévenant toute intrusion d'humidité.

Cadre : Le cadre du module solaire offre plusieurs avantages pratiques :

Montage et fixation mécanique : Il permet l'installation et la fixation mécanique du module, facilitant son intégration dans différents systèmes.

Résistance à la corrosion : Généralement en aluminium ou en aluminium anodisé, le cadre est choisi pour résister à la corrosion, avec une visserie en matériau inoxydable.

2.2.4. Description des différentes technologies photovoltaïques : monocristallin, polycristallin, amorphe, etc.

2.2.4.1. Les cellules de la première génération

Les cellules de la première génération sont conçues à base de silicium monocristallin et polycristallin

2.2.4.1.1. Cellule au silicium monocristallin

Une cellule au silicium monocristallin est fabriquée à partir d'un lingot de silicium cristallin très pur. Découpé en tranche, le lingot de silicium est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique.

Le courant produit est du courant continu. Le dessus de la cellule est le négatif, alors que le dessous est positif.

Les cellules monocristallines sont généralement circulaires ou semi-circulaires (à moins qu'elles n'aient été découpées en d'autres formes). Elles sont de couleur bleu foncé uniforme, presque noire pour certaines. Les rendements de cellule varient entre 14 et 18 %.

Une durée de vie des modules monocristallins est estimée à 30 ans par les fabricants. En général, la garantie stipule que le module produira au moins 80 à 90 % de sa puissance nominale d'origine, après 30 ans sous le soleil !

Les modules solaires monocristallins sont conseillés dans les régions à faible ensoleillement à cause de leur meilleurs rendements. Les panneaux monocristallins sont idéaux pour les installations où l'espace est limité, car ils nécessitent moins de surface pour générer la même puissance que les panneaux polycristallins.

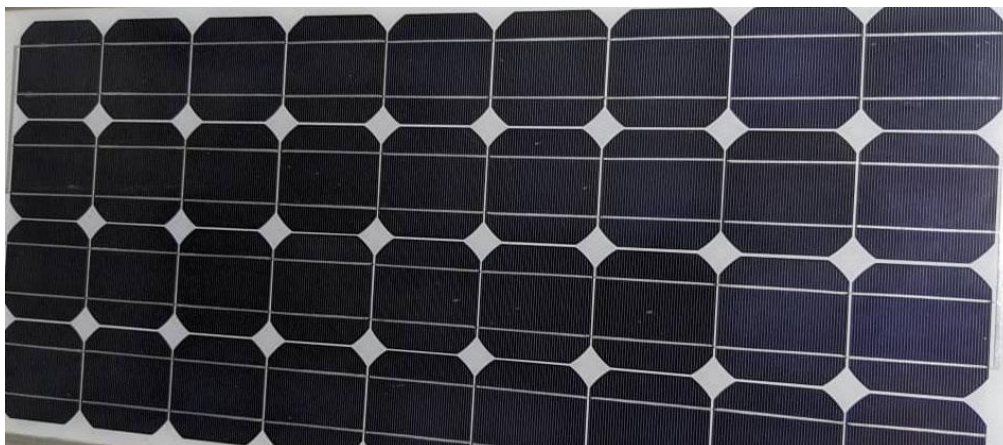


Photo 4 : Surface d'un panneau solaire photovoltaïque monocristallin

2.2.4.1.2. Cellule au silicium polycristallin

Une cellule polycristalline est fabriquée de manière similaire à une cellule au silicium monocristallin, mais à partir d'un lingot de silicium multicristallin, obtenu par fonte ou laminage. Pour cette raison, les coûts de fabrication sont légèrement inférieurs aux cellules au silicium monocristallin.

Les cellules sont généralement de forme carrée ou rectangulaire. Les cellules sont bleues avec des motifs (reflets), semblables à ceux visibles sur une tôle d'acier galvanisé.

Le rendement des cellules au silicium polycristallin est légèrement inférieur à celui des cellules au silicium monocristallin (12 à 14 %).

Une durée de vie des modules monocristallins est estimée à 25 ans par le fabricant. En général, la garantie stipule que le module produira au moins 80 à 90 % de sa puissance nominale d'origine, après 25 ans sous le soleil !

Sachant que l'augmentation de la température réduit la performance des panneaux solaire, les panneaux polycristallins ont une meilleure tolérance aux températures élevées que les panneaux monocristallins, ce qui signifie qu'ils peuvent mieux fonctionner dans des environnements chauds. Vu son faible rendement, il ne sera pas rentable dans une zone à faible ensoleillement, et celle à basse température. Ils sont souvent utilisés dans des projets à grande échelle où le coût est un facteur essentiel et où l'espace n'est pas un problème.

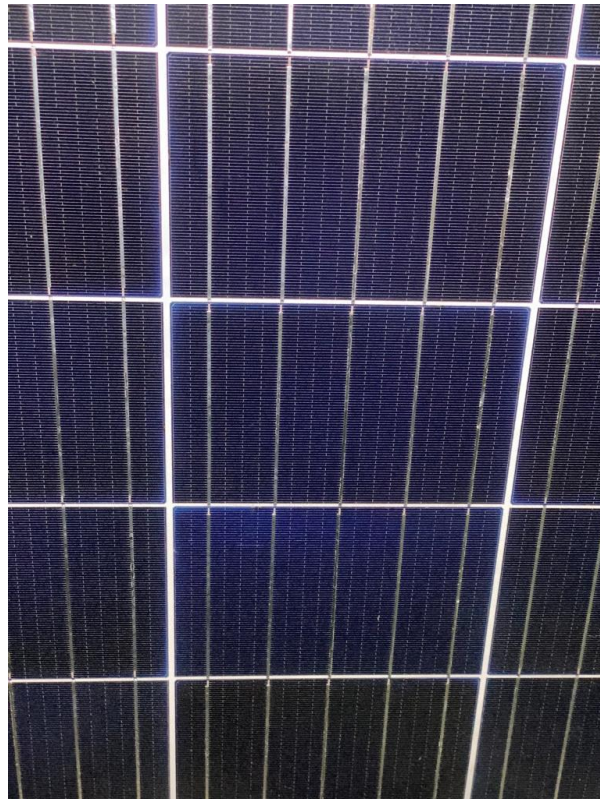


Photo 5 : Surface d'un panneau solaire photovoltaïque polycristallin

2.2.4.2. Les cellules de la deuxième génération

2.2.4.2.1. Cellule au silicium amorphe

La plupart des cellules au silicium amorphe sont fabriquées par dépôt de silicium amorphe sur une plaque de verre. La quantité de silicium requis dans le processus de fabrication est bien inférieure aux technologies des cellules au silicium mono ou polycristallin. Ceci a un impact favorable sur le prix au Wc.

Le principal inconvénient est que leur rendement est assez faible à leur sortie d'usine. De plus, il a une tendance à décroître avec le temps, pour se stabiliser entre 4 et 7 % pour la plupart des modules.

Puisque leur rendement est assez bas, la taille d'une cellule est environ deux fois plus grande que la taille des cellules au silicium monocristallin, pour une même puissance électrique délivrée.

Les cellules sont de couleur marron foncé, et disposées en couches séparées par des lignes très fines (procédé de fabrication entièrement automatique).

Les fabricants offrent des garanties sur la puissance fournie allant jusqu'à 10 ans.

Les panneaux amorphes sont généralement plus minces et plus flexibles que les autres types de panneaux solaires, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des applications où la flexibilité est nécessaire, comme les installations sur des surfaces courbes ou non conventionnelles. Ils ont une meilleure performance que les autres technologies dans des conditions de faible luminosité, comme les jours nuageux.

Ils peuvent donc être utilisés dans des projets où une flexibilité est nécessaire, comme les installations sur des bâtiments incurvés ou des objets courbes, et préférés dans des régions où l'ensoleillement est faible, car ils ont de meilleures performances dans ces conditions.



Photo 6 : Surface d'un panneau solaire photovoltaïque amorphe

2.2.4.2.2. Cellules au silicium amorphe multi-jonction (multicouche)

Ces cellules sont constituées de plusieurs couches superposées de silicium amorphe ; chaque couche étant réceptive à une certaine fraction du rayonnement solaire. Les rendements sont supérieurs aux cellules au silicium amorphe (monocouche).

Comme les modules au silicium amorphe, leur rendement est plus élevé lors des premiers mois d'exposition au soleil, puis le rendement se stabilise à des valeurs conformes aux données constructeur.

Les fabricants offrent des garanties sur la puissance fournie allant jusqu'à 20 ans.

Les panneaux multi-jonction sont utilisés dans des projets où un rendement élevé est essentiel, comme les installations à grande échelle sur des sites avec un bon ensoleillement.

Applications spatiales : Les panneaux multi-jonction sont souvent utilisés dans des applications spatiales, car ils sont capables de fournir des niveaux de puissance élevés dans l'espace où l'ensoleillement est plus intense

2.2.4.3. Les cellules de la troisième génération

Elles sont conçues avec des matériaux autre que le silicium. Nous avons :

- Les cellules solaires organiques ;
- Les cellules pérovskites, un matériau qui est un cristal hybride organique-inorganique, qui a la propriété de changer de structure selon la température et la pression.
- Les cellules à concentration
- Les cellules solaires sensibilisée au colorant, également appelée « cellule de Grätzel »

Il y a également les panneaux bifaciaux qui ont la capacité de **fournir de l'énergie grâce à ses deux côtés**.

2.2.5. Avantages et limitations de l'énergie solaire photovoltaïque

2.2.5.1. Avantage

Les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque sont :

- a) Énergie renouvelable : Le soleil est une source d'énergie inépuisable et durable. L'énergie solaire est donc une ressource renouvelable qui ne s'épuise pas, contrairement aux combustibles fossiles.
- b) Réduction des émissions de gaz à effet de serre : L'énergie solaire photovoltaïque ne génère pas de gaz à effet de serre lors de sa production, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique et à la réduction de l'empreinte carbone.
- c) Faible coût d'exploitation : Une fois les panneaux solaires installés, l'énergie solaire ne nécessite que peu d'entretien et a un coût d'exploitation très faible, ce qui peut réduire les factures d'électricité à long terme.
- d) Accessibilité : L'énergie solaire peut être installée partout, des zones rurales éloignées aux zones urbaines, et elle peut être utilisée pour alimenter des installations individuelles ou des réseaux électriques plus vastes.
- e) Énergie décentralisée : Les installations solaires photovoltaïques peuvent être déployées à divers endroits, y compris près des zones de consommation. Cela permet de produire de l'énergie localement, réduisant ainsi les pertes d'énergie liées au transport sur de longues distances.
- f) Capacité d'intégration au réseau : Les centrales solaires photovoltaïques peuvent être facilement intégrées au réseau électrique existant, ce qui facilite leur contribution à la production globale d'électricité.
- g) Énergie modulable et adaptable, qui peut être installée sur une grande variété de surfaces et de supports, selon les besoins et les contraintes du lieu
- h) Flexibilité d'échelle : Les installations solaires photovoltaïques peuvent être dimensionnées en fonction des besoins locaux, allant des petites installations résidentielles aux grandes centrales solaires, permettant une adaptation flexible aux demandes énergétiques locales.
- i) Indépendance énergétique : En utilisant l'énergie solaire, les individus et les communautés peuvent devenir plus indépendants des fournisseurs d'électricité traditionnels et des fluctuations des prix de l'énergie.
- j)

2.2.5.2. Limite de l'énergie solaire photovoltaïque

Les limites de l'énergie solaire photovoltaïque sont :

- a) Intermittence : L'énergie solaire est intermittente, car elle dépend de la disponibilité du soleil. Elle ne peut donc pas produire de l'électricité pendant la nuit ou dans des conditions météorologiques défavorables.
- b) Faible rendement : Les panneaux solaires ne convertissent que 25% maximum de l'énergie solaire
- c) Coût dépendant de la puissance de crête ;
- d) Stockage d'énergie : Pour surmonter l'intermittence, un système de stockage d'énergie, comme des batteries, peut être nécessaire pour stocker l'électricité produite pendant les périodes ensoleillées et la redistribuer pendant les périodes de faible production. Les technologies de stockage d'énergie sont encore en développement et peuvent ajouter des coûts supplémentaires.
- e) Coûts initiaux élevés : Bien que les coûts des panneaux solaires aient diminué au fil du temps, l'installation initiale peut être encore assez coûteuse, bien que les économies à long terme compensent souvent ces coûts.

- f) Impact environnemental de la fabrication : La fabrication des panneaux solaires implique l'utilisation de certains matériaux et produits chimiques qui peuvent avoir un impact environnemental. Cependant, ces impacts sont généralement compensés par la réduction des émissions de gaz à effet de serre pendant la durée de vie du panneau.
- g) Dépendance aux conditions météorologiques : L'énergie solaire est fortement dépendante des conditions météorologiques locales. Des jours nuageux ou pluvieux peuvent réduire considérablement la production d'électricité.
- h) Difficultés à satisfaire de forte puissance : C'est une énergie peu performante et peu efficace, qui a un rendement énergétique relativement faible par rapport à la surface occupée et à la quantité d'énergie solaire reçue.
- i) Occupation des terres : Les grandes installations solaires nécessitent beaucoup d'espace, ce qui peut entraîner une occupation des terres et un conflit d'utilisation des sols dans certaines régions.

2.3. Systèmes solaires photovoltaïques

La catégorisation d'un système solaire photovoltaïque (PV) influe sur la structure et la configuration de l'installation, adaptée à son application spécifique. Quelques notions clés à retenir :

- Le module PV, constitué d'un ensemble de cellules solaires interconnectées, formant une unité protégée de l'environnement.
- La chaîne PV, un circuit où les modules PV sont connectés en série pour créer des ensembles générant la tension de sortie requise, communément appelés "string" dans le langage courant.
- Le champ PV, regroupant plusieurs chaînes pour constituer l'unité de production d'énergie électrique en courant continu.

2.3.1. Description globale d'un système solaire photovoltaïque domestique : composants, fonctionnement et interconnexion avec le réseau électrique

Un système solaire photovoltaïque domestique est un ensemble de dispositif qui produit de l'électricité à partir de l'énergie solaire, notamment, la lumière du soleil.

En effet, la lumière solaire arrive sur la surface des modules photovoltaïques, où elle est convertie en énergie électrique de courant continu. Par le biais du régulateur, l'énergie produite est envoyée de manière totale ou partielle au niveau des batteries, où elle est stockée avec la précaution de ne pas excéder les limites de surcharge et de décharge profondes. Cette énergie stockée est utilisée pour alimenter des charges pendant la nuit, en jours de faible ensoleillement ou lorsque le système photovoltaïque est incapable de satisfaire la demande lui-même. Quand les charges à alimenter sont de courant continu, elles s'alimentent de manière directe. Quand les charges sont de courant alternatif, l'énergie s'envoie à un inverseur de courant où elle est convertie en courant alternatif (onduleur).

Ainsi, les éléments d'un système solaire photovoltaïque :

- De panneaux solaires photovoltaïques : qui captent la lumière du soleil et la convertissent en courant électrique continu :
- De batteries, permettent de stocker l'électricité produite par les panneaux, et de les utiliser pendant les heures de faible ensoleillement, ou en l'absence du soleil, comme la nuit ou les jours nuageux.
- Le régulateur qui contrôle la charge des batteries en régulant la quantité de courant qui passe à travers elles, afin de protéger les batteries et d'optimiser leur durée de vie.

- Un onduleur qui transforme le courant continu produit par les modules solaires en courant alternatif, qui est le type d'électricité utilisé dans nos maisons pour alimenter les appareils électriques. Il est utilisé seulement si les charges à alimenter ont besoin d'un courant alternatif.
- Compteur d'énergie, qui mesure l'électricité produite par le système solaire. Il est souvent présent dans des installations connectées au réseau électrique. Si le système solaire produit plus d'électricité que nécessaire, l'excédent est injecté dans le réseau électrique public. En cas de faible ensoleillement, la maison est alimentée par le réseau électrique. Dans ce cas, le compteur bidirectionnel mesure à la fois l'électricité consommée du réseau et l'électricité excédentaire injectée dans le réseau.

Dans le cas d'un système interconnecté au réseau, l'électricité produite par les panneaux alimente directement les appareils électriques de la maison. Si le système solaire produit plus d'électricité que nécessaire, l'excédent est automatiquement injecté dans le réseau électrique public, grâce au compteur bidirectionnel. En revanche, pendant les périodes où le soleil ne brille pas suffisamment, la maison continue de recevoir de l'électricité du réseau électrique public pour couvrir ses besoins énergétiques.

2.3.2. Types de systèmes solaires photovoltaïques : raccordés au réseau, autonomes, hybrides, etc.

2.3.2.1. Systèmes solaire autonomes

Le système solaire autonome est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau, notamment les sites isolés. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des batteries pour permettre de répondre à la totalité des besoins. Etant autonome, il est dimensionné pour répondre à toutes les charges qu'il doit alimenter, sans aucune source d'énergie d'appoint. D'où la nécessité d'un système de stockage. Selon le type de besoin, le système de stockage peut être constitué de batteries solaires pour l'électricité, ou d'un système de stockage d'eau pour un système de pompage d'eau.

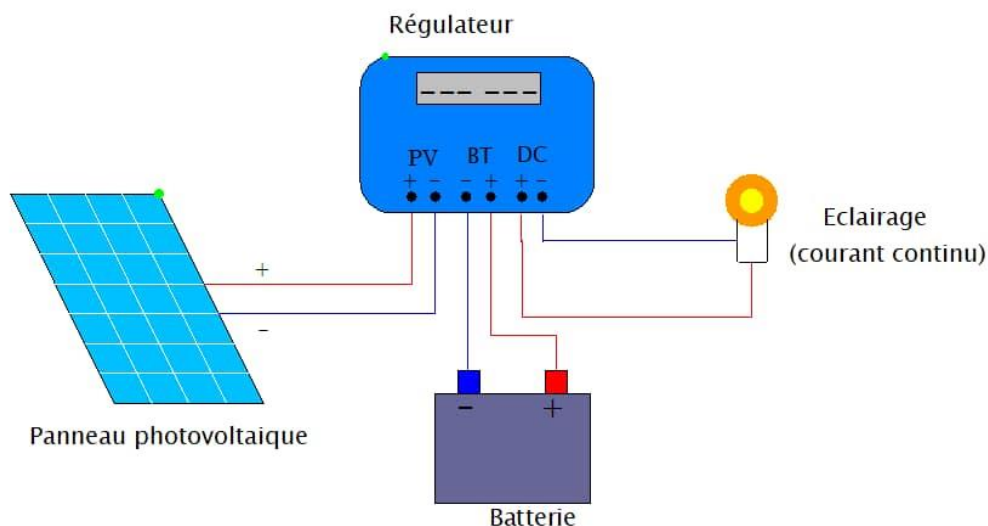


Figure 8 : schéma d'une installation solaire autonome à utilisation en courant continue

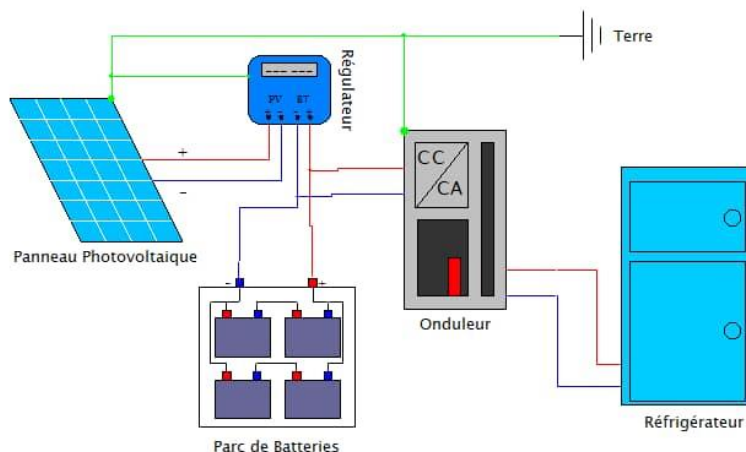
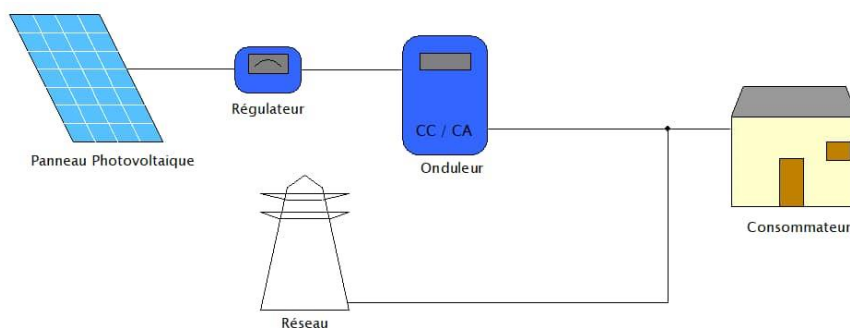


Figure 9 schéma d'une installation solaire autonome à utilisation en courant alternatif

2.3.2.2. Systèmes solaires raccordés au réseau

Dans un système solaire raccordé au réseau, l'énergie est injectée dans le réseau qui joue un rôle de stockage. Dans certains cas, les besoins peuvent être couverts intégralement par le système, avec un excédent d'énergie injecté sur le réseau, dans d'autres cas, une partie des besoins est couverte par le réseau et le système solaire. Il existe plusieurs types de systèmes solaires raccordés au réseau :

Système PV connecté au réseau en autoconsommation : C'est un système solaire connecté au réseau sans injection sur ce dernier. La conception se fait selon la charge du client. Ce dernier est alimenté en journée par le système solaire en temps ensoleillé. Il est alimenté par le réseau en temps non ensoleillé ou dans la nuit. On y retrouve un compteur qui décompte l'énergie pris du réseau.



Système PV connecté au réseau en autoconsommation

Figure 10 : Système PV connecté au réseau en autoconsommation

Système PV connecté au réseau en injection avec rachat total : ici, le système solaire produit uniquement pour injecter sur le réseau de distribution. Toute l'énergie produite est rachetée par le distributeur réseau à un prix d'achat du kWh fixé par l'état, souvent plus élevé que le prix de vente du kWh ordinaire. La charge des clients est exclusivement alimentée par le réseau, et le réseau a l'obligation d'acheter l'énergie produite par le système solaire du client.

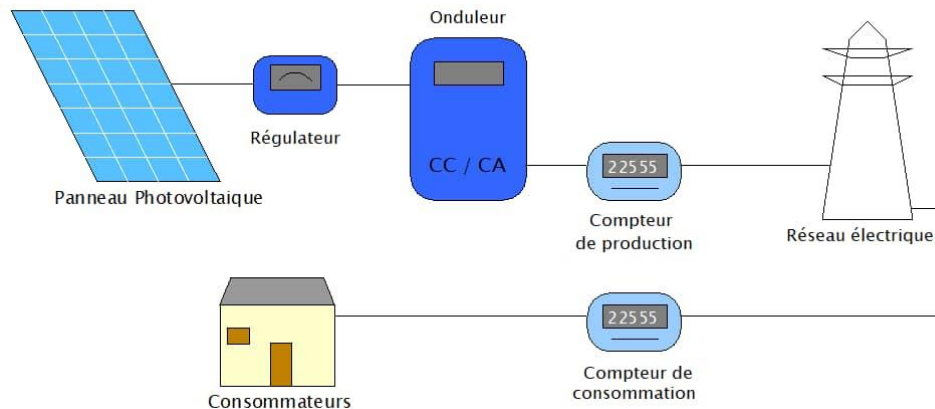
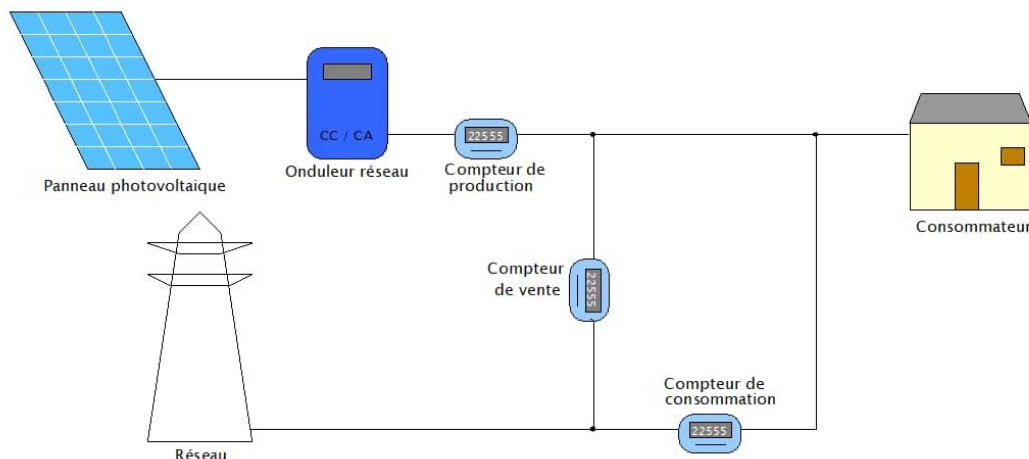


Figure 11 : Système PV connecté au réseau en injection avec rachat total

Système PV connecté au réseau en injection avec comptage net : Dans le cas du système PV connecté au réseau en injection avec comptage net, seule l'énergie produite en surplus par le système est vendue au réseau. En effet, l'énergie produite par le champ PV est directement consommée par le ménage. En cas d'insuffisance, le réseau fournit l'énergie manquante, le système peut être injecté ou non sur le réseau. Deux types d'onduleur sont utilisés : L'onduleur réseau et l'onduleur chargeur. En absence du réseau, l'onduleur chargeur du système solaire crée un réseau sur lequel injecte les onduleurs réseau.



Système PV connecté au réseau en comptage net

Figure 12 : Système PV connecté au réseau en injection avec comptage net

2.3.2.3. Systèmes solaire PV hybride

Un système solaire hybride est un système solaire qui combine deux sources d'énergie dont le solaire. Généralement, la seconde source d'énergie est un groupe électrogène, ou une énergie.

L'utilité des systèmes hybrides varient d'un cas à un autre. Ils peuvent être installés pour gérer les cas d'indisponibilités d'une source à l'autre, les cas d'apports en capacités pour gérer la charges totales, etc.

La plupart des systèmes hybrides comportent une batterie d'accumulateurs dont provient la charge de consommation. Les modules maintiennent la charge des accumulateurs tant qu'il y a assez de soleil. Si on assortit une éolienne au système, celle-ci recharge les accumulateurs pendant les périodes venteuses, qui surviennent souvent lorsque le ciel est couvert ou durant la nuit. Par conséquent, les éléments éoliens et solaires se complètent avantageusement. Le groupe électrogène n'est mis en marche qu'à l'occasion pour charger les accumulateurs durant les périodes nuageuses, ou sans vent, prolongées et, quand il est en marche, il tourne à plein régime. Son rendement et son efficacité énergétique sont donc bien supérieurs ; de plus, il nécessite alors moins d'entretien et il dure plus longtemps. Les systèmes qui comportent à la fois des composantes solaires et éoliennes suffisent souvent aux besoins, sans qu'un groupe électrogène ne soit nécessaire.

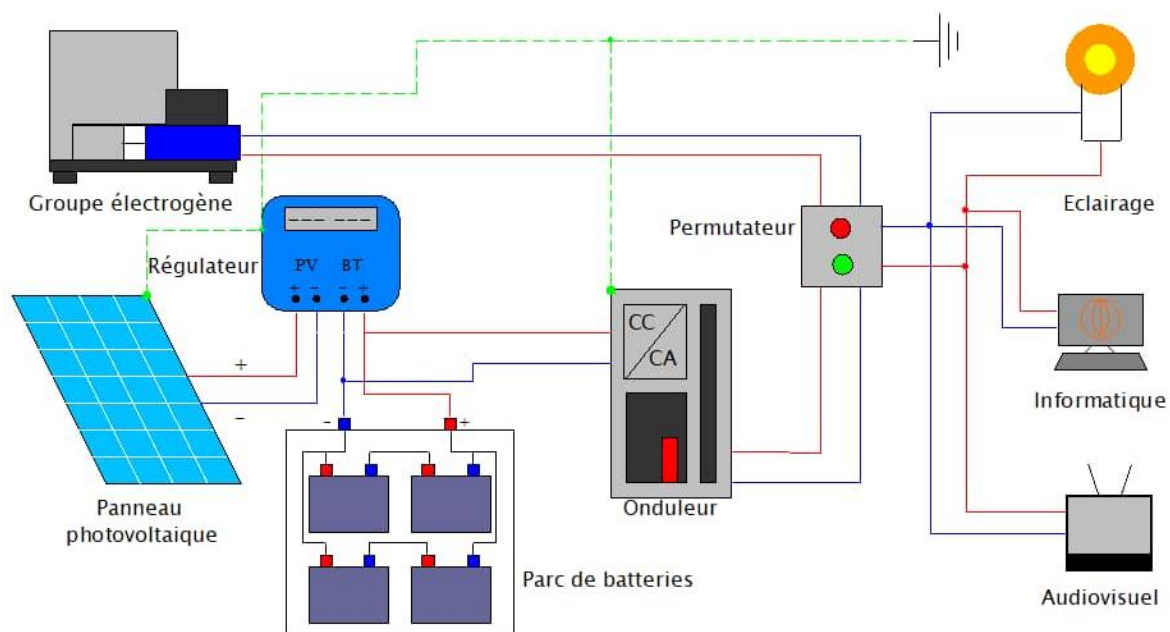


Figure 13 : Système solaire PV hybride

2.3.3. Applications spécifiques des systèmes solaires photovoltaïques : pompage solaire, applications agricoles, éclairage solaire, application routière, etc.

➤ Les systèmes solaires au niveau des Ménages

Les **systèmes solaires domestiques** (SHS) servent à alimenter l'éclairage, les appareils électriques de divertissement et d'information (radio, télévision, radiocassettes, etc.), et dans une moindre mesure, les appareils de production ou d'amélioration de l'environnement tels que les ventilateurs, les machines à coudre, les fers à souder, les tondeuses, etc.

➤ Système de pompage solaire

Un système de pompage solaire est un dispositif qui utilise l'énergie solaire pour alimenter une pompe et fournir de l'eau ou d'autres liquides à partir d'une source, comme un puits ou un réservoir, vers un point d'utilisation ou de stockage. Ces systèmes sont largement utilisés dans les zones rurales ou éloignées où l'accès à l'électricité conventionnelle est limité ou inexistant, offrant ainsi une solution durable et économique pour l'approvisionnement en eau pour la communauté.

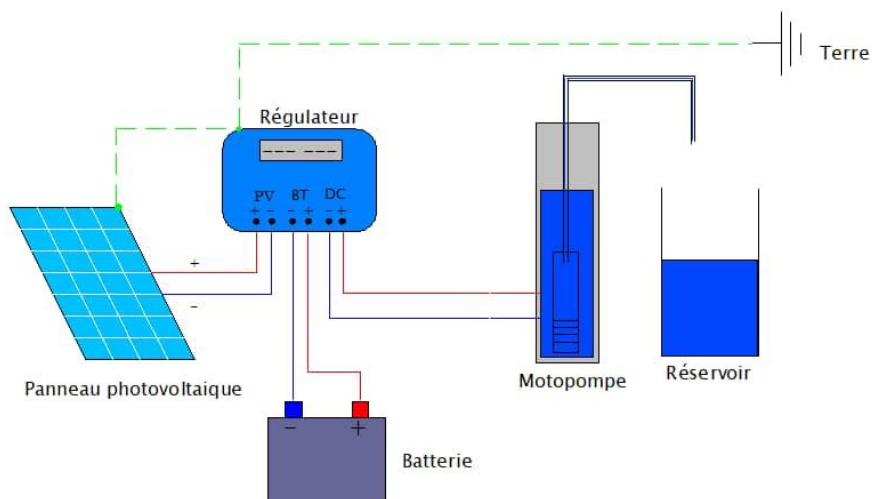


Figure 14 : Schéma d'un Système de pompage solaire



Photo 7 : Système de pompage solaire, Tori – bénin

➤ Application agricole

Dans le domaine agricole, le système solaire photovoltaïque est utilisé pour l'irrigation des cultures. Il permet de pomper l'eau des puits ou des sources pour arroser les cultures de manière durable et économique. Il utilise des panneaux solaires PV, une pompe solaire, et en option, des batteries solaires.



Photo 8 : Irrigation solaire en installation Tori – Bénin



Photo 9 : Irrigation solaire dans un champ

Les systèmes solaires photovoltaïques peuvent également fournir une alimentation électrique fiable aux bâtiments agricoles

➤ Les lampadaires solaires

Un lampadaire solaire est un dispositif d'éclairage extérieur autonome qui fonctionne grâce à un système solaire photovoltaïque. Utile à la communauté, il permet d'améliorer la visibilité et la sécurité dans les espaces extérieurs la nuit en éclairant les zones sombres. Il est équipé d'un panneau solaire photovoltaïque, d'une batterie, d'un régulateur et d'une lampe LED d'une grande capacité d'éclairage.



Photo 10 : Lampadaire solaire à un bras, Tori – Bénin



Photo 11 : Lampadaire solaire à deux bras, Tori – Bénin

➤ Applications dans le domaine de la santé

Les systèmes solaires trouvent de nombreuses applications dans le domaine de la santé, en particulier dans les régions reculées ou mal desservies par l'électricité conventionnelle. En plus de fournir une alimentation électrique fiable et continue aux centres de santé éloignés du réseau électrique, pour le fonctionnement des équipements médicaux, des ordinateurs, de la communication et de l'éclairage, les systèmes solaires ont des applications spécifiques dans le domaine de la santé :

- a) Réfrigération pour les vaccins : Les réfrigérateurs solaires, alimentés par l'énergie solaire, peuvent être utilisés pour maintenir la chaîne du froid dans les centres de santé et les postes de vaccination, assurant ainsi la conservation et l'efficacité des vaccins.
- b) Équipements médicaux : Dans les zones éloignées, les systèmes solaires peuvent alimenter des équipements médicaux essentiels tels que les échographes, les électrocardiographes (ECG), les machines à rayons X portables, les stérilisateurs, etc.
- c) Eau potable : Les systèmes solaires peuvent être utilisés pour alimenter les pompes à eau solaires, permettant ainsi d'accéder à de l'eau potable propre et sûre dans les établissements de santé et les communautés rurales. L'eau potable est essentielle pour l'hygiène, la préparation des médicaments et les soins aux patients.

L'utilisation de l'énergie solaire dans le domaine de la santé présente de nombreux avantages, notamment l'amélioration de l'accès aux soins de santé de base, la réduction des coûts énergétiques, l'augmentation de l'efficacité des services médicaux et l'amélioration des conditions de travail pour le personnel de santé. Cela contribue également à renforcer la résilience des systèmes de santé dans les régions éloignées ou vulnérables aux coupures de courant et aux infrastructures énergétiques instables.



Photo 12 : Réfrigérateur solaire

➤ Application dans le domaine des Télécommunications

L'énergie solaire sert à alimenter les infrastructures qui constituent l'épine dorsale des services de communication. Les fournisseurs de service utilisent l'énergie solaire pour relayer les messages par le biais des tours de répéteurs au lieu de créer des liaisons filaires direct.

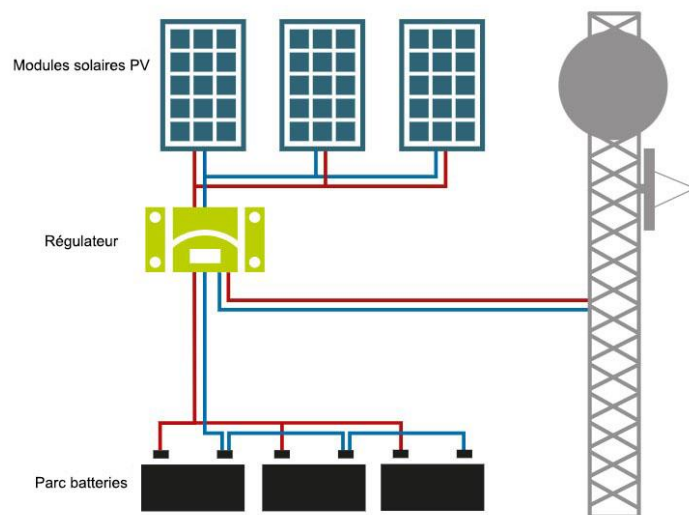


Figure 15 : Système solaire utilisé dans le domaine de la télécommunication

Source : <https://www.phaesun.com/fr/portfolio/systemes-et-projets/competences/applications-industrielles/systemes-de-telecommunications.html>

➤ Application dans le domaine routier

En plus des lampadaires solaires utilisés pour l'éclairage des routes, le système solaire est utilisé pour la signalisation. On rencontre des feux tricolores solaires, des radars solaires pour le contrôle de la vitesse des véhicules, des balises solaires de navigation, les signaux de chemin de fer, les caméras de surveillance routières.

On rencontre également des stationnement solaire qui sont des ombrières solaires installées dans les parkings le long des routes pour fournir de l'ombre aux véhicules tout en produisant de l'électricité solaire.

Avec les avancées dans le domaine routier, notamment l'avènement des véhicules électriques, on rencontre des postes de Recharges pour véhicules électriques. Ce sont des aires de recharge solaires installées le long des routes pour permettre aux véhicules électriques de se recharger en utilisant l'énergie solaire, contribuant ainsi à promouvoir la mobilité électrique et à réduire les émissions de carbone.



Photo 13 : Feu tricolore, Cotonou - Bénin



Photo 14 : Radar solaire

Références bibliographiques

Dr. Ing Ahmed o BAGRE, Base de l'énergie solaire photovoltaïque, 18p

Dr. Ing Ahmed o BAGRE, Gisement solaire, 31p

Dr. Ing Ahmed O. BAGRE, Les bases du photovoltaïque, 2022, 45p

ERM Énergies, Guide d'installation de système d'alimentation électrique pour site isolé, 2019, 35p.

Guide Pratique d'installation des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique national, PROSOL ELEC, 128p.

Le manuel du technicien photovoltaïque, PERACOD, 2011, 88p.

Les bases de l'énergie solaire photovoltaïque, programme de formation et de certification en énergie renouvelable solaire au profit du secteur électrique ouest africain, décembre 2021

Manuel à l'usage des formateurs de systèmes solaires domestiques - Alliance Soleil – ETC Energy/TTP, Janvier 2006, 228p.

Manuel de formation pour l'Installation et la Maintenance de petits systèmes photovoltaïques, FUNDACION ICAI - SUNEDISON, 104p.

Raymond Bonhomme, Les rayonnements solaires et le fonctionnement du couvert végétal, Institut national de la recherche agronomique, Unité de recherches en bioclimatologie, Thiverval-Grignon, France, 94p

Pierre Teisseire, Petit Guide pour étudier un projet d'installation photovoltaïque, Centre de formation Bwa Toma – Acded Marigot – Haïti, Novembre 2003

Prof. Mamadou Lamine NDIAYE, MODULE 3: CONCEPTION DES SYSTÈMES SOLAIRES PV, Projet Amélioration de la Gouvernance du Secteur des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique en Afrique de l'Ouest (AGoSEREE-AO), 26p.

URBIS FOUNDATION, « Manuel de formation en énergie solaire photovoltaïque au Togo », Urbis Foundation - Stiftung für Umwelt und internationale Solidarität (urbis foundation.de), 2014, 71p.

Webographie

<http://www.da-engineering.com/mooc/lecon-1-pv/>

https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/#Le_mouvement_Terre-Soleil



www.ifdd.francophonie.org
www.francophonie.org