

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
ENP D'ORAN – MAURICE AUDIN

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

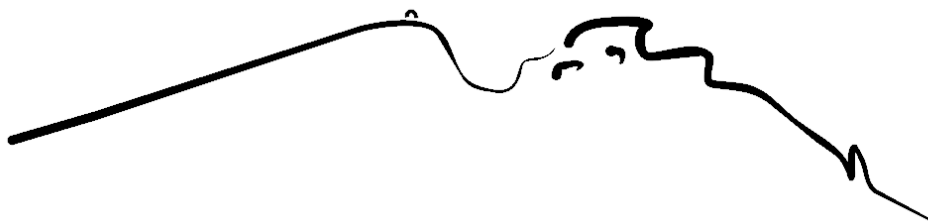


SUPPORT DE COURS N° 5

Formation d'Ingénieurs

« ÉNERGIE SOLAIRE »

- CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES -



Enseignant : Dr. SID ALI LITIM

I. Introduction

L'énergie solaire fait partie de ces énergies renouvelables et propres qui pourraient devenir une alternative aux sources combustibles fossiles (charbon, pétrole). En tant que source d'énergie, l'ensoleillement est un facteur climatique dont on a intérêt à tirer parti (de manière passive, via les ouvertures vitrées, et/ou de manière active pour produire de l'énergie) mais dont on doit aussi parfois se protéger pour éviter les surchauffes en été. La maîtrise de l'énergie solaire nécessite donc de connaître la position correcte du soleil (hauteur et azimut) ainsi que l'intensité du rayonnement à tout moment.

I.1. Source de l'énergie solaire (le soleil)

Le soleil est un réacteur à fusion nucléaire qui fonctionne depuis 5 milliards d'années. Par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, il émet ainsi d'énormes quantités d'énergie dans l'espace (sa puissance est estimée à 63 500 kW/m²). Ces radiations s'échappent dans toutes les directions et voyagent à travers l'espace à la vitesse constante de 300 000 km à la seconde, dénommée vitesse de la lumière.

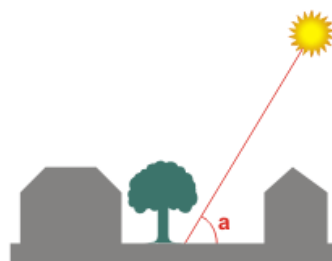
Après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres, l'irradiation solaire arrive à l'extérieur de l'atmosphère de la Terre avec une puissance d'environ 1 367 W/m². C'est ce qu'on appelle la constante solaire. La Terre, une petite boule comparée au Soleil, intercepte une si faible partie de l'énergie radiante du soleil que les rayons du soleil ainsi stoppés paraissent constituer un faisceau parallèle.

I.2. Aperçu sur le mouvement apparent du Soleil

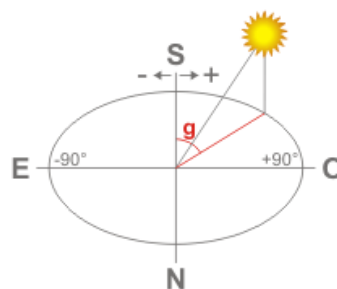
Pour bien comprendre et utiliser l'influence du Soleil dans le choix et le traitement d'un site, il faut bien sûr connaître à tout instant la position du Soleil dans le ciel. Cette information est indispensable pour le calcul des apports solaires, pour le choix de l'exposition d'un immeuble, l'implantation de systèmes actifs solaires (thermique ou photovoltaïque), l'aménagement des parties extérieures voisines, l'éclairage naturel des pièces intérieures, l'emplacement des fenêtres, des protections solaires et de la végétation, etc.

À un instant donné, la hauteur et l'azimut du Soleil déterminent la position du Soleil dans le ciel. Ainsi est connue la direction du rayonnement solaire et peuvent être calculées les surfaces ensoleillées du bâtiment. Ces calculs tiendront compte des effets d'ombrage dus au relief, au cadre bâti, à la végétation ou au bâtiment lui-même. En un lieu, la hauteur « α » du Soleil est l'angle que fait la direction du Soleil avec le plan horizontal. Elle se compte de 0° à 90° à partir de l'horizon vers la voûte céleste.

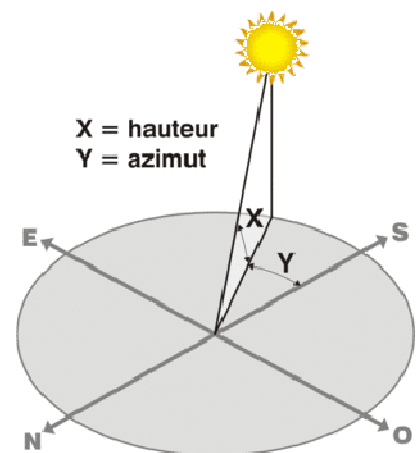
L'azimut « γ » du Soleil est l'angle créé entre le plan vertical passant à la fois par le Soleil et par le lieu considéré, et le plan vertical N-S. Cet angle vaut 0° au sud et est conventionnellement positif vers l'ouest et négatif vers l'est.



Hauteur du soleil



Azimut du soleil



X = hauteur
Y = azimut

Pour plus de clarté, on représente généralement la course solaire par un diagramme en coordonnées rectangulaires.

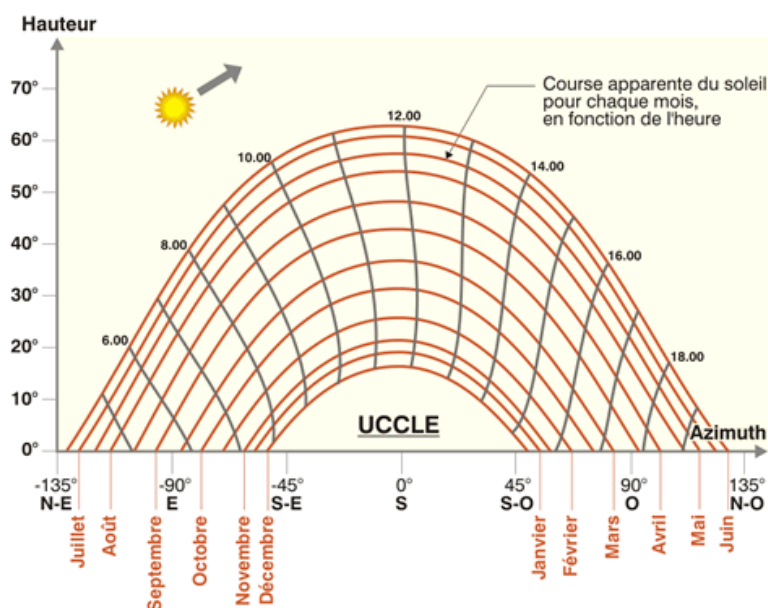


Figure 1. Diagramme solaire cylindrique pour Uccle en temps universel [1].

En regardant plus précisément, la valeur de l'azimut à différents moments de l'année, on constate que l'expression "le Soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest" n'est pas exacte. En effet, en décembre, il se lève au sud-est pour se coucher au sud-ouest, tandis qu'en juin, il se lève pratiquement au nord-est pour se coucher au nord-ouest. Ceci donne 7 heures d'ensoleillement maximum en décembre et plus de 16 heures en juin : ce sont les deux époques des solstices de l'année. Ce n'est qu'aux équinoxes de printemps et d'automne que la durée du jour est égale à celle de la nuit. Quant à la hauteur du Soleil, elle atteint un maximum de 62° le 21 juin à 12 heure (heure universelle), alors que le 21 décembre à 12 h (heure universelle), elle n'atteint que 16°. Les graphes et tableaux qui suivent donnent la hauteur et l'azimut du Soleil à Uccle, en fonction du temps universel, pour les mois de juin et décembre.

Tableau 1. Valeur de l'azimut et de la hauteur du soleil durant les mois de Juin et de Décembre [1]

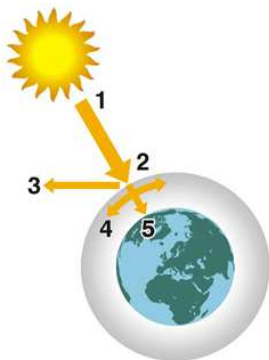
	Temps universel	Soleil : hauteur degré	Soleil : azimut degré
<p>15 Juin</p>	4	3,1	- 124,0
	5	11,4	- 112,9
	6	20,4	- 102,1
	7	29,9	- 90,9
	8	39,3	- 78,7
	9	48,3	- 64,1
	10	56,0	- 45,5
	11	61,2	- 20,7
	12	62,3	8,6
	13	58,7	35,8
	14	51,8	56,9
	15	43,2	72,9
	16	33,9	85,9
	17	24,4	97,4
	18	15,2	108,3
	19	6,5	119,2

15 Décembre	Temps universel	Soleil : hauteur degré	Soleil : azimut degré
	8	1,9	- 48,3
	9	8,3	- 36,1
	10	12,9	- 22,9
	11	15,5	- 8,9
	12	15,8	5,4
	13	13,8	19,5
	14	9,6	32,9
	15	3,6	45,4

II. Rayonnements direct, diffus et réfléchi

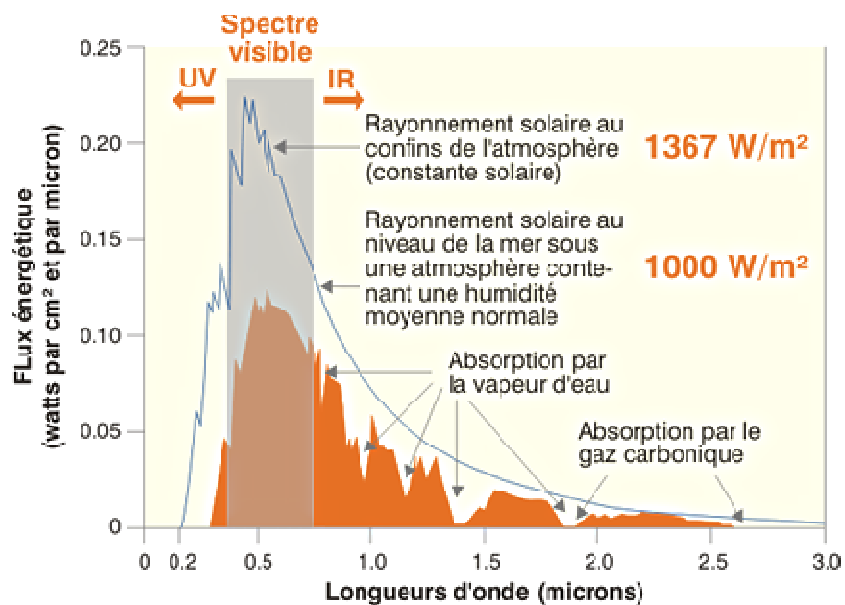
Avec sa température d'émission de 5 500°C, le soleil rayonne la plus grande partie de son énergie dans les hautes fréquences (courtes longueurs d'onde).

La lumière visible représente 46 % de l'énergie totale émise par le soleil. 49 % du rayonnement énergétique émis par le soleil se situe au-delà du rouge visible, dans l'infrarouge. C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une onde de chaleur. Le reste du rayonnement solaire, l'ultraviolet, représente l'ensemble des radiations de longueur d'onde inférieure à celle de l'extrémité violette du spectre visible.

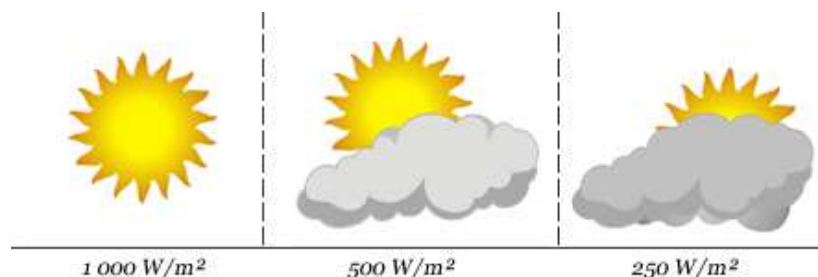


1. Puissance émise par le soleil : 63 500 kW/m².
2. Constante solaire : 1 370 W/m².
3. Rayonnement réfléchi.
4. Rayonnement absorbé et diffusé.
5. Rayonnement solaire à la surface de la Terre (max : 1 000 W/m²).

Au moins 35 % du rayonnement solaire intercepté par la Terre et son atmosphère sont réfléchis vers l'espace. Une partie du rayonnement qui atteint la Terre a été diffusée dans toutes les directions au cours de la traversée de l'atmosphère, en rencontrant des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière (c'est ce rayonnement diffus, appartenant notamment à la frange bleue du spectre visible qui est responsable de la couleur bleue du ciel clair). D'autre part, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone de l'atmosphère absorbent 10 à 15 % du rayonnement solaire. Le reste du rayonnement atteint directement la surface.



Outre la composition de l'atmosphère, le facteur le plus important pour évaluer la quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre est l'épaisseur d'atmosphère que le rayonnement doit traverser. Le rayonnement solaire reçu sur une surface varie donc au cours du temps en fonction de la position du Soleil et de la couverture nuageuse. La puissance solaire maximale à la surface de la Terre est d'environ 1 000 W/m² pour une surface perpendiculaire aux rayons.



II.1. Irradiation solaire incidente

L'irradiation solaire est l'exposition d'un corps à un flux de rayonnements en provenance du soleil. En météorologie, l'insolation ou ensoleillement désigne la quantité d'énergie reçue du soleil en un lieu.

En général, l'angle que font les rayons du Soleil avec une surface détermine la **densité énergétique** que reçoit cette surface. Puisque le rayonnement solaire arrive sur la Terre sous forme d'un faisceau parallèle, une surface perpendiculaire à ces rayons intercepte la densité maximale d'énergie. Et si l'on incline la surface à partir de cette position perpendiculaire, son éclaircissement diminue.

Le meilleur moyen de représenter ce phénomène consiste peut-être à figurer les rayons parallèles du Soleil par une poignée de crayons tenus dans la main au-dessus d'une feuille de papier, pointes en bas. Les marques faites par les pointes représentent des grains d'énergie. Lorsque les crayons sont perpendiculaires à la feuille, les pointes sont serrées au maximum : la densité d'énergie par unité de surface est la plus grande. Lorsqu'on incline ensemble tous ces crayons parallèles, les pointes s'écartent et couvrent des surfaces de plus en plus allongées : la densité d'énergie diminue avec l'étalement des traces.

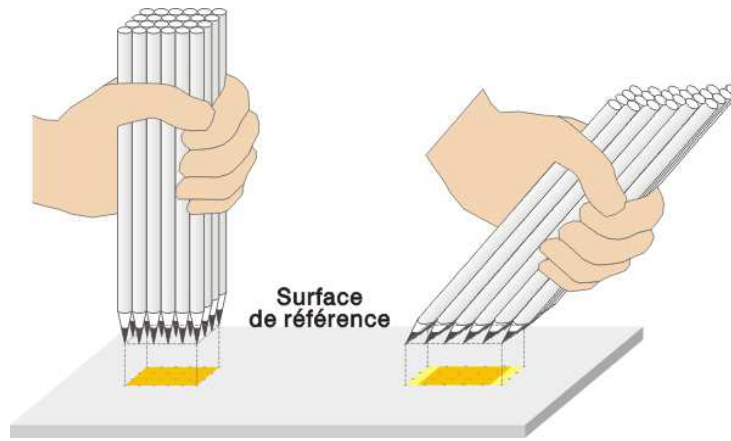


Figure 4. Exemple de poignée de crayons pour représenter la densité d'énergie solaire

Cependant, une surface qui s'écarte de 25 % de cette position perpendiculaire au Soleil, intercepte encore plus de 90 % du rayonnement direct maximum. L'angle que font les rayons du Soleil avec la normale à la surface (angle d'incidence) déterminera le pourcentage de lumière directe interceptée par la surface. Le tableau ci-dessous donne les pourcentages de lumière interceptée par une surface pour différents angles d'incidence.

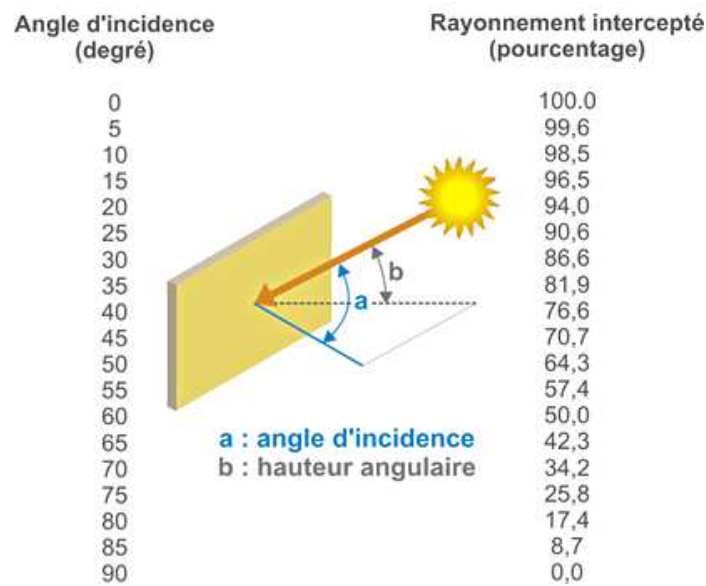


Figure 5. Pourcentage du rayonnement intercepté par une paroi en fonction de l'angle d'incidence

En réalité, le rayonnement total reçu sur une surface, appelé irradiation solaire incidente (ou encore éclairage énergétique global), est défini par la somme de trois composantes :

II.1.1. L'irradiation directe :provenant directement du Soleil. Cette composante s'annule si le Soleil est caché par des nuages ou par un obstacle.

II.1.2. L'irradiation diffuse :correspondant au rayonnement reçu de la voûte céleste, hors rayonnement direct. Cette énergie diffusée par l'atmosphère et dirigée vers la surface de la Terre, peut atteindre 50 % du rayonnement global reçu, lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, et 100 % pour un ciel entièrement couvert.

II.1.3. L'irradiation réfléchi :correspondant au rayonnement réfléchi par l'environnement extérieur, en particulier le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé "albedo".

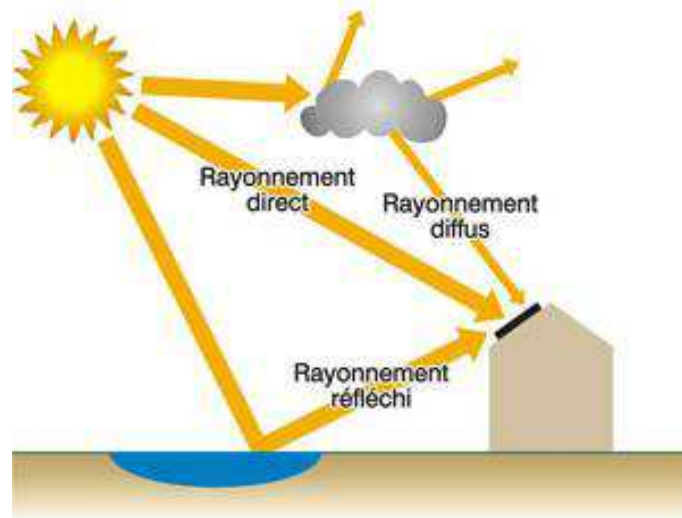


Figure 6. Types d'irradiation solaire incidente [2]

En particulier, on définit aussi **l'irradiation hémisphérique** comme l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale (la composante réfléchi par le sol est nulle dans ce cas).

II.2. Les obstacles à l'ensoleillement

Des masques solaires peuvent être occasionnés par le relief, la végétation existante, les bâtiments voisins, ou encore par des dispositifs architecturaux liés au bâtiment lui-même.

Les constructions constituent des écrans fixes pour leur voisinage. Leur rôle peut être positif si l'on recherche une protection contre le Soleil : c'est le cas des villes méditerranéennes traditionnelles, où l'étroitesse des ruelles et la hauteur des bâtiments réduisent considérablement le rayonnement direct et fournissent un ombrage bienvenu.

Par contre, ce rôle peut être négatif si les bâtiments voisins masquent le Soleil alors qu'on souhaite bénéficier d'apports solaires. En effet sous notre climat, durant les mois d'hiver, environ 90 % des apports solaires interviennent entre 9 h et 15 h solaire. Tous les masques de l'environnement (immeubles ou grands arbres, qui interceptent le Soleil pendant ces heures) gêneront grandement l'utilisation des gains solaires.

Dans le cas d'une conception solaire passive, il importera donc de mesurer l'impact de cet effet de masquage. Pour ce faire, on représentera sur un diagramme cylindrique ou stéréographique (*figure ci-dessous*) les courbes de la *course solaire* annuelle et la silhouette des bâtiments voisins. On repèrera ainsi facilement les périodes où l'ensoleillement est disponible et on pourra calculer les facteurs de réduction des gains solaires.

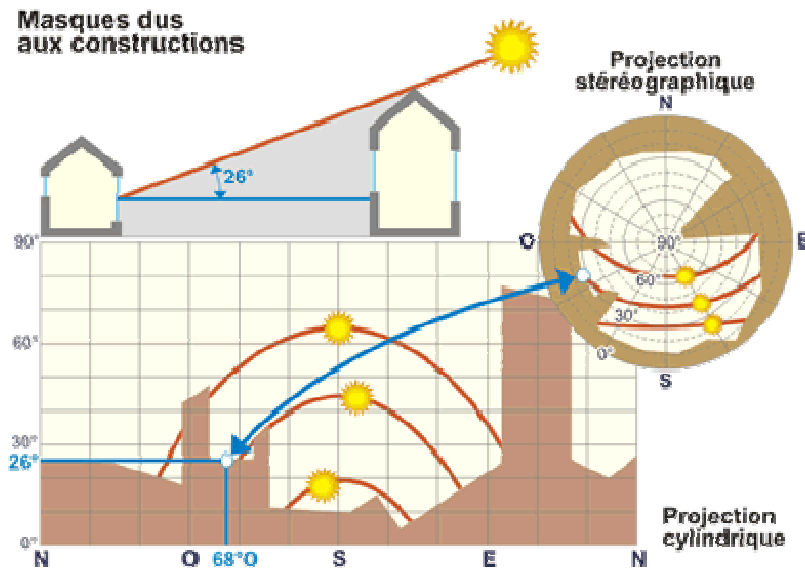


Figure 7. Diagramme cylindrique et stéréographique de la courbe solaire [1] & [2].

III. Types d'énergies solaires

Jusqu'à présent, deux grandes technologies ont été identifiées pour en tirer le meilleur profit de l'énergie solaire :

III.1. Énergie solaire thermique

Le solaire thermique actif permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre de capteurs solaires. Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire par exemple ou encore le chauffage des habitations.

Un panneau solaire thermique a pour but de transmettre la chaleur à un circuit d'eau secondaire. Les rayons du Soleil traversent ainsi la vitre, à l'intérieur d'une plaque dite absorbante qui a pour but de capter les rayons infrarouges. Derrière cette plaque chaude passe un circuit d'eau qui récupère cette chaleur. Par la suite ce circuit alimente un circuit secondaire qui peut alimenter une habitation en eau chaude.

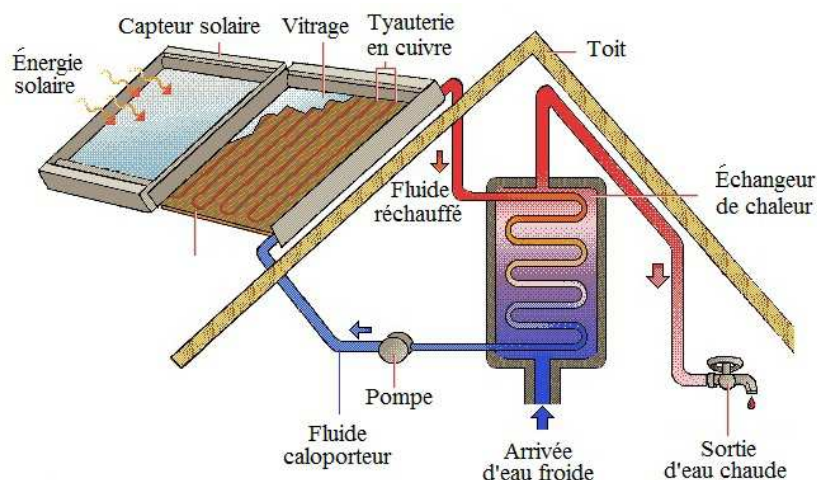


Figure 8. Panneau solaire thermique.

Il existe un autre type d'énergie solaire passive. Afin de profiter "passivement" de la chaleur et de la lumière du soleil, il faut aménager les bâtiments en fonction des apports solaires. Le principe du chauffage solaire passif est assuré par des ouvertures vitrées adéquates orientées vers le soleil et une isolation convenable pour éviter les risques de déperditions calorifique. Il faut aussi stocker la chaleur afin de continuer à chauffer le bâtiment lorsque le soleil ne brille plus et la rediriger vers les zones qui n'en bénéficient pas grâce à la thermo circulation (mouvement naturel de l'air chaud qui monte) ou des ventilateurs.

En milieu tempéré, il faut s'assurer que le logement est bien exposé plein sud. De plus, les vitrages doivent être conçus pour capter au maximum le soleil l'hiver, sans surchauffer la maison l'été. D'où l'obligation de mettre des avancées de toit ou pare-soleil. La chaleur est stockée dans les murs.

III.2. Énergie solaire photovoltaïque

L'hélio électricité traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle utilise des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles pour réaliser cette transformation.

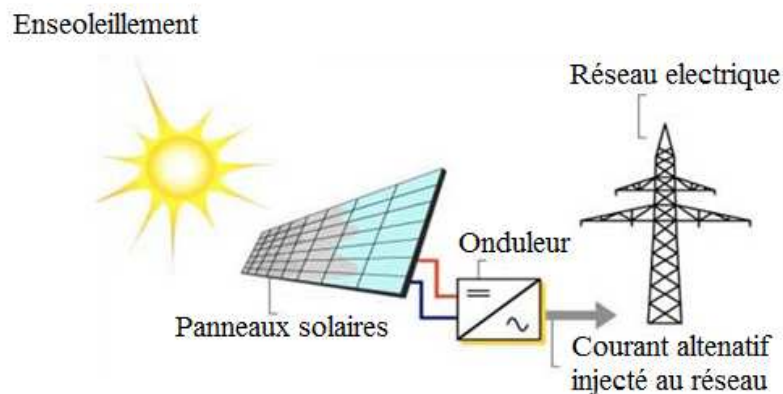


Figure 9. Transformation de l'énergie lumineuse en énergie photovoltaïque [3].

Le terme photovoltaïque a été formé des mots « photo » qui veut dire lumière et « Volta » relatif au célèbre physicien Italien. Le photovoltaïque s'avère être un moyen efficace qui permet de transformer directement une partie du rayonnement solaire en électricité.

Un bon rendement de la cellule photovoltaïque dépend de l'intensité d'ensoleillement. Il dépend aussi de l'angle d'exposition au Soleil, puisqu'une orientation en plein sud perpendiculaire au Soleil de midi est idéale. Le rendement dépend aussi de la puissance du panneau solaire exprimée en Watt crête (Wc). Le rendement optimum est défini par un éclairement énergétique de 1000 W/m², une température de 25°C du semi-conducteur, et des rayons solaires perpendiculaires. De ce fait le rendement maximal n'excède pas les 15%. Suivant ce principe l'énergie solaire photovoltaïque est utilisé majoritairement dans de domaine de production d'électricité [3].

III.2.1. Historique de l'énergie photovoltaïque

L'essor de chaque civilisation s'est fait par la maîtrise des énergies. Depuis toujours, l'Homme a essayé d'appivoiser cette énergie. Ainsi lors de la révolution du néolithique, le fait de capter l'énergie solaire a permis la maîtrise de l'agriculture. Les sociétés ont ensuite exploité cette énergie de diverses façons. En 214 avant J.C, Archimède, grâce à des réflecteurs solaires, parvint à incendier les vaisseaux Romains. Il ya plus de deux mille ans les Romains utilisaient l'énergie du Soleil pour chauffer leurs maisons.

En 1774, Lavoisier conçut un four solaire qui lui permit d'atteindre 1 755°C. En 1872, on construisit au Chili un énorme distillateur solaire de 5 000 m² permettant de produire 20 000 litres d'eau douce par jour.

L'énergie solaire photovoltaïque fut découverte en 1839 par Antoine César Becquerel physicien Français, né à Chatillon-Coligny (Loiret) le 7 mars 1788 et mort à Paris le 18 janvier 1878. Le terme photovoltaïque vient du grec " phos, photos " qui désigne la lumière et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité puisqu'il inventa la première pile électrochimique en 1800. Becquerel avança comme théorie que l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

Enfin, en 1878, Mouchot créa une machine solaire à vapeur qui servit à actionner l'imprimerie de l'Exposition Universelle.

Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et est même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. Des événements tels que les courses de véhicules solaires offrant une image de haute technologie futuriste et écologique y ont également contribué.

L'évolution de la technologie et du marché photovoltaïques est globalement positive. L'amélioration des méthodes de fabrication ainsi que l'augmentation des volumes de production ont permis de réduire les coûts. La production mondiale de modules photovoltaïques est passée de 5 Mégawatts-crête (MWc) en 1982 à 60 MWc en 1992.

Actuellement, 90% de la production totale de modules se fait au Japon, aux EU et en Europe, avec en particulier des grandes compagnies comme Siemens, Sanyo, Kyocera, Solarex et BP Solar, qui détiennent 50% du marché mondial. Le solde de 10% de la production est fourni par le Brésil, l'Inde et la Chine qui sont les principaux producteurs de modules dans les pays en voie de développement.

III.2.2. Exploitation de l'énergie solaire dans le monde

En 2013, le solaire a représenté 2,84 % de la production mondiale d'électricité d'origine renouvelable.

III.2.2.1. Les principaux producteurs

Bien que le soleil soit un élément à la portée de la majorité des pays de la planète, l'énergie solaire est surtout développée dans les pays industrialisés. Le marché mondial de cellules et de panneaux photovoltaïques est dominé par une poignée de pays (Chine, Taïwan, Japon, Malaisie, Allemagne, États-Unis). La société chinoise Suntech Power est devenue en 2009 le premier producteur mondial de panneaux photovoltaïques. Sharp (Japon), JA Solar (Chine) et First Solar (Malaisie) sont d'autres grands noms de ce secteur (auquel il convenait notamment d'ajouter, jusqu'à 2012, l'entreprise allemande Q-Cells qui a déposé le bilan cette année-là). L'Allemagne est de loin le 1^{er} producteur mondial.

Tableau 2. Principaux producteurs d'électricité solaire dans le monde par pays et par zone en 2013 (EDF) [4]

Par pays, en TWh, en 2013 (International Energy Agency Statistics)			Par zone géographique en TWh, en 2013 (International Energy Agency Statistics)	
Allemagne	31,0	21,5 %	Europe	59,4 %
Italie	21,6	14,9 %	Asie et Océanie (1)	28,4 %
États-Unis	15,7	10,8 %	Amérique du Nord	11,2 %
Chine	15,5	10,7 %	Eurasie (2)	0,4 %
Japon	14,3	9,9 %	Afrique	0,4 %
Espagne	12,7	8,8 %	Amérique Centre et Sud	0,3 %
France	4,7	3,2 %		
Australie	3,8	2,6 %		
Grèce	3,6	2,5 %		
Inde	3,4	2,4 %		

(1) dont Moyen-Orient
(2) Arménie, Azerbaïdjan, Biélorussie, Géorgie, Kazakhstan, Kirghizstan, Moldavie, Ouzbékistan, Russie, Tadjikistan, Turkménistan et Ukraine

III.2.2.2. Énergie solaire dans la production d'électricité mondiale

La production mondiale d'électricité en 2013 a représenté un total de 23 405,7 TWh dont la majeure partie est issue du thermique à flamme essentiellement du fait du développement industriel de pays tels que la Chine qui dispose de grandes réserves de charbon. Les autres énergies renouvelables, dans lesquelles se trouve le solaire, représentent une faible partie de la production d'électricité.

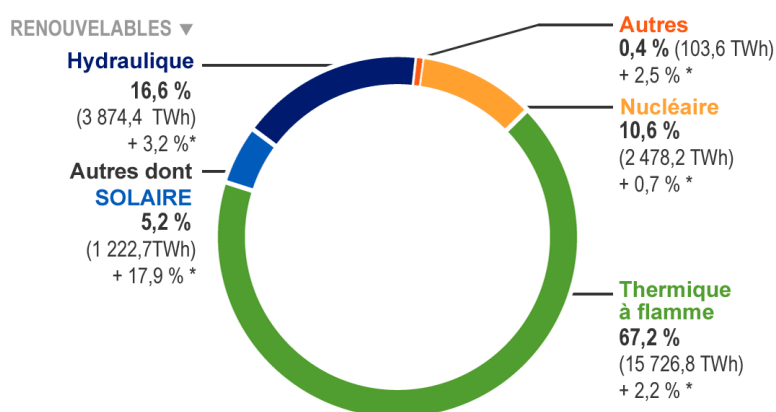


Figure 10. Part du solaire dans la production mondiale d'électricité en 2013 [4]

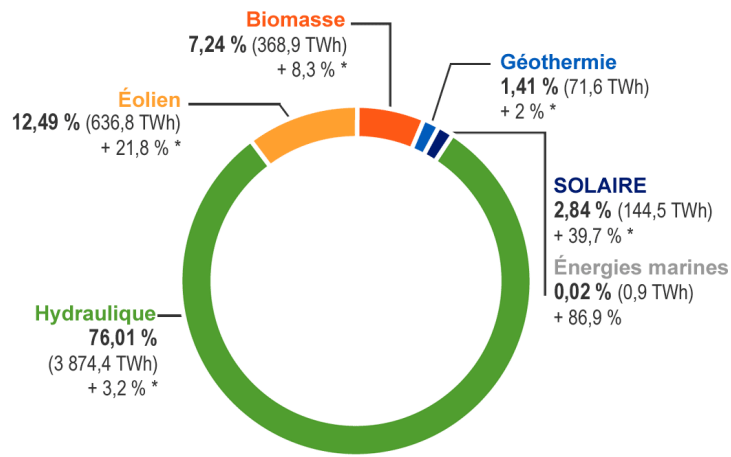


Figure 11. Part du solaire dans la production mondiale d'électricité d'origine renouvelable en 2013 par rapport à 2012 [4].

Parmi les Énergies Renouvelables, la part de l'énergie solaire demeure encore assez faible même si elle a progressé de près de 10% en 1 an.

III.2.2.3. Endroits prioritaires pour l'exploitation du rayonnement solaire dans le monde

La figure qui suit représente la répartition de la température moyenne sur la surface de la terre.

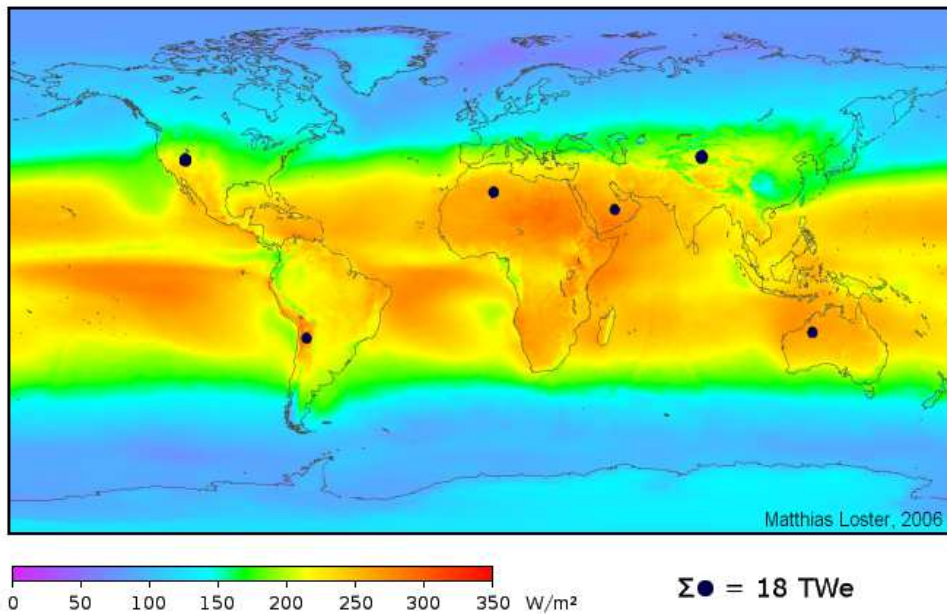


Figure 12. Température moyenne annuelle de la surface terrestre [5].



Les couleurs indiquent le rayonnement solaire, en moyenne, des années 1991 à 1993 (24 heures/jour), sur la base des données des satellites météorologiques. Le rayonnement dans les régions sous les points foncés peut fournir toute la consommation d'énergie pour le monde entier si ces régions étaient couvertes de panneaux solaires d'une efficacité de 8 %.

III.2.3. Exemples d'applications courantes des cellules photovoltaïques



Avant d'introduire la théorie, voyons ensemble quelles applications sont possibles, les plus répandues et celles qui émergent le plus dans la vie courante.

		
<p>Borne solaire de balisage</p>	<p>Lampadaire solaire</p>	<p>Horodateur solaire</p>


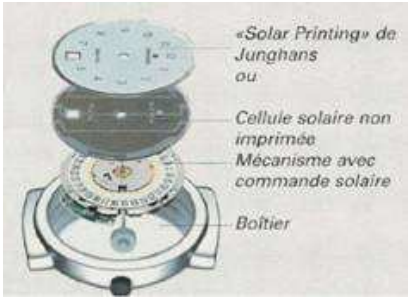
- Installations isolées où le réseau ne peut aller :

	
<p>Chalet en montagne</p>	<p>Plateforme pétrolière</p>

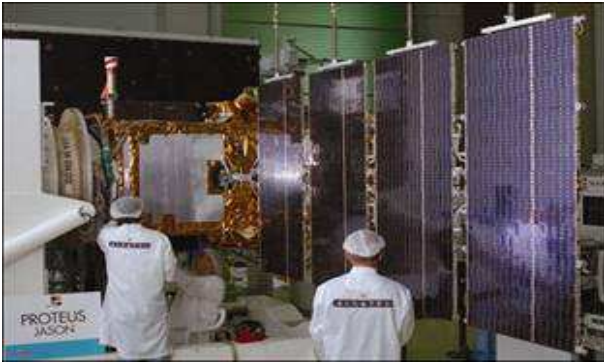

- Installations délibérément solaires dues aux conditions climatiques favorables ou coût inférieur au réseau ou volonté de protéger l'environnement, développement durable:

	
<p>Circuit eau indépendant technologie : solaire thermique</p>	<p>Voiture Solaire Technologie: solaire photovoltaïque</p>

- Applications de faible puissance :

	
<p>Calculatrices fonctionnant avec énergie solaire</p>	<p>Montres Bionic Solar (Junghans) Réserve d'énergie pendant plus de 2 mois</p>

- Applications spatiales :

	
<p>Création du satellite</p>	<p>Satellite en orbite</p>

III.2.4. Les panneaux photovoltaïques

Cette section présente l'ensemble de la théorie sur les panneaux photovoltaïques.

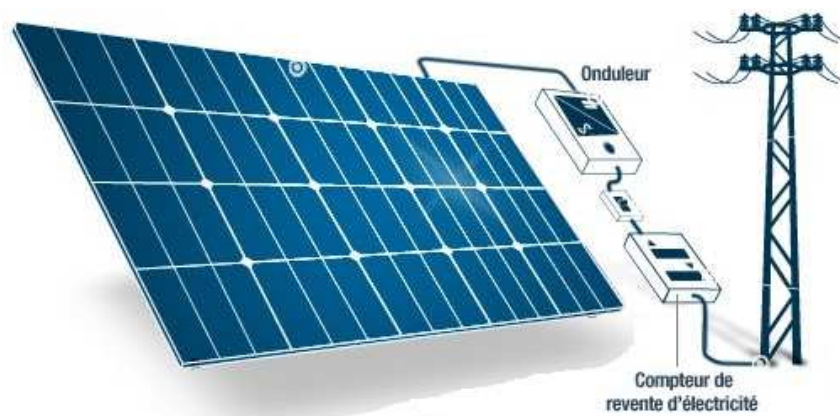


Figure 13. Panneau photovoltaïque

III.2.5. Système photovoltaïque

Parmi les moyens d'exploitation du gisement solaire, nous citons la transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque. Le terme « photopile » est très souvent utilisé pour désigner la cellule photovoltaïque (PV). Il faut cependant noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans une cellule, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme. Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule sous obscurité totale va se comporter comme un composant passif.

De plus, la cellule solaire ne peut être assimilée à aucun autre générateur classique d'énergie électrique de type continu. Ceci est dû au fait qu'elle n'est ni une source de tension constante ni une source de courant constant. Actuellement, le rendement de conversion d'énergie solaire en énergie électrique est encore faible (souvent inférieur à 12 %). Sous un ensoleillement nominal de 1000 W/m^2 , 12 m^2 de panneaux PV sont nécessaires pour fournir 1 kWc, ce qui induit un coût élevé du **watt crête**.

***La puissance-crête (watt crête) :** c'est la puissance maximum obtenue par un panneau solaire d'un mètre carré dans les meilleures conditions possibles.*

La puissance « crête » d'une installation photovoltaïque (exprimée en Wc) est la puissance maximale (capteurs bien orientés, bien inclinés, sans ombrage) qu'elle peut produire sous un ensoleillement donné. Cette unité a trois utilisations principales :

- la comparaison du rendement des matériaux photovoltaïques, dans les mêmes conditions ;
- la qualification de la taille d'une installation, indépendamment de ses conditions d'ensoleillement ;
- la comparaison des gisements solaires et de leur production électrique.

Exemple :

Les panneaux solaires produisent de l'énergie, donc des Wh ou kWh. Mais ils produisent en fonction de l'ensoleillement : pas beaucoup les jours de pluie et rien du tout la nuit.

Prenons un panneau d'un mètre carré, éclairons-le avec une puissance de 1000 W en plein dessus. Mesurons combien il produit d'électricité : on trouve 140 W. (Bigre, il s'en est perdu pas mal ! Nous avons là un rendement de $140/1000 = 14\%$. Pas énorme, mais pour un panneau solaire, c'est bien, techniquement parlant, et l'éclairage solaire est gratuit.).

Ces 140 W donc, c'est le maximum que le panneau peut produire, car on a bien fait attention à lui mettre la lumière en plein dessus. Cette puissance maximum obtenue dans les meilleures conditions possibles s'appelle la puissance-crête.

Les panneaux font rarement 1 m^2 , leurs dimensions ne tombent jamais rond.

Ex : $1,63 \times 0,87 = 1,42 \text{ m}^2$.

Ce panneau a un rendement de 14%, il produit 140 W par m^2 , soit $1,42 \times 140 = 198,8 \text{ Wc}$

Une installation qui compte 15 de ces panneaux aura une puissance de $198,8 \times 15 = 2982 \text{ Wc}$ (2,982 kWc)

Le soleil, lui sera très rarement en plein dessus, puisqu'il "se déplace" continuellement, qu'il se couvre, etc...

La production sera donc toujours inférieure et très rarement égale à 2,982 kWh.

Ce rendement faible ainsi que le coût élevé de la source photovoltaïque ont incité les utilisateurs à exploiter le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur PV. Ce maximum est généralement obtenu en assurant une bonne adaptation entre le générateur PV et le récepteur associé. Cette adaptation est effectuée à l'aide de convertisseurs statiques basés sur différents modes de fonctionnement.

Il existe trois types de systèmes photovoltaïques : les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau.

III.2.6. Les composants d'un système photovoltaïque

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée : habitation isolée ou proximité d'un réseau, utilisation de batterie ou « au fil du soleil », convertisseurs de puissance. Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque :

- Les cellules solaires
- Les batteries
- Les régulateurs de charge
- Les convertisseurs
- Autres composants

Les cellules solaires étant déjà traitées dans les parties précédentes, nous allons nous attarder sur les autres composants.

III.2.6.1. Les batteries

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par les batteries. Celles-ci sont des éléments essentiels au bon fonctionnement des systèmes autonomes. Le stockage d'énergie représente 13 à 15% des investissements initiaux sur une durée d'exploitation de vingt ans. Généralement, elles sont de type plomb-acide . On utilisera des batteries dans le cas où la demande de puissance est décalée par rapport au soleil. Le choix du type de batterie se fait d'après une approximation de la puissance moyenne journalière et du temps de stockage nécessaire.

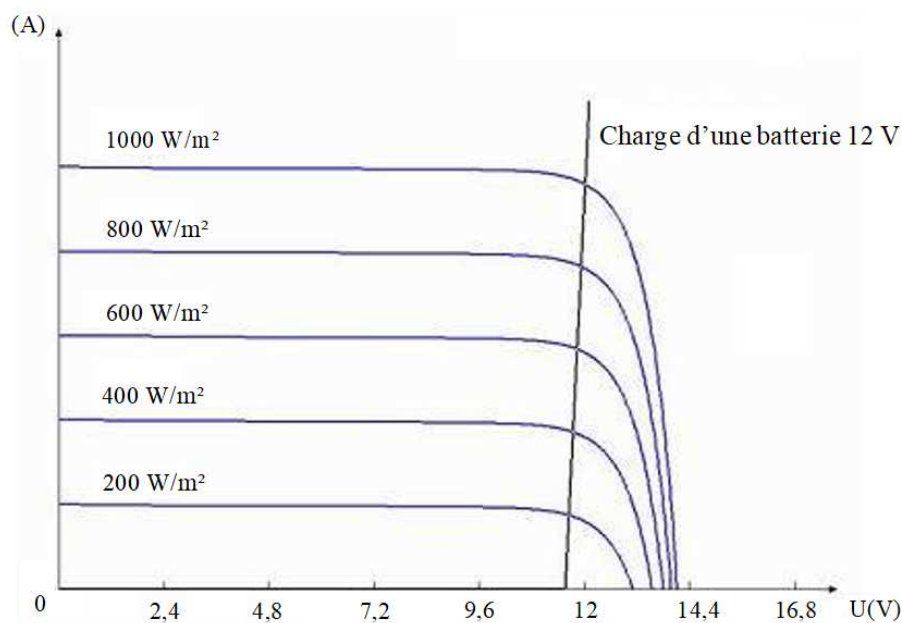


Figure 14. Caractéristiques générateur photovoltaïque et batterie

Comme le montre la figure ci-dessus, la caractéristique des batteries s'adapte assez bien à celles des générateurs photovoltaïques, car elles fonctionnent à tension quasi constante. Il suffit de dimensionner la batterie pour se placer au point de puissance maximale, puisque sa tension U_{pmax} (tension correspondant à la puissance maximale) varie relativement peu avec l'éclairement.

III.2.6.2. Les régulateurs de charge

Plusieurs types de régulateurs peuvent être utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Le régulateur contrôle les flux d'énergie. Il doit protéger la batterie contre les surcharges (solaires) et décharges profondes (utilisateur). Il doit assurer la surveillance et la sécurité de l'installation.

Les régulateurs de charge se caractérisent en trois groupes principaux :

- Les régulateurs en série, qui incorporent un interrupteur entre le générateur et l'accumulateur pour arrêter la charge.
- Les régulateurs shunt, dont l'interrupteur court-circuite le générateur solaire en fin de charge.
- Les régulateurs à recherche de point de puissance maximum (MPPT ou Maximum Power Point Tracking), qui utilisent un circuit électronique spécial permettant de soutirer en permanence du champ de capteurs sa puissance maximale.

III.2.6.3. Les convertisseurs

Suivant l'application, on devra souvent utiliser un convertisseur pour adapter la puissance générée à la charge. Il existe principalement les convertisseurs DC/DC qui fournissent à la charge une tension DC différente de la tension générée par les panneaux et les convertisseurs DC/AC qui produisent une tension alternative pour les charges correspondantes.

III.2.6.4. Les autres composants

Les derniers éléments indispensables au bon fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome sont les protections contre la foudre, les disjoncteurs et les fusibles.

Comme les panneaux solaires sont des équipements généralement coûteux, ils doivent être protégés pour éviter toute dégradation. Les dangers sont multiples :

- Perturbations induites par les commutations des convertisseurs de puissance. Dans ce cas, on peut introduire des filtres de puissance pour éliminer les harmoniques.
- Fonctionnement en récepteur : les panneaux se détériorent rapidement quand ils absorbent de la puissance. On peut utiliser des diodes pour empêcher le courant de circuler dans le mauvais sens.
- Foudre

III.2.7. Effet photovoltaïque

Comme il a été cité auparavant, l'effet photovoltaïque, transformation de l'énergie solaire « photon » en énergie électrique « volt » a été découvert en 1839 par le physicien A. Becquerel.

Cet effet met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques
- La collecte des charges.

III.2.7.1. Absorption de la lumière

La lumière se compose de photons. Ceux-ci peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers. Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques :

- **La réflexion** : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet
- **La transmission** : la lumière traverse l'objet
- **L'absorption** : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

L'énergie d'un photon est donnée par :

$$E = h \cdot \nu$$

Dans le cas relation d'une onde électromagnétique se propageant dans le vide, les deux grandeurs sont liées par la relation :

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

La relation de Planck-Einstein s'écrit alors :

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

d'où,

h : constante de Planck ($6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s).

ν : fréquence (Hz).

c : vitesse de la lumière (3.108 m/s).

λ : longueur d'onde (m).

Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restitué sous forme d'énergie électrique. Il faut donc au départ que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible, puisque c'est ce que l'on cherche à convertir : lumière du soleil ou des autres sources artificielles.

III.2.7.2. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

Comment l'énergie lumineuse est-elle convertie en électricité ?

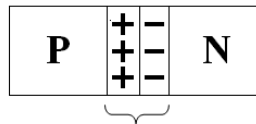
Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires contenus dans la matière semi-conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau et un ensemble d'électrons gravitant autour.

Les photons vont absorber leur énergie aux électrons périphériques, ce qui leur permet de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur.

III.2.7.3. La collecte des charges

Pour que les charges libérées par l'illumination soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent. Il faut donc les attirer hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique.

Cette extraction des charges est réalisée au sein d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur. Le but est d'engendrer un champ électrique à l'intérieur du matériau, qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les charges positives de l'autre côté. C'est possible grâce au dopage du semi-conducteur. La jonction d'une photopile au silicium est constituée d'une partie dopée au phosphore (P), dite de type n, accolée à une partie dopée au bore (B), dite de type p. C'est à la frontière de ces deux parties que se crée un champ électrique pour séparer les charges positives et négatives.



Création d'un champ électrique
Figure 15. Création d'un champ électrique à partir d'une photopile.

III.2.8. La cellule photovoltaïque

Cet exposé regroupe l'ensemble des caractéristiques des cellules utilisées dans les panneaux photovoltaïques.

III.2.8.1. Technologie des cellules

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photo-sensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

Comme il a été cité auparavant, la cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque.

En effet, une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment :

- Pour la couche N, apport d'électrons périphériques
- Pour la couche P, déficit d'électrons.

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (cf. figure 16). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti-reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée .

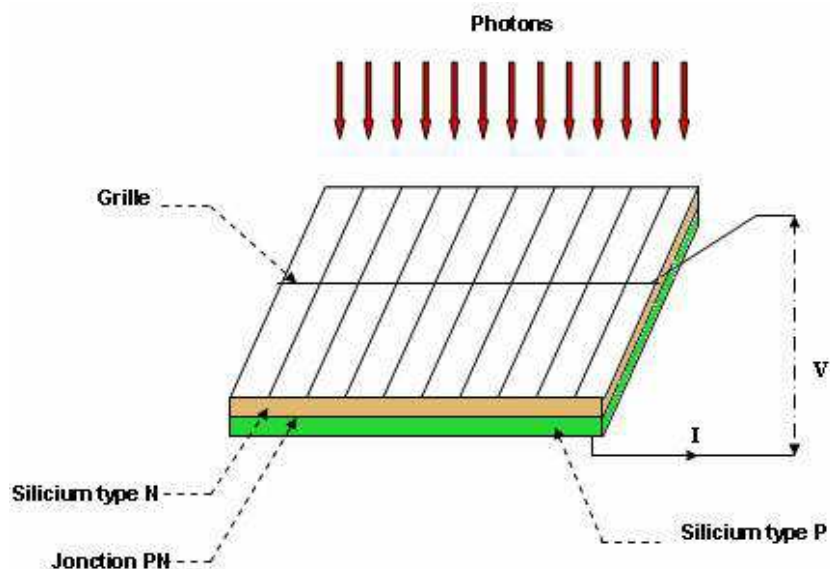


Figure 16. Schéma d'une cellule élémentaire [6].

Le matériau le plus répandu dans les photopiles ou cellules solaires est le silicium, semi-conducteur de type IV. Il est dit tétravalent, cela signifie qu'un atome de silicium peut se lier avec quatre autres atomes de même nature.

On utilise également l'arséniure de gallium et des couches minces comme de CdTe (tellurure de cadmium) et le CIS (cuivre-indium-diséléniure) et encore le CIGS.

Il existe plusieurs types de cellules solaires :

- Les cellules monocristallines
- Les cellules polycristallines
- Les cellules amorphes
- Les cellules CdTe, CIS, CIGS

Le tableau suivant présente les rendements typiques et théoriques que l'on peut obtenir avec ces différentes technologies.

Tableau 3. Rendements des différentes technologies.

Technologie	Rendement typique (%)	Rendement théorique (%)
Monocristallin	12-16	24
Polycristallin	11-13	18,6
Amorphe	5-10	12,7

III.2.8.2. Analogie avec la diode

La cellule photovoltaïque est l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Dans l'obscurité, elle se comporte comme une jonction PN (diode). Dans ces conditions, on retrouve pour une cellule la caractéristique courant - tension d'une jonction PN.

Quand la cellule est illuminée, elle produit un courant d'autant plus élevé que l'éclairement est intense. Ce courant est proportionnel à l'éclairement. On retrouve donc la même caractéristique que ci-dessus, mais décalée vers le bas d'un courant I_{ph} (photocourant) correspondant à l'intensité de l'éclairement.

Enfin, notons que pour obtenir la caractéristique de courant-tension (figure 17), on prend comme référence pour le courant le sens opposé à I_d , soit le sens du photocourant I_{ph} .

On peut aussi obtenir la caractéristique en puissance $P = f(U)$, qui, pour des conditions d'éclairement et de température données met en évidence un point de fonctionnement à puissance maximum, comme visible sur la figure b.

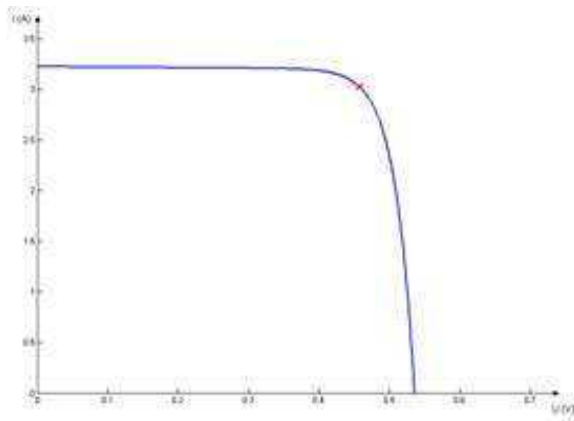


Figure 17 : caractéristique courant-tension

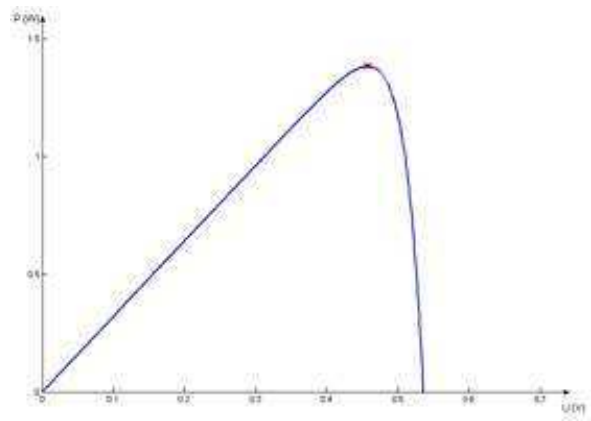


Figure 18 : caractéristique puissance-tension

De plus, l'utilisateur peut relever la caractéristique courant-tension d'une cellule en faisant varier la résistance aux bornes de cette cellule. L'applet est initialisé à l'essai en circuit ouvert. On peut prendre jusqu'à 10 points de mesure pour faire apparaître la caractéristique [6].

Cet applet montre comment on peut relever expérimentalement la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sans avoir à définir tous les paramètres de l'équation $I = f(U)$. L'applet sera accompagné d'un schéma de montage ci-dessous (figure 19).

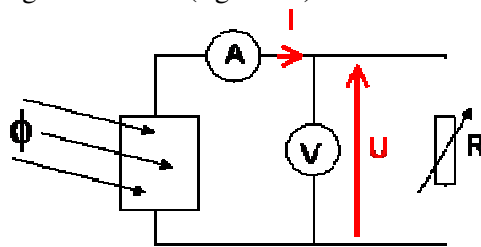


Figure 19. Schéma du montage

III.2.8.3. Modèle équivalent de la cellule solaire

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant I_{ph} , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant I issu de la cellule s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left(e^{\frac{q(U + R_s \cdot I)}{k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U + R_s \cdot I}{R_{sh}}$$

$$I_d = I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q(U + R_s \cdot I)}{k \cdot T}} - 1 \right)$$

d'ou :

I_{ph} : photocourant, ou courant généré par l'éclairement (A)

I_{0d} : courant de saturation de la diode (A)

R_s : résistance série (W)

R_{sh} : résistance shunt (W)

k : constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$)

q : charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

T : température de la cellule ($^{\circ}$ K)

On peut déduire de cette expression un schéma équivalent, comme le montre la figure ci-dessous :

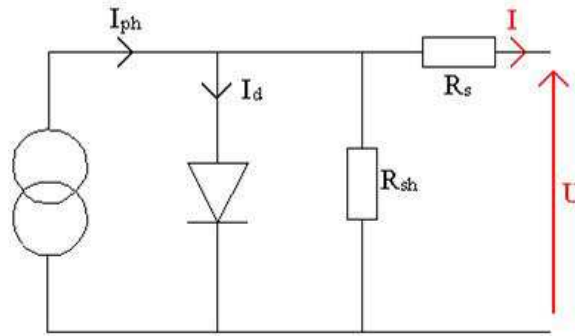


Figure 20. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par un éclairage.

Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes :

- Résistance série R_s : modélise les pertes ohmiques du matériau.
- Résistance shunt R_{sh} : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Idéalement, on peut négliger R_s et I devant U , puis travailler avec un modèle simplifié :

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left(e^{\frac{q \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{sh}}$$

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans R_{sh} . On obtient :

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left(e^{\frac{q \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right)$$

Le schéma équivalent de la figure ci-dessous correspondant est celui de la cellule idéale :

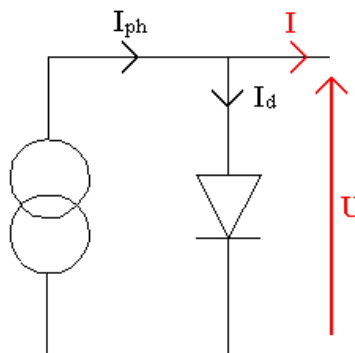


Figure 21. Schéma équivalent simplifié

Le rendement énergétique d'une cellule est défini par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente :

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot S}$$

d'où:

E : éclairement (W/m²)

S : surface active des panneaux (m²)

P_m est la puissance maximum mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1.5, une température de 25°C, et un éclairement de 1000 W/m².

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 20%. Des rendements plus importants ont été obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (en laboratoire, l'arséniure de gallium AsGa donne des rendements supérieurs à 25%) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches), souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre.

Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium, qui représente une solution économique. Pour de telles cellules, le rendement énergétique ne dépasse pas les 15%.

D'après les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, on peut déduire d'autres paramètres :

- Le courant de court circuit I_{cc} , soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche du photocourant I_{ph} .
- La tension de circuit ouvert V_{co} , soit la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.
- Entre ces deux extrêmes, il existe un optimum donnant la plus grande puissance P_{max} ou MPP(Maximum Power Point).
- Le facteur de forme qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique, soit le rapport :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}}$$

III.2.8.4. Influence de la température

Le rendement d'une cellule solaire dépend de l'éclairement et grandement de la température.

La température est un paramètre important puisque les cellules sont exposées au rayonnement solaire, susceptible de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique : elle se dissipe sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température d'une cellule est toujours plus élevée que la température ambiante.

Pour estimer la température de cellule T_c à partir de la température ambiante T_a , on peut utiliser la formule de correction suivante :

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (TUC - 20)$$

d'ou :

E_m : éclaïrement moyen (en W/m^2).

TUC : Température d'utilisation de cellule ($^{\circ}C$).

Hypothèses [6] :

l'éclaïrement est constante ($1000 W/m^2$).

La cellule étudiée est au Silicium.

Important :

- *D'après l'expérience, il a été constaté que la température de la cellule a une grande influence sur ses performances électriques. Plus la température est froide, plus elle est efficace.*

- *Chaque degré de réchauffement occasionne une perte de rendement de l'ordre de 0,5 %. Empiriquement, on constate que le photocourant augmente légèrement avec la température (de l'ordre de 0.05% par $^{\circ}K$, pour une cellule au silicium).*

- *Il a été remarqué aussi que le point de puissance maximum peut connaître des variations significatives. La caractéristique P-I ci-dessus montre que si la température de cellule diminue de plus de $20^{\circ}C$, on peut se retrouver avec une puissance très faible, sur la partie fortement décroissante.*

III.2.8.5. Influence de l'éclaïrement

Hypothèses :

On considère ici que la température reste constante ($27^{\circ}C$). La cellule étudiée est au Silicium.

Le courant est normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous de faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charge et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclaïrement.

Le photocourant créé dans une cellule photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée.

On peut également travailler à tension U constante, car la variation de U_{pmax} avec l'éclaïrement est infime (figures 22 et 23). La perte de puissance ne serait pas significative [3].

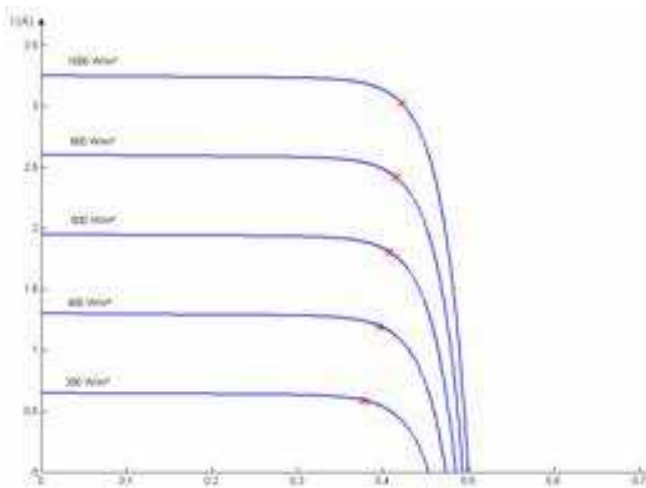


Figure 22 : réseau de caractéristiques U/I

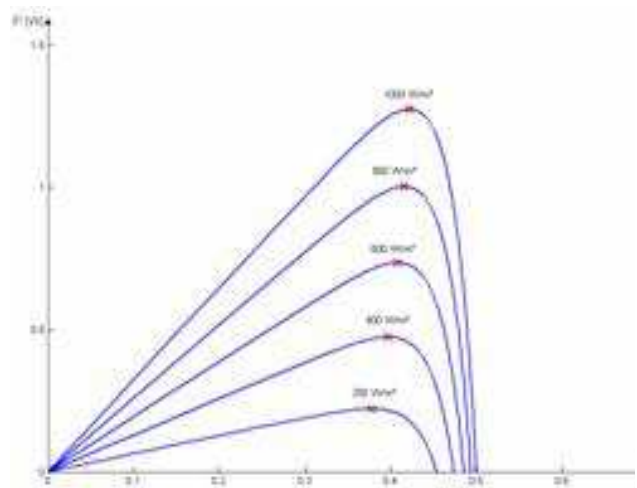


Figure 23 : réseau de caractéristiques U/P

Pour augmenter l'éclairage des cellules, il est conseillé de les orienter pour que les rayons solaires les frappent perpendiculairement. Pour ce faire, on peut utiliser des panneaux possédant une orientation fixe mais des panneaux à inclinaison variable sont encore plus efficaces. Par exemple, en hiver un panneau couché sur le sol est deux fois moins efficace qu'un panneau incliné pour faire face au soleil.

III.2.8.6. Association de cellules

Dans les conditions standard STC (1000W/m² ; 25°C ; AM 1.5), la puissance maximale pour une cellule au silicium de 10 cm² serait d'environ 1.25 W. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de très faible puissance insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires. Ces groupements sont appelés modules, puis panneaux.

Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres existant dans un réseau de photopiles en fonctionnement. En effet, bien que choisies théoriquement identiques, les nombreuses cellules qui constituent le générateur présentent des caractéristiques différentes du fait des dispersions de construction inévitables, mais aussi d'un éclairement et d'une température non uniformes sur l'ensemble du réseau.

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant pour une même tension.

a) Mise en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

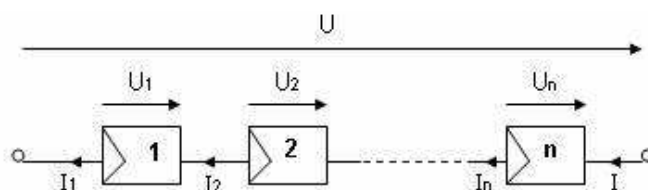


Figure 24. Association série

b) Mise en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

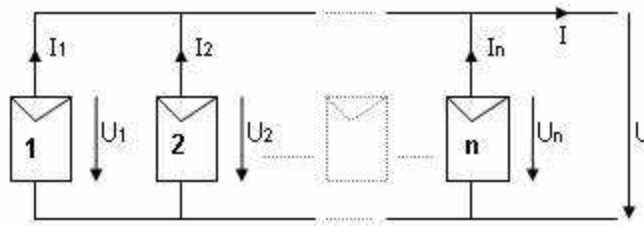


Figure 25. Association parallèle

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V.

III.2.9. Le Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Cette partie présente l'importance du Maximum Power Point Tracking (MPPT) dans l'application du photovoltaïque. Elle nous introduit à l'étude du Maximum Power Point Tracking ou MPPT : situation et concept, principe fondamental et présente les différents MPPT existants, leurs avantages et inconvénients [7].

III.2.9.1. Situation et concept

D'un point de vue expérimental, les cellules photovoltaïques (PV) présentent de grandes variances de leur puissance électrique en fonction des conditions météorologiques. De plus, quand elles sont connectées à une charge, certains problèmes apparaissent, et la puissance transférée à la charge correspond rarement à la puissance maximale délivrée par le générateur PV. On remarque des problèmes similaires dans le cas du éolien.

Pour avoir la meilleure connexion entre une source non linéaire et une charge arbitraire et produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) a été développé depuis 1968. Ces genres de contrôleurs, particulièrement adaptés pour piloter une source non linéaire, forcent le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique.

Quand une source d'énergie est connectée à une charge, le point de fonctionnement est déterminé en prenant l'intersection de la caractéristique électrique I-V avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie du fait que la source d'énergie ou la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale que l'on pourrait fournir.

Il existe différents types de contrôleurs MPPT. Généralement, chacun de ces contrôleurs a été réalisé pour une application spécifique. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

- Le rendement global du système désiré par le constructeur

- Le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une charge (DC-DC, DC-AC), ou à un réseau électrique.
- L'application souhaitée (systèmes autonomes, connectés au réseau, spatiaux.)
- Les caractéristiques du MPPT, en fonction de la vitesse, qualité
- Le type d'implantation choisi (analogique, numérique, mélange des deux)

III.2.9.2. Principes des contrôleurs MPPT

Les principes des contrôleurs MPPT sont souvent basés sur le « coude » de la caractéristique P-V. C'est plus ou moins une méthode par tâtonnement, comme le montre la figure 26.

On se place à un endroit de la courbe (X_1), et l'on regarde si la valeur du point suivant est supérieure ou non. Si oui, on se déplace au point suivant (X_2), jusqu'au moment où le terme suivant (X_n) sera inférieur au précédent (X_{n-1}). A ce moment, on prend un intervalle de valeur entre chaque point plus faible, et l'on recommence à partir de (X_{n-1}), jusqu'à obtenir le MPP (X). L'animation suivante permet de visualiser la recherche du MPP en faisant varier la tension de batterie, afin de trouver la valeur optimale d'après les caractéristiques I-V, et P-V.

Cependant, ce principe, facile à réaliser semble t-il dans ces conditions, devient moins accessible lorsque l'éclairement intervient. En effet, lorsque l'intensité de l'éclairement varie, on passe ici à une valeur $E_2 < E_1$, la caractéristique P-V change. Le point X , qui était jusqu'à présent le MPP, se retrouve être un mauvais point de fonctionnement dans les nouvelles conditions, comme le montre la figure suivante. On voit apparaître un nouveau point de fonctionnement ici appelé X' (voir la figure 27).

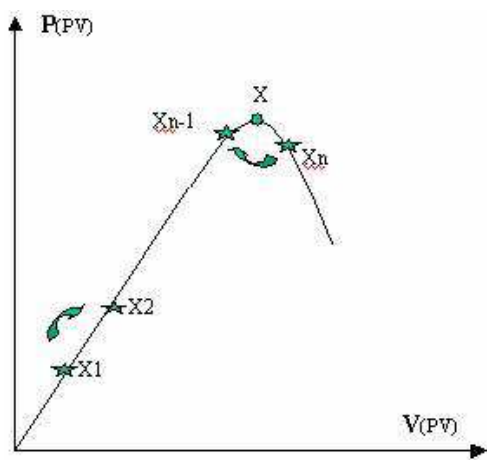


Figure 26. Principe d'un contrôleur MPPT

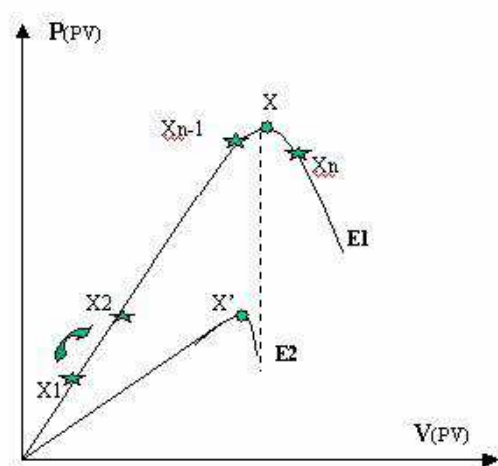


Figure 27. Conséquence d'un changement d'éclairement sur la recherche du MPPT

Comme pour les régulateurs linéaires, le contrôle est basé sur un système de régulation qui a X_s et X_e respectivement comme variables de sortie et d'entrée. Dans la plupart des systèmes de régulation, seulement une mesure est nécessaire pour connaître le rapport entre X_s et X_e , mais ce n'est pas une condition suffisante dans un système où le rapport est une fonction du temps.

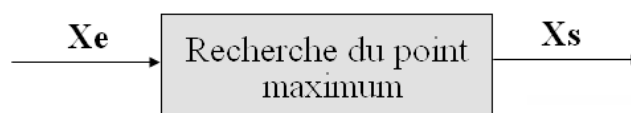


Figure 28. Schéma bloc classique d'un MPPT

Le déplacement de X_e , peut être assimilé à une perturbation dans la régulation du maximum. En effet, quand le signe de la dérivée de X_s est connu, et si cela signifie que X_s s'éloigne du maximum, alors le contrôleur change le signe de la direction de X_e pour retrouver le maximum. Cette constante évolution de X_e introduit un état d'oscillation autour de la valeur maximale.

Cependant, plusieurs limites existent :

- La caractéristique P-V du générateur peut avoir plus d'un maximum. Cela se produit quand beaucoup de cellules PV, avec leur diode de protection, sont associées en série ou en parallèle.
- Des variations brutales peuvent apparaître au niveau de l'éclairement ou de la charge. Si le MPPT n'a pas une bonne dynamique, le MPP peut être perdu. Pendant le temps qu'il faudra pour retrouver le MPP, de nouvelles pertes de puissance vont apparaître.
- Des oscillations autour du MPP existent lors de la recherche de ce point. Cela introduit des pertes.

Il est bon de remarquer que les MPPT travaillent à très hautes fréquences audio, entre 20kHz et 50kHz. L'avantage des circuits à haute fréquence est qu'ils peuvent être construits avec des transformateurs de très bon rendement, et des petits composants.

III.2.9.3. Les différents types des contrôleurs MPPT

Un grand nombre de contrôleurs MPPT ont été créés depuis 1968.

a) *Les premiers contrôleurs*

Ils sont basés sur le contrôle d'un interrupteur, en utilisant une bascule. Ce dernier est contrôlé par deux éléments : la différence entre le courant actuel I et sa valeur maximale, et la différence entre la tension actuelle V et sa valeur crête. Un choix arbitraire est fait sur les maximum I et V , de manière à fournir un fonctionnement proche du MPP.

b) *Les autres MPPT appliqués au spatial*

L'environnement spatial diffère de celui sur terre. En effet, le taux d'éclairement dépend de la position du satellite, laquelle est une information connue, et non des conditions météorologiques comme sur terre. C'est pourquoi, certaines simplifications peuvent être apportées pour évaluer la puissance délivrée par le générateur PV.

c) *Les MPPT utilisant des algorithmes*

Les algorithmes de programmation de contrôleurs MPPT sont relativement simples, du fait des limitations technologiques dans les microprocesseurs disponibles. Il peut donc être facilement implémenté sur un ordinateur ou un microprocesseur.

Il existe également des algorithmes améliorés, analogiques ou numériques. En effet, ce dernier a une qualité de commande pouvant être ajustée pour obtenir un rendement de 100%.

IV. Références bibliographiques

- [1] <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/>
http://www.heliodon.net/downloads/Beckers_2004_Ir_Le_diagramme_solaire.pdf
- [2] Benoit Beckers, "Le diagramme solaire", 2004
http://www.heliodon.net/downloads/Beckers_2004_Ir_Le_diagramme_solaire.pdf
Site web consulté en septembre 2016
- [3] Damien Grenier, Sophie Labrique, "Cours de eLearning tools for Electrical Engineering - e-LEE",
<https://sites.uclouvain.be/e-lee/FR/>
Site web consulté le 13 septembre 2016
- [4] "La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde Collection chiffres et statistiques",
Quinzième inventaire - Édition 2013, Observ'ER - EDF
<http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Fr/sommaire.asp>
Site web consulté le 25 septembre 2015
- [5] David J. Mildrexler, Maosheng Zhao et Steven W. Running, "Satellite Finds Highest Land Skin
Temperatures on Earth", BAMS, American Meteorological Society, juillet 2011, p. 856
<http://www.geoclimat.org/2012/07/lendroit-le-plus-chaud-de-la-planete.html>
Site web consulté le 5 octobre 2016
- [6] Ardjoun Sid Ahmed El Mehdi, " Thèse de Doctorat en sciences - Commande d'un système d'énergies
renouvelables Multisources relié au réseau électrique", Department of Electrical Engineering, University of
Sidi-Bel-Abbes, April 2016
Site web consulté le 7 novembre 2017
- [7] Bakhoda, Omid Zhoulai; Menhaj, Mohammad Bagher,*; Gharehpetian, Gevork B. : "Fuzzy logic
controller vs. PI controller for MPPT of three-phase grid-connected PV system considering different
irradiation conditions", selected papers from the 4th Iranian Joint Congress On Fuzzy and Intelligent
Systems – CFIS2015, 9–11 September 2015