

# CHAPITRE 3 : Energies Solaires.

## I. Introduction

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil. Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est donc fondamentale.

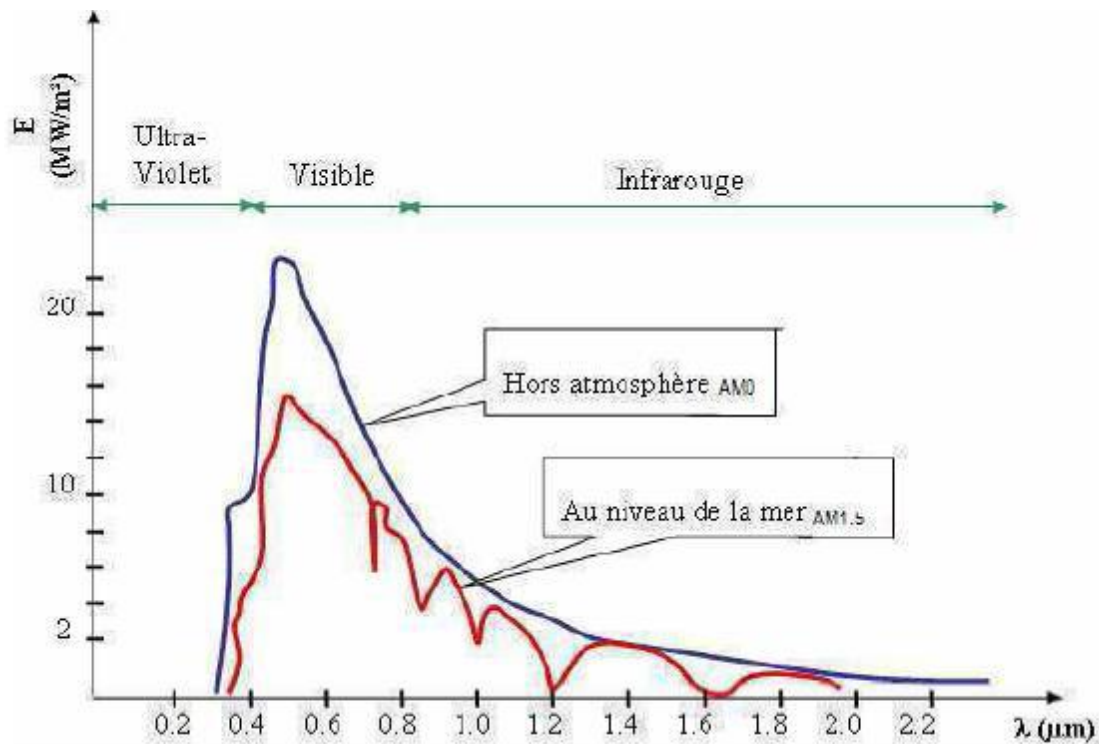
### 1. Généralités sur l'énergie solaire

- Densité de flux solaire au niveau du sol : 1000 W/m<sup>2</sup>
- Température d'équilibre de corps noir : 100 °C, possibilité de monter à 120 - 150 °C avec isolation, effet de serre et tubes sous vide
- L'industrie a des besoins en température plus élevées (cycles thermodynamiques pour la production d'électricité, source d'énergie pour des réactions chimiques, de thermolyse...)
- Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie  $E_{ph}$ , qui répond elle-même à la relation suivante :

$$E_{ph} = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Dans laquelle  $\lambda$  représente la longueur d'onde,  $h$  la constante de Planck et  $c$  la vitesse de la lumière. D'après (eq.1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques, dont l'ensemble des longueurs d'ondes est assez proche de celui émis par les corps noirs présents dans l'espace. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère.

On trouvera sur la figure 1 la répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.



**Figure 1:** Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.

**AM0 :** conditions d'éclairement hors atmosphère ou en haute altitude.

**AM1.5 :** conditions d'atmosphère terrestre, le soleil étant à 30° sur l'horizon.

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre 0,2μm (ultra-violet) et 4μm (infra-rouge) avec un maximum d'énergie pour 0,5μm. 97,5% de L'énergie solaire est comprise entre 0,2μm et 2,5μm. De 0,4μm à 0,78μm, le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. Le tableau (1) donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

**Tableau 1:** Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire

$\lambda(\mu m)$	$E_{ph}(ev)$	Zone
0.2	6.2	Ultra – violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune – vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons. Puis, l'énergie des photons excite des électrons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.

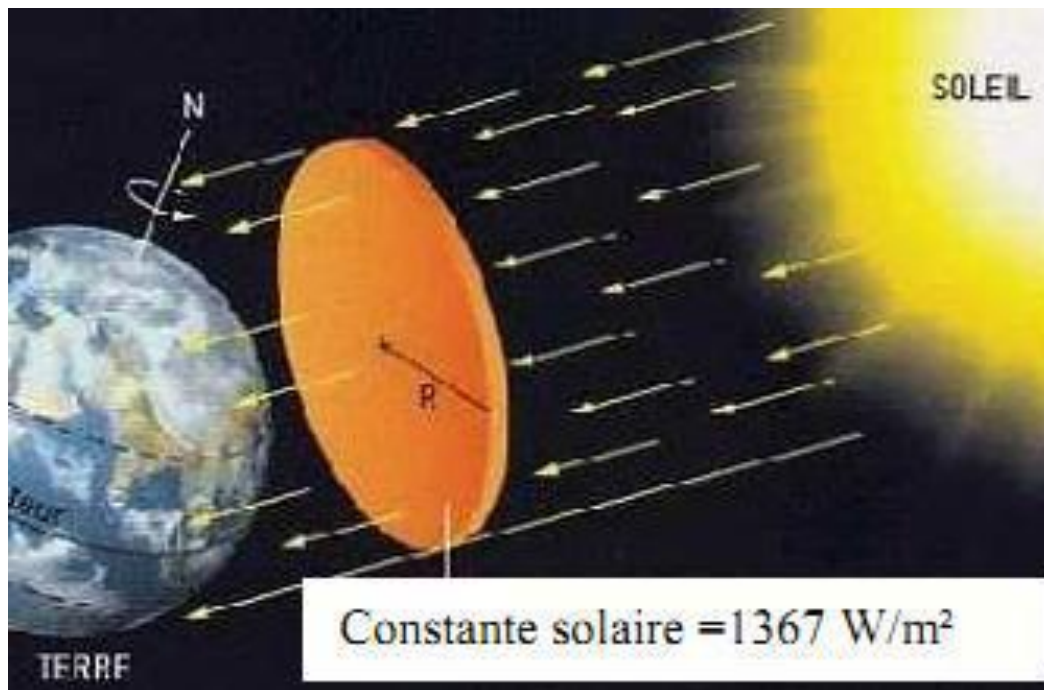
## **2. Unités utilisées**

**L'éclairement ou irradiance** : est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en  $\text{W/m}^2$  (watt par mètre carré). Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole G.

**L'irradiation ou rayonnement** : est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en  $\text{Wh/m}^2$  (watt – heure par mètre carré). L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole H.

## **3. L'énergie solaire dans l'espace (hors atmosphère)**

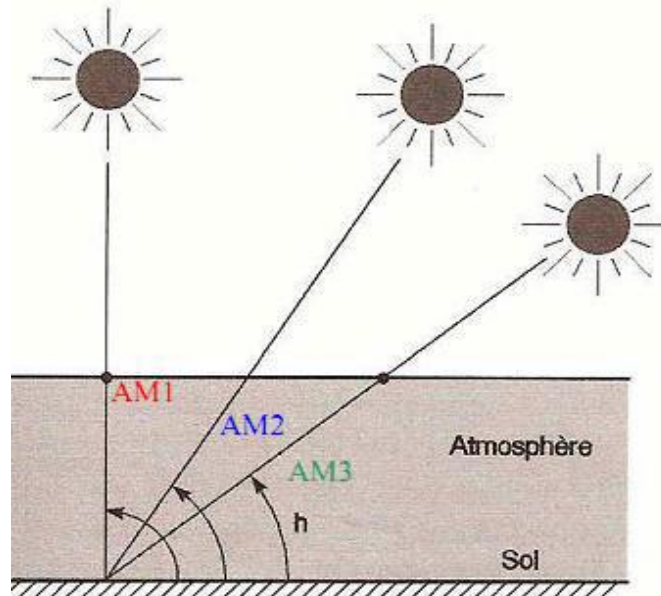
Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre c'est ce que l'on appelle la **constante solaire** égale à  $1367 \text{W/m}^2$ .



**Figure 2:** L'énergie solaire dans l'espace

## **4. Gisement solaire disponible à la surface de la terre**

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser celle – ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

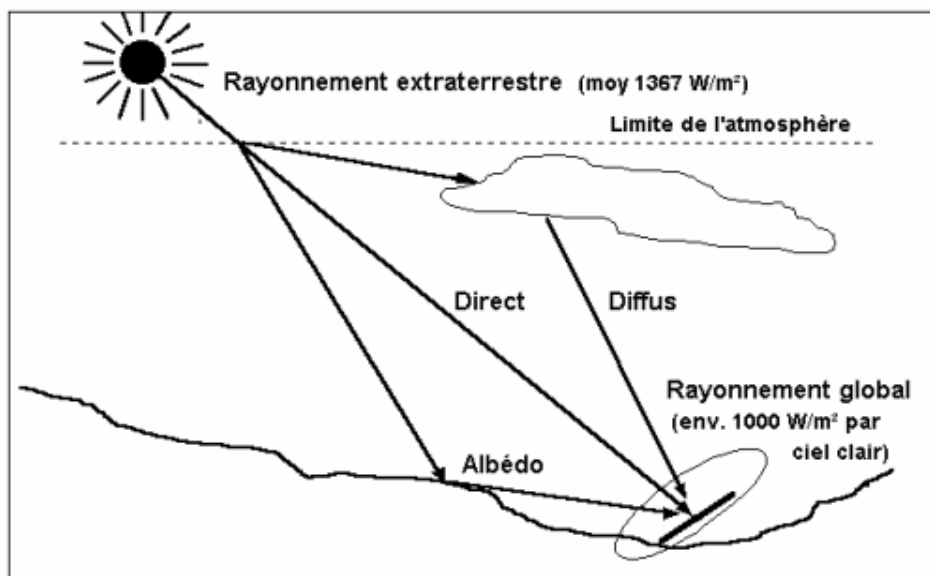


**Figure 3:** Définition de la masse d'air

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000 \text{ W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1).

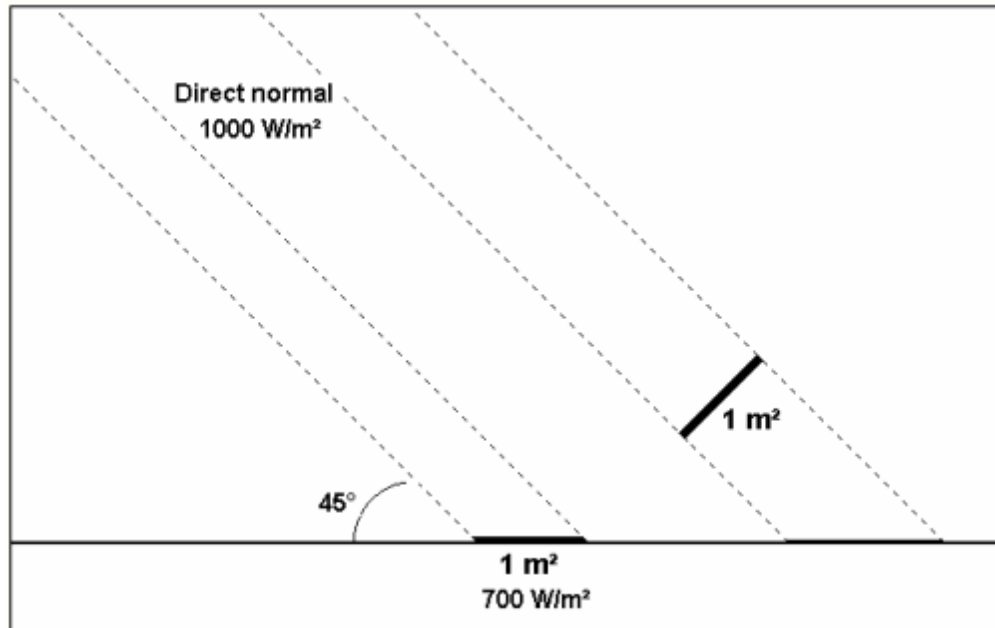
**4.1. Composants du rayonnement :** En traversant l'atmosphère le rayonnement solaire est absorbé et diffusé au sol, on distingue plusieurs composantes :

- a. **Rayonnement direct :** Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère.
- b. **Rayonnement diffus :** Le rayonnement diffus est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols).
- c. **Albédo :** L'albédo est la partie réfléchie par le sol.



**Figure 4 :** Composantes du rayonnement solaire au sol : Global = direct + diffus + albédo

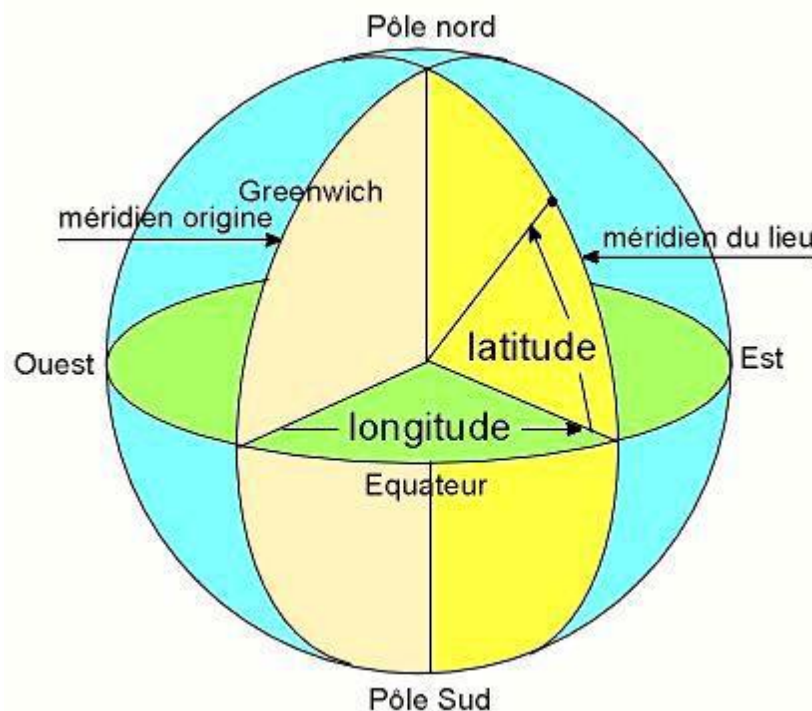
Notons enfin que le rayonnement direct sur un plan horizontal est toujours inférieur au rayonnement dans le plan perpendiculaire au soleil. Par contre, le rayonnement diffus peut être supérieur car le plan horizontal "voit" une plus grande part de la voûte céleste.



**Figure 5:** L'effet « cosinus »

## 5. Paramètres de position

L'équateur est une ligne fictive de séparation entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud, définie par un plan perpendiculaire à l'axe des pôles. Le méridien est le plan du lieu passant par l'axe des pôles.



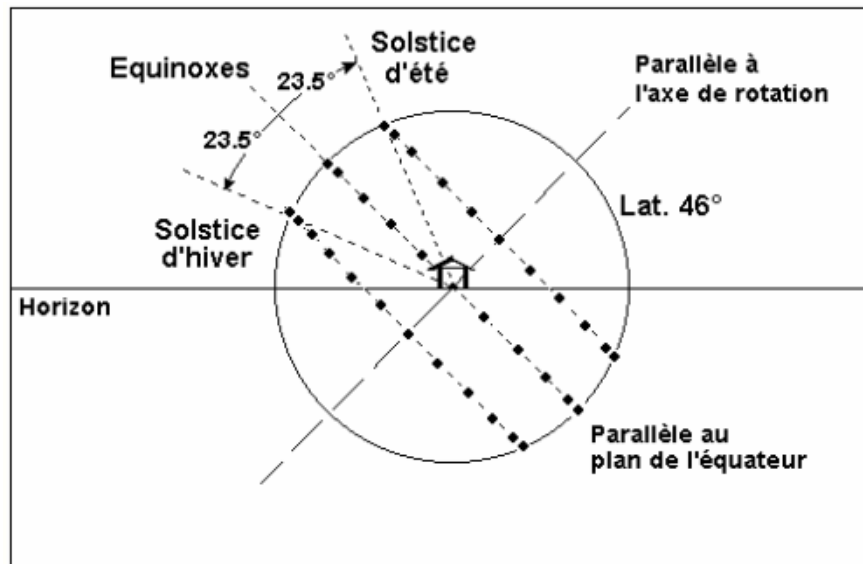
**Figure 6:** Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné



Tout point de la sphère terrestre peut être repéré par deux coordonnées, appelées coordonnées terrestres, à savoir : sa latitude «  $\phi$  » qui est positive dans l'hémisphère nord elle est négative dans l'hémisphère sud et sa longitude «  $L$  » positive à l'ouest négative à l'est. L'altitude correspond à la distance verticale entre le point repéré et une surface référence qui est le niveau de la mer.

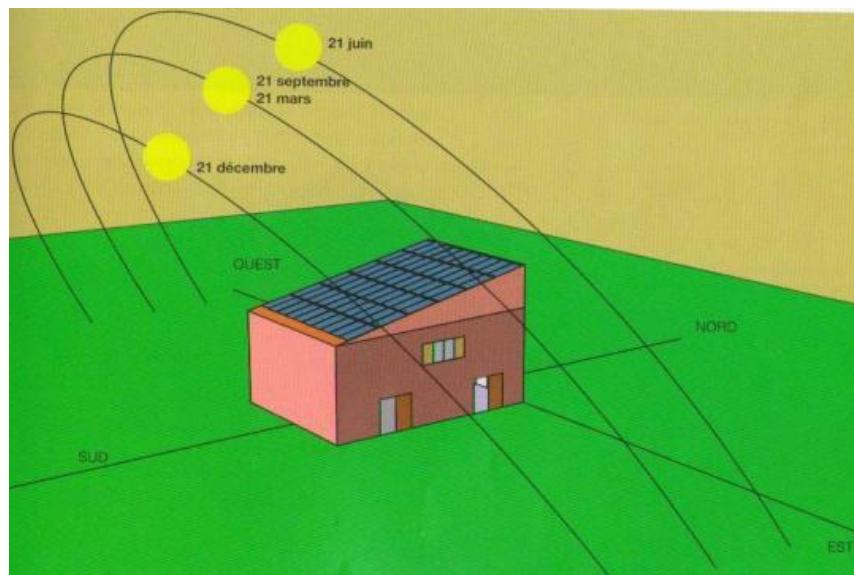
## 6. Trajectoire du soleil

Toute application solaire nécessite la connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre, caractérisé par sa latitude et sa longitude



**Figure 7:** Trajectoires apparentes du soleil vues par un observateur terrestre

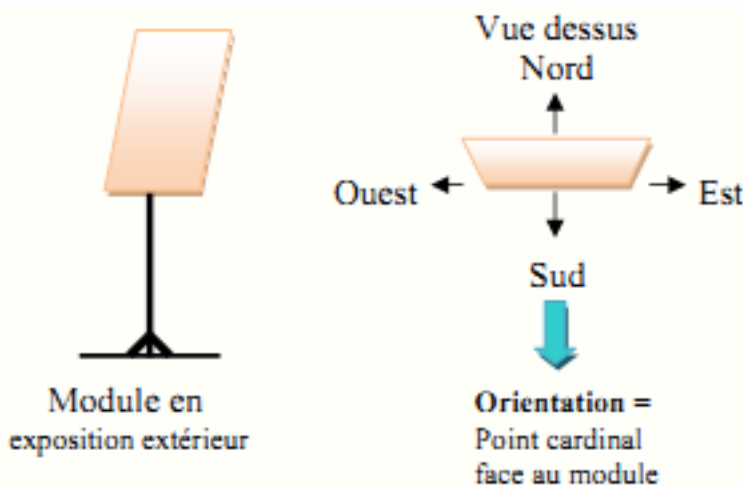
Les journées estivales allongent à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur et le Soleil est plus bas au midi solaire. Les journées d'hiver sont également plus courtes et le Soleil encore plus bas qu'à l'équateur.



**Figure 8:** Trajectoire du Soleil selon les saisons pour une latitude nord

## 7. Choix de l'orientation des modules

L'orientation idéale d'un module photovoltaïque obéit à une règle vers l'équateur Orientation vers le sud dans l'hémisphère Nord Orientation vers le nord dans l'hémisphère Sud.

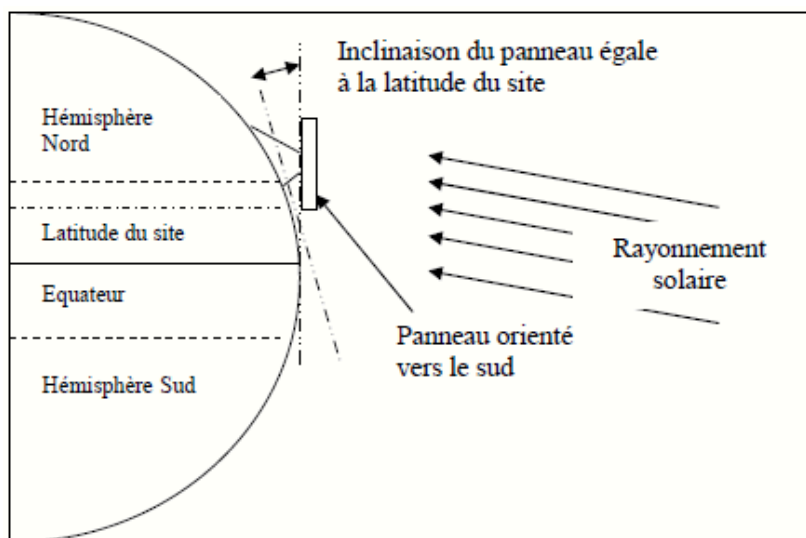


**Figure 9:** Définition de l'orientation d'un panneau pour les sites de l'hémisphère Nord

L'utilisation d'une boussole est fortement recommandée pour éviter toute approximation qui risquerait d'introduire une perte de puissance consécutive à une mauvaise orientation.

## 8. Choix de l'inclinaison des modules

Pour que les modules produisent un maximum d'énergie il faut que leur surface soit perpendiculaire aux rayons solaires. On doit donc incliner les modules pour qu'ils soient face au soleil. La valeur d'inclinaison correspond à l'angle que font les modules avec l'horizontale. Comme il est difficile de modifier plusieurs fois dans l'année l'inclinaison des modules on choisit généralement une valeur moyenne sur l'année.



**Figure 10:** Comment incliner le panneau solaire.

L'inclinaison optimale (par rapport à l'horizontale) peut se résumer sur le tableau suivant :

**Tableau 2:** L'inclinaison optimale par rapport à l'horizontale

Pour une utilisation durant toute l'année	
Latitude $\varphi$	Inclinaison $\alpha$
$\Phi < 10 \alpha = 10$	$\Phi < 10 \alpha = 10$
$10 < \varphi < 30 \alpha = \varphi$	$10 < \varphi < 30 \alpha = \varphi$
$10 < \varphi < 40 \alpha = \varphi + 100$	$10 < \varphi < 40 \alpha = \varphi + 100$
$\Phi > 40 \alpha = \varphi + 150$	$\Phi > 40 \alpha = \varphi + 150$



## **II. L'Energie Solaire Photovoltaïque**

L'électricité est une des formes d'énergie les plus versatiles et qui s'adapte au mieux à chaque nécessité. Son utilisation est si étendue, qu'aujourd'hui on pourrait difficilement concevoir une société techniquement avancée qui n'en fasse pas usage.

Des milliers d'appareils sont dessinés pour fonctionner grâce à l'énergie électrique, soit sous forme de courant continu de faible tension, soit à partir d'un courant alternatif de tension plus élevée. Il est très intéressant de produire de l'électricité avec une source d'énergie sûre et pas polluante, comme **l'énergie solaire**.

Il existe deux méthodes pour pouvoir convertir l'énergie solaire en électricité, selon ce qu'on utilise l'énergie cinétique comme forme intermédiaire du procès de conversion :

- Systèmes de conversion thermodynamique.
- Systèmes directs, fondés sur les interactions physiques entre les photons de la radiation incidente et les électrons du matériau, l'effet photovoltaïque.

### **1. Evolution de l'électricité photovoltaïque.**

Bien que les bases théoriques de l'effet photovoltaïque fussent connues depuis le début du siècle, ce n'est qu'à partir de 1954, dans les laboratoires de la Bell Téléphone à New Jersey, que la première cellule ayant un rendement raisonnable a été mise au point. Depuis la deuxième moitié du siècle précédent, le processus de purification de monocristaux de silicium a émergé.

En 1956 Loferski publiait différentes tables de conversion de rendement photovoltaïque pour tous les matériaux semi-conducteurs. Puis, c'est au début des années 70 que l'on a pu obtenir en laboratoire un rendement de 20 % en travaillant sur des cellules de monocristal d'arsenic de gallium (GaAs). Le rendement est sensiblement inférieur lorsque ces cellules se font à l'échelle industrielle.

Aussi, des expériences ont été faites avec des cellules composées de deux couches : une de sulfure de cadmium (SCd) et une autre de sulfure de cuivre (SCu<sub>2</sub>).

Ces cellules présentent l'avantage d'utiliser très peu de matière active et permettent un processus de fabrication plus simple. Cependant, leur faible rendement ne permet pas de les utiliser à l'échelle industrielle.

La commercialisation de cellules solaires photovoltaïques a commencé dès l'apparition du silicium monocristallin et elles occupent encore la première place du marché.

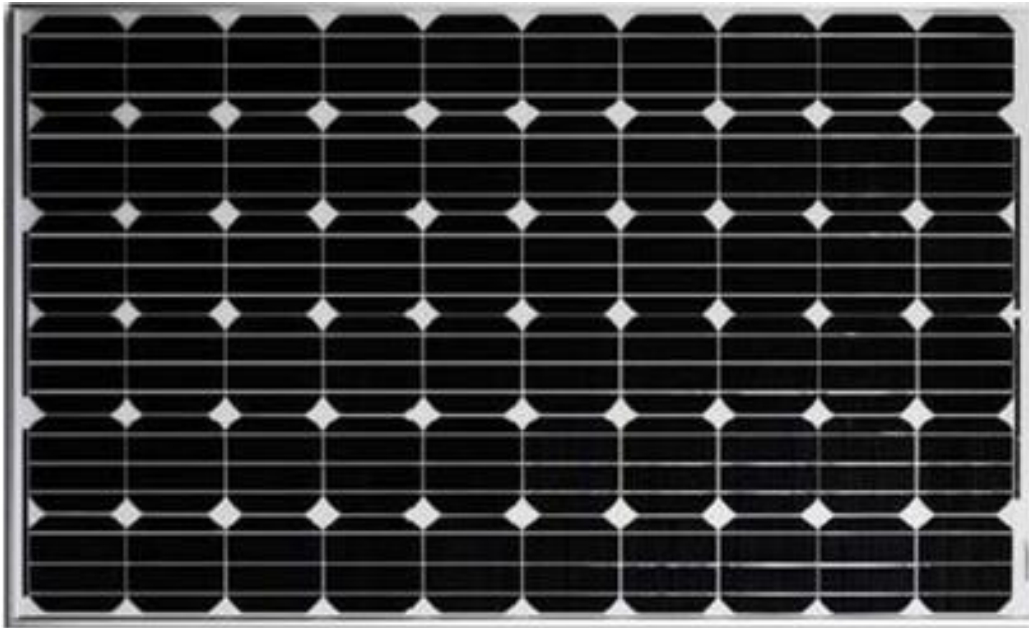
Plus tard, apparurent les matériaux polycristalins, de fabrication plus économique, mais présentant encore de faibles rendements.

Récemment des cellules de silicium amorphe se sont commercialisées et utilisées pour des dispositifs de très faible puissance : calculettes, montres, radio portable, torches etc....

## **2. Synthèse des cellules photovoltaïques.**

Pour les applications terrestres, le silicium est devenu le matériau le plus utilisé pour fabriquer des cellules PV en raison essentiellement de sa disponibilité et de la connaissance acquise sur son comportement électrique. Il est utilisé, pour cela, sous de nombreuses formes (monocristallin, polycristallin, amorphe, en couche mince,...), en fonction des performances recherchées.

### **a. Les cellules monocristallines :**



**Figure 11:** Cellules monocristallines.

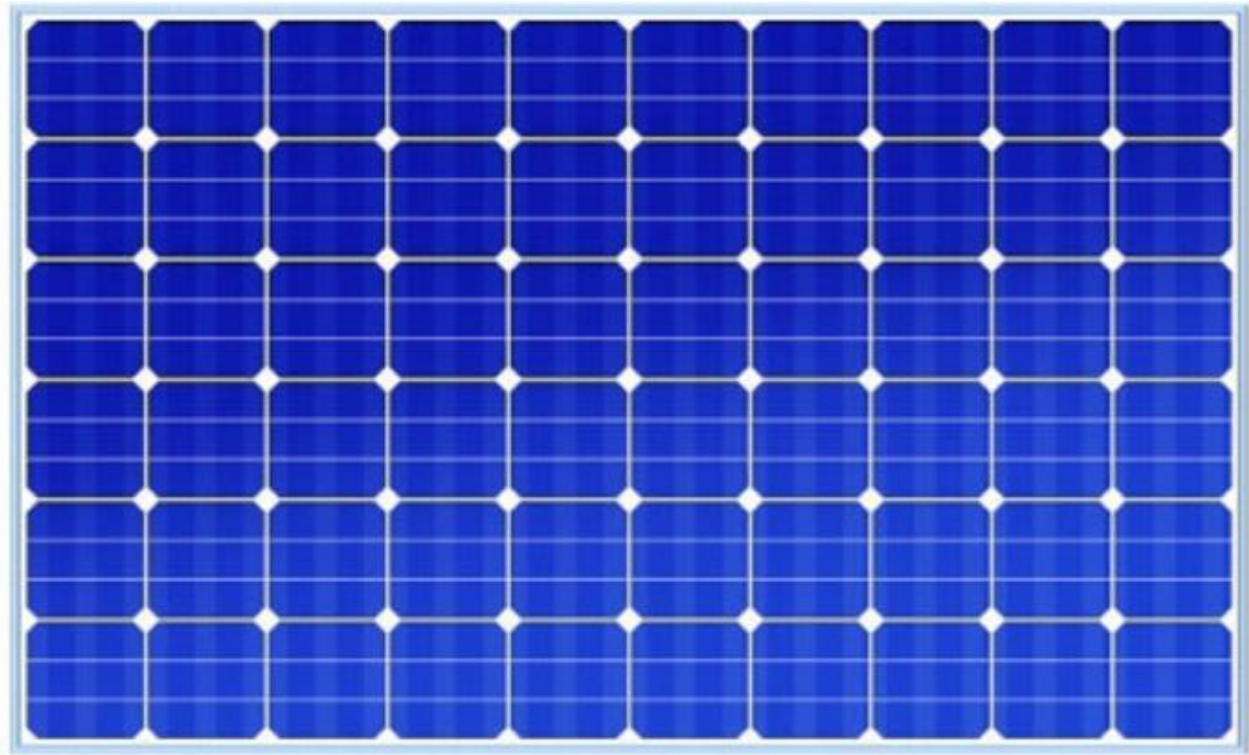
Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal, figure (11). Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau, et lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium.

Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction PN, dépôt de couche anti – reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme.

Elles ont un rendement de 12 à 18%, et la méthode de leur production est laborieuse.

#### **b. Les cellules polycristallines :**



**Figure 12:** Cellules polycristallines

Les panneaux PV avec des cellules polycristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations (figure 12) différentes des cristaux (tonalités différentes).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui largement imposées.

L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent de 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

### c. Couche mince (Amorphe) :



**Figure 13:** Cellules Couche mince (Amorphe) flexibles.

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que de 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Bien que le rendement de ces panneaux soit moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.

### d. Autres types de cellules :

De par le monde, un certain nombre de recherches sont encore effectuées pour créer de nouvelles cellules de rendement plus élevée, possédant une grande stabilité de leurs caractéristiques dans le temps et présentant de faibles coûts de fabrication. Si ce type d'énergie doit être développée à très grande échelle comme « Générateur électrique », il faut résoudre le problème du prix des capteurs. Aussi, depuis plusieurs années, on parle de matériaux organiques et de polymères qui présentent, sous certaines conditions, des propriétés photovoltaïques. Ceci suscite actuellement un regain de recherches dans divers laboratoires dans le monde, renouvelant d'autant les efforts portés sur la synthèse des matériaux. Ces cellules, dites de troisième génération, bien qu'actuellement présentent de faibles

rendements par rapport aux capteurs inorganiques [record mondial de 3,5% établi en 2001], sont intéressantes par leur très faible coût et sont donc prometteuses pour l'avenir.

### 3. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque [14]

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement.

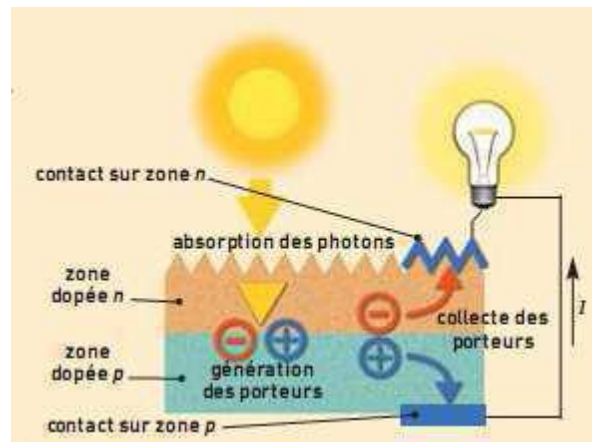
Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron - trou.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (figure 14).

L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité. Le silicium employé aujourd'hui dans la plupart des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de valence sur sa couche périphérique (colonne (IV) du tableau de Mendeleïev).

Dans le silicium solide, chaque atome – dit **tétravalent** – est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne (V) (phosphore par exemple), un de ses cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons; par agitation thermique, il va très vite passer dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se

déplacer dans le cristal, laissant derrière lui un trou fixe lié à l'atome de dopant. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur dit dope de type n. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne (III) (bore par exemple) a trois électrons de valence, il en manque un pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peu rapidement venir combler ce manque et occuper l'orbitale vacante par agitation thermique. Il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction, et le semi-conducteur est dit dope de type p. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont donc des dopants du silicium. Les cellules photovoltaïques sont assemblées pour former des modules.



**Figure 14:** Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.

## 4. Les caractéristiques

### a. La tension

Une cellule photovoltaïque produit une tension quasi constante de 0.5 à 0.6V. Cela correspond en effet à la tension de coupure d'une diode puisqu'une cellule solaire est, comme nous le verrons par la suite, assimilable à une jonction PN. Pour obtenir une tension supérieure, il sera donc nécessaire de mettre ces cellules en série, et former ainsi un "module".

Cependant, il faut tenir compte du fait qu'une température trop élevée peut diminuer la tension fournie par une cellule.

### b. L'intensité

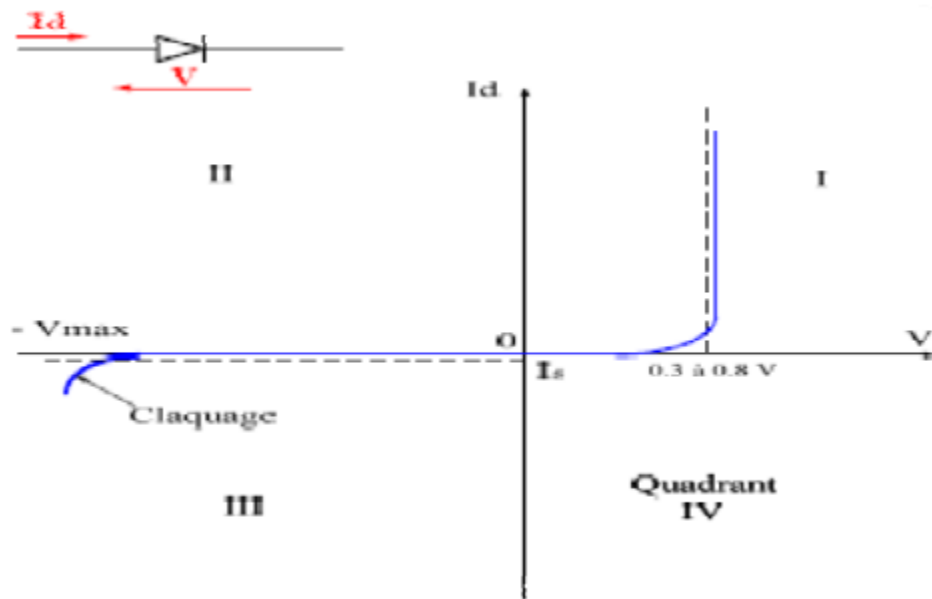
L'intensité fournie par une cellule dépend de la luminosité environnante, et de la taille du panneau solaire qui lui est rattaché. Plus le panneau sera grand, plus l'intensité fournie sera grande.

## 5. La Jonction PN utilisée comme un capteur.



### a. Comportement :

En polarisant électriquement une jonction PN classique à base de Si et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques statiques d'une diode. La particularité du Si est que lorsque la jonction PN est éclairée, un courant proportionnel à l'éclairement apparaît. C'est cette particularité qui est employée dans les générateurs solaires photovoltaïques (figure 15).

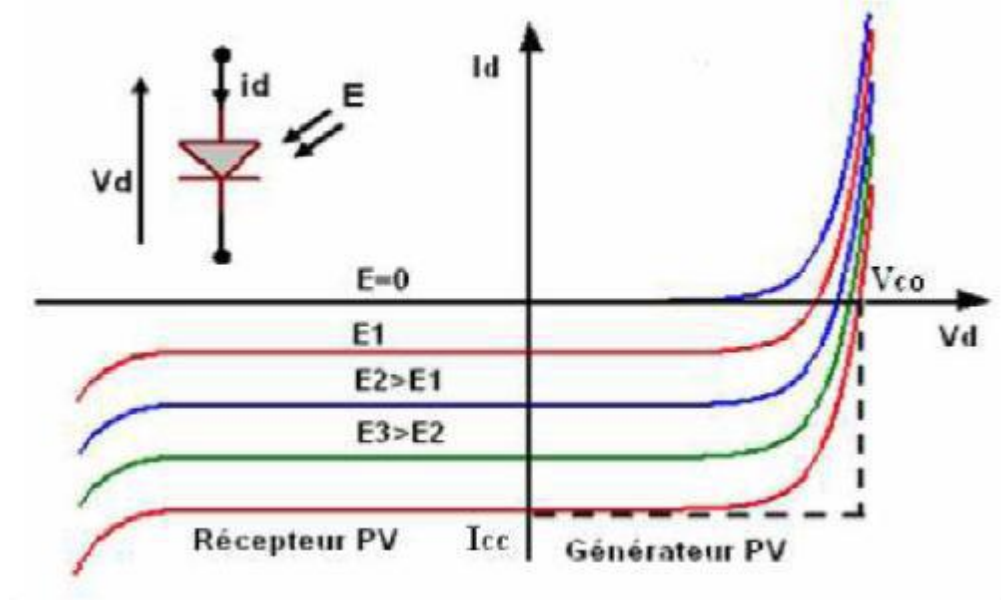


**Figure 15:** Caractéristiques d'une jonction PN polarisée. Jonction PN sous éclairement

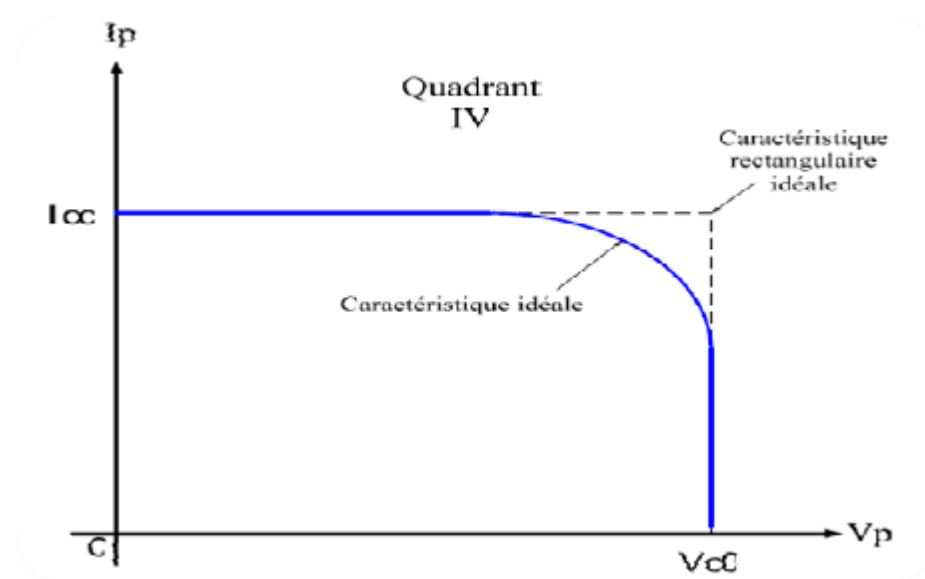
Si l'on soumet une jonction PN de faible épaisseur à un flux lumineux, il en résulte une augmentation du courant inverse de saturation proportionnelle au flux lumineux.

Physiquement, cet effet se traduit de deux manières :

- Dans le quadrant (III), le système fonctionne en récepteur, c'est la photorésistance;
- Dans le quadrant (IV), le système fonctionne en générateur; c'est la cellule photovoltaïque à jonction PN.
- Le réseau de caractéristiques est alors donné par la figure (16). On s'intéresse uniquement au quadrant IV pour la réalisation de générateurs photovoltaïques à partir de cellules photovoltaïques. Pour cela, les caractéristiques sont représentées dans un nouveau repère  $Lp = f Vp$  donné par la figure (17) ou le courant de saturation inverse est compté positivement.



**Figure 16:** Caractéristique d'une jonction PN sous éclairment



**Figure 17:** Caractéristique  $L_p = f(V_p)$  d'une cellule photovoltaïque idéale

### **b. Modèle mathématique d'une cellule solaire.**