

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Centre Universitaire Nour Bachir El Bayadh**



Nour Bachir University Center, El Bayadh, Algeria

**Institut de Technologie**

Département de Génie Electrique

**POLYCOPIE DE COURS**

INTITULE :

**Energie renouvelables :**  
**Le solaire photovoltaïque**

Réalisé par : Dr. BENALI Abdelkrim

Dr. GUENTRI Hocine

**Année Universitaire: 2024 / 2025**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

Semestre S1:

Unité d'enseignement : UED 1.1

Matière 9 : Energies renouvelables ( le solaire photovoltaïque)

VHS : 22h30 (Cours : 1h30)

Crédit : 1

Coefficient : 1

### **Objectifs de l'enseignement:**

Cette matière aborde des notions relatives aux énergies renouvelables non polluantes, aux dispositifs photovoltaïques (PV), à la conversion PV, aux procédés de fabrication d'une cellule solaire, aux assemblages des modules PV, à leur dégradation ... Elle aborde, en outre, les systèmes auxiliaires : la batterie, la pile à combustible (avec l'hydrogène comme vecteur d'énergie), les convertisseurs, ... La matière s'intéressera, par ailleurs, aux différentes charges à alimenter continues ou alternatives en recherchant toutes les possibilités de couplage avec un générateur PV, à la description d'un système PV global, ses caractéristiques et à l'optimisation du fonctionnement du système.

### **Connaissances préalables recommandées :**

Notions sur les semi-conducteurs, la physique du rayonnement, les mathématiques, l'électronique ...

### **Contenu de la matière :**

#### **Chapitre 1 : Energies renouvelables**

Les formes d'énergie, C'est quoi une énergie renouvelable, Principales énergies renouvelables, La situation énergétique mondiale, ...

#### **Chapitre 2 : La source solaire**

Rayonnement solaire, Le gisement solaire, L'énergie solaire (thermique, photovoltaïque, thermo-dynamique)

#### **Chapitre 3 : La source photovoltaïque**

La conversion photovoltaïque, Technologie des cellules solaires, Propriétés des cellules solaires, Modélisation d'une cellule (d'un module) photovoltaïque (modélisation électrique,

thermique ...), Rendement de conversion, facteur de forme ..., Différentes connexions (série, parallèle, mixte), Impact de divers facteurs sur les caractéristiques électriques, Dégradation, Protections des modules photovoltaïques, Les applications de l'énergie photovoltaïque (pompage, connexion au réseau, ...).

#### **Chapitre 4 : Systèmes photovoltaïques**

Connexion directe générateur photovoltaïque – charge, Stockage (Batterie), Pile à combustible, Hacheur, Onduleur, Etude d'un exemple de système global (l'hybridation), Problème de dimensionnement d'une installation photovoltaïque, Maximum Power Point Tracker (MPPT).

#### **Mode d'évaluation :**

Examen : 100 %

## Sommaire :

|         |                                                      |    |
|---------|------------------------------------------------------|----|
| 1       | Introduction.....                                    | 1  |
| 1.1     | L'énergie solaire .....                              | 3  |
| 1.2     | L'énergie éolienne.....                              | 4  |
| 1.2.1   | Générateurs éoliens.....                             | 4  |
| 1.2.2   | Constitution de la turbine éolienne.....             | 5  |
| 1.3     | L'énergie biomasse .....                             | 7  |
| 1.4     | L'énergie hydraulique.....                           | 8  |
| 1.5     | L'énergie géothermie .....                           | 8  |
| 1.6     | Énergie marémotrice.....                             | 9  |
| 1.7     | Énergie du courant océanique.....                    | 10 |
| 1.8     | Énergie des vagues (énergie houlomotrice).....       | 11 |
| 1.9     | Energie thermique de l'océan.....                    | 12 |
| 2.1     | Introduction .....                                   | 14 |
| 2.2     | Généralités sur le rayonnement solaire .....         | 14 |
| 2.3     | Le soleil.....                                       | 14 |
| 2.4     | Les principales caractéristiques du soleil.....      | 14 |
| 2.5     | Mouvements de la terre autour du soleil.....         | 16 |
| 3.6     | La terre tourne sur elle-même.....                   | 16 |
| 2.7     | Constante solaire.....                               | 18 |
| 2.8     | Les coordonnées célestes.....                        | 18 |
| 2.8.1   | Les coordonnées géographiques.....                   | 18 |
| 2.8.1.1 | La longitude.....                                    | 18 |
| 2.8.1.2 | La latitude.....                                     | 19 |
| 2.8.2   | Les coordonnées horizontales.....                    | 19 |
| 2.8.2.1 | Hauteur .....                                        | 19 |
| 2.8.2.2 | L'azimut .....                                       | 19 |
| 2.9     | Les coordonnées horaires.....                        | 20 |
| 2.9.1   | Déclinaison.....                                     | 20 |
| 2.9.2   | L'angle horaire.....                                 | 21 |
| 2.10    | Temps solaires.....                                  | 22 |
| 2.10.1  | Temps solaire vrai .....                             | 22 |
| 2.10.2  | Temps solaire moyen.....                             | 22 |
| 2.11    | Angle d'incidence du rayonnement solaire direct..... | 22 |

|        |                                                                           |    |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.11   | Le rayonnement solaire.....                                               | 23 |
| 2.12   | Types de rayonnements.....                                                | 24 |
| 2.13   | Le gisement solaire en Algérie.....                                       | 25 |
| 2.14   | Spécification du site d'El-Bayadh.....                                    | 27 |
| 2.15   | La carte de la trajectoire solaire d'El Bayadh.....                       | 27 |
| 2.16   | La Conversion d'énergie solaire.....                                      | 28 |
| 2.17   | Évolution de l'utilisation de l'énergie solaire.....                      | 29 |
| 3.1    | Définition.....                                                           | 30 |
| 3.2    | Principe de fonctionnement.....                                           | 30 |
| 3.2.1  | Modèle de la cellule PV .....                                             | 31 |
| 3.2.2  | Modélisation du module PV et du champ PV .....                            | 34 |
| 3.3    | Principe du système de poursuite du point de puissance maximale MPPT..... | 35 |
| 3.4    | Contrôle de conversion de puissance photovoltaïque.....                   | 36 |
| 3.5    | Convertisseur DC / DC Boost pour le MPPT.....                             | 40 |
| 3.6    | La puissance produite.....                                                | 44 |
| 3.7    | Positionnement et techniques de poursuite.....                            | 45 |
| 3.8    | Les suiveurs solaires.....                                                | 47 |
| 3.9    | Les type des suiveurs solaires.....                                       | 48 |
| 3.10   | Suiveur passif .....                                                      | 50 |
| 3.11   | Suiveur actif.....                                                        | 51 |
| 3.12   | Les suiveurs mono-axe.....                                                | 52 |
| 3.13   | Le Suiveur à axe horizontal.....                                          | 53 |
| 3.14   | Suiveur à axe vertical incliné.....                                       | 54 |
| 3.15   | Suiveur solaire double axes.....                                          | 54 |
| 3.16   | Les suiveurs solaires actifs actuels.....                                 | 54 |
| 3.17   | Les Avantages et Les inconvénients des systèmes de suivi solaire .....    | 57 |
| 3.17.1 | Les avantages des systèmes de suivi solaire.....                          | 57 |
| 3.17.2 | Les inconvénients des systèmes de suivi solaire.....                      | 57 |
| 3.18   | Les avantages et les Inconvénients de l'énergie PV.....                   | 57 |
| 3.18.1 | Les avantages de l'énergie PV.....                                        | 57 |
| 3.18.2 | Les inconvénients de l'énergie PV.....                                    | 58 |

### Liste des tableaux

**Tableau 2.1** : Les principales caractéristiques du soleil.

**Tableau 2.2** : La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire Algérien.

**Tableau 2.3** : Spécifications du site d'El Bayadh.

### Liste des figures

**Figure 1.1** : Types d'Énergie solaire à concentration (CSP)

**Figure 1.2** : Anémomètre avec girouette

**Figure 1.3** : Principaux composants d'une éolienne

**Figure 1.4** : Chaîne de conversion de l'énergie éolienne avec intégration directe au réseau.

**Figure 1.5** : Énergie Géothermique

**Figure 1.6** : Énergie marémotrice

**Figure 1.8** : Densité de puissance des courants d'eau et d'air en fonction de la vitesse du courant

**Figure 1.10** : Conversion de l'énergie de l'océan

**Figure 2.1**: Les principales caractéristiques du soleil

**Figure 2.2**:Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.

**Figure 3.3**:Schématisation des mouvements de la Terre sur elle-même.

**Figure 2.4**: la surface éclairée de la Terre par les rayons du Soleil.

**Figure 2.5**: Coordonnées géographiques

**Figure 2.6**: Système local de coordonnées azimutales.

**Figure 2.7** : Système de coordonnées horaires.

**Figure 2.8**: Déclinaison du soleil en degré et en fonction de la saison de l'année.

**Figure 2.9** : Trajectoire apparente du soleil

**Figure 2.10**: Orientation et inclinaison d'un plan quelconque

**Figure 2.11**: Répartition spectrale de rayonnement solaire.

**Figure 2.12**: Rayonnement solaire.

**Figure 2.13** : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

**Figure 2.14**: Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu

**Figure 2.16**: La carte de la trajectoire solaire d'El Bayadh.

**Figure 2.17** : L'énergie émise par le soleil

**Figure 2.18** : Evolution de la Capacité mondiale d'énergie solaire photovoltaïque

**Figure 3.1** : Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

**Figure 3.2**: Cellule photovoltaïque

**Figure 3.3 :** la caractéristique Courant-tension d'une cellule PV au Silicium.

**Figure 3.4 :** Modèle équivalent simple à une diode d'une cellule PV au Silicium.

**Figure 3.5 :** Modèle de la cellule PV à deux diodes

**Figure 3.6 :** Modèle du champ PV

**Figure 3.7 :** Caractéristique I-V et P-V du module PV sous différents niveaux de rayonnement solaire à 25°C avec des points MPPT

**Figure 3.8:** Méthodes MPPT pour les PV

**Figure 3.9:** Organigramme de base pour la mise en œuvre de l'algorithme P&O

**Figure 3.10:** Organigramme de l'algorithme de conductance incrémentielle

**Figure 3.11:** Convertisseur de boost typique

**Figure 3.12:** Mode de conduction continue

**Figure 3.13 :** Convertisseur élévateur continu-continu à la limite de conduction discontinue continu

**Figure 3.14 :** Dépendance des performances d'un panneau PV à l'angle  $\beta$

**Figure 3.15:** Rendement en puissance solaire exploitée en fonction de l'angle  $\beta$  des rayons

**Figure 3.16 :** Représentation de l'angle d'inclinaison  $\theta$

**Figure 3.17:** modèle d'un héliostat dans ses premières applications.

**Figure 3.18:** champ d'héliostat -centrale solaire Thémis France.

**Figure 3.19:** Production électrique

**Figure 3.20 :** Types de suiveurs solaires.

**Figure 3.21:** Classification des poursuiveurs solaire

**Figure 3.22:** Exemples et fonctionnement des poursuiveurs passifs

**Figure 3.23:** Exemple et fonctionnement du suiveur actif.

**Figure 3.24:** Suiveur à axe horizontal.

**Figure 3.25:** Suiveur à 1 axe vertical incliné.

**Figure 3.26 :** Suiveur à deux axes ADES modèle 5F-27 M

**Figure 3.27:** Méthode de poursuite astronomique

**Figure 3.28 :** Méthode de poursuite active

**Figure 3.29 :** Principe général d'un système de suivi pour les panneaux PV.

**Figure 3.30 :** Principe général du système de suivi à base de photodiode

## Symboles

$I$  : Constante solaire

$DJ$  : jour de l'année

$\varphi$  : La latitude

$h$  : Hauteur

$\alpha$  : L'azimut

$\omega$  : L'angle horaire

$\delta$  : Déclinaison

$W_s$  : Angle horaire de coucher du soleil

$\gamma$  : Orientation

$I_p$  : courant fournie par une cellule (A).

$I_{ph}$  : photo courant (A).

$I_D$  : courant diode (A).

$I_s$  : courant inverse de la jonction PN.

$V_p$  : tension aux bornes de la cellule (V).

$V_t = kT/q$  : potentielle thermique.

$q$  : charge électrique élémentaire (C).

$k$  : constante de Boltzmann,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ .

$T$  : température en °K

$R$  : le rendement

$R_N$ : Le rendement en puissance solaire

$\theta$  : L'angle d'inclinaison

LDR : capteurs de lumière

$H$  : Hauteur de la paroi en (cm)

$d$  : distante entre la paroi et la capteur de lumière LDR en (cm)

$\varepsilon$  : angle de l'ombre solaire en (°)



VB : tension batterie (V)  
R\_LDR : résistance de la LDR ( $\Omega$ )  
V\_LDR:La tension délivrée par le capteur  
PV : Photovoltaïque.  
CC : Le moteur à courant continu  
PEP : la puissance électrique produite  
PSR : la puissance solaire reçue  
TSM : Temps solaire moyen  
TSV : Temps solaire vrai  
CSP : concentration d'énergie solaire  
ST :trackers solaires  
 $\omega_{pv}$  : vitesse de rotation du panneau PV  
GED : génération décentralisée



# Chapitre 1

## Les énergies renouvelables

### 1 Introduction

Les besoins en énergie de toutes sortes sont en croissance partout sur la planète. L'épuisement annoncé des énergies fossiles et les problèmes climatiques dus aux gaz à effet de serre, ont amené plusieurs pays à accorder un rang de priorité élevé à cette question. Depuis quelques dizaines d'années, les approvisionnements énergétiques sont devenus un problème de plus en plus préoccupant, non seulement en raison des difficultés croissantes liées aux produits pétroliers, mais aussi parce qu'il est aujourd'hui nécessaire d'admettre qu'à l'échelle de notre planète les ressources énergétiques, fossiles ou autres, sont limitées.

L'Accord de Paris fait suite aux négociations qui se sont tenues lors de la Conférence de Paris sur le climat (COP21) de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. L'Accord a été signé par 175 pays le 22 avril 2016 au Siège de l'Organisation des Nations Unies, à New York. Ils sont aujourd'hui 187 à l'avoir signé.

Dans le cadre de cet accord, les Parties se sont engagées à prendre des mesures ambitieuses pour maintenir l'élévation de la température mondiale en dessous de 2 °C d'ici à la fin du siècle.

L'Algérie, en ce qui la concerne, fait face au impact économique en la rendant plus diversifiée, moins dépendante des hydrocarbures et à l'impact des changements climatiques, qui aggravent le phénomène de désertification dont elle souffre. Elle a intégré la dimension du développement durable dans ses plans de développement, y compris dans un souci de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre. De même qu'elle a adopté des mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique et une politique de promotion des énergies renouvelables.

L'énergie solaire est disponible quotidiennement, non polluante et gratuite, c'est pourquoi, elle est de plus en plus utilisée, comme alternative aux combustibles, dans la production d'électricité. L'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus élevés au monde, avec une durée d'ensoleillement sur la totalité du territoire national pouvant atteindre

les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m<sup>2</sup> /an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup> /an au Sud du pays.

Afin de bénéficier et récolter l'énergie solaire pendant les heures de clarté il existe deux techniques d'installation des panneaux photovoltaïques qu'on peut citer : l'installation fixe et l'installation mobile ou orientable. L'augmentation de performance entre les panneaux fixes correctement orientés (orientés plein sud).

L'histoire du photovoltaïque débute en 1839 lorsque le physicien français Antoine César Becquerel découvre le principe photovoltaïque (C'est son petit-fils, Antoine Henri Becquerel qui découvrira la radioactivité). L'effet photovoltaïque en tant que tel a été découvert en 1887 par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz.

- C'est Albert Einstein, le premier, qui a pu expliquer le principe photovoltaïque, avec à la clef, le prix Nobel de physique en 1923.

- En 1955, des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone (devenus aujourd'hui Alcatel-Lucent Bell Labs) développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %.

- Les Américains lancent en 1959 le satellite Vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïques ayant un rendement de 9%.

- La première maison avec une installation photovoltaïque voit le jour en 1973 à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique.

- C'est en 1983 que la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt 4000 kilomètres en Australie.

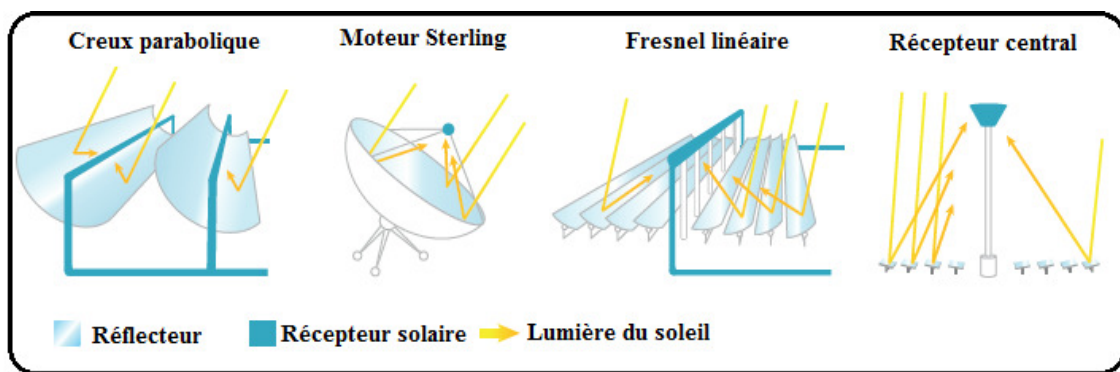
- Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers et les panneaux photovoltaïques ont des rendements d'environ.

## 1 L'énergie solaire

Bien qu'elle ne soit pas l'énergie renouvelable représentant la puissance installée la plus importante, l'énergie solaire est de loin l'énergie renouvelable qui compte le plus d'installations.

L'énergie solaire est aujourd'hui exploitée par deux types principaux de technologie :

- Les systèmes thermoélectriques, souvent appelés centrales solaires à concentration (CSP), ces dernières captent la lumière du soleil et convertissent cette énergie thermique en électricité grâce à un moteur thermique.
- Les systèmes photovoltaïques (PV), qui convertissent les photons de la lumière solaire directement en électricité dans un dispositif à semi-conducteur.



**Figure 1.1** : Types d'Énergie solaire à concentration (CSP)

Toutes les technologies utilisant l'énergie solaire se basent sur le rayonnement électromagnétique du soleil pour générer de l'électricité, mais si un système concentre optiquement la lumière, il collecte principalement la partie directe du rayonnement, alors que les systèmes non-concentrant (par exemple, les systèmes photovoltaïques à plaques planes) peuvent collecter à la fois les composants de la lumière du soleil qui inclut la lumière directe et diffusé. De plus, comme seule la lumière directe peut être concentrée optiquement, le système CSP nécessite la capacité de suivre le soleil de sorte que le capteur se dirige toujours vers le soleil lorsqu'il se déplace dans le ciel, ce qui complique davantage le système.

À partir de 2013, les systèmes photovoltaïques représentent la grande part de la capacité solaire électrique existante, avec une capacité PV globale estimée à 140 GW et une puissance thermoélectrique inférieure à 3 GW. La production d'électricité solaire de la même année peut

être estimée à 130-150 TWh. Au cours de la dernière décennie, la capacité photovoltaïque installée a augmenté en moyenne de plus de 50% par an.

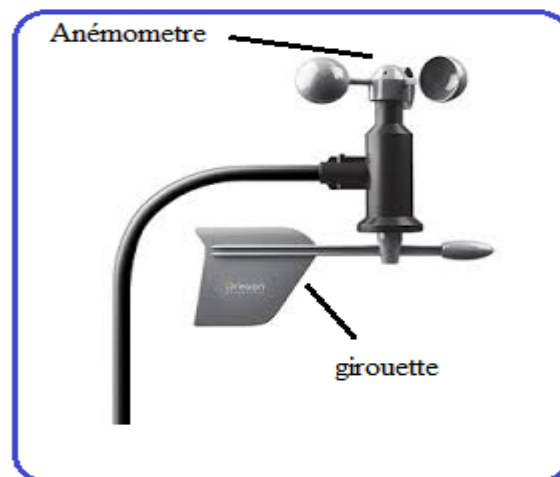
## 2 L'énergie éolienne

Les éoliennes injectent de l'énergie sur le réseau électrique en convertissant, successivement, l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique. L'éolien capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site.

### 2.1 Générateurs éoliens

L'énergie éolienne est produite de l'énergie cinétique du vent. C'est une énergie qui cause moins de pollution à l'environnement par rapport aux énergies classiques telles que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire. Quoique le vent soit une source d'énergie gratuite, sa puissance varie considérablement en fonction du lieu et du moment, selon le climat et les saisons. Le vent ne peut assurer un apport énergétique régulier et il est difficile à contrôler. Toutefois, il est possible de prévoir la vitesse moyenne du vent, sa direction et son intensité dans certains lieux.

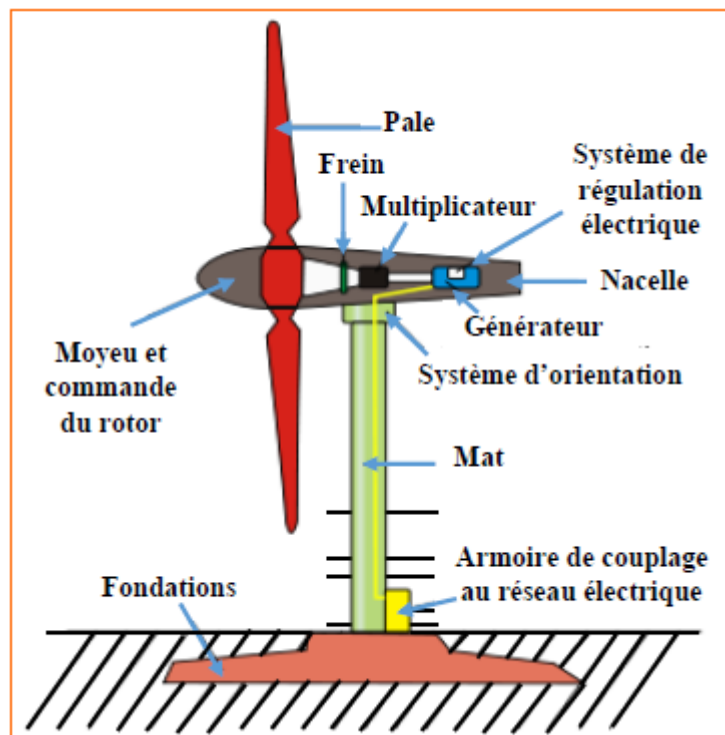
La vitesse du vent est mesurée un capteur de vent appelé anémomètre et qui est muni d'une girouette indiquant la direction du vent comme le montre la figure 1.2.



**Figure 1.2 :** Anémomètre avec girouette

## 2.2 Constitution de la turbine éolienne

Une éolienne est composée des trois parties essentielles (figure 1.3) : le mat, le rotor et la nacelle qui comporte l'ensemble multiplicateur-générateur. Les éoliennes sont conçues pour résister à de violentes tempêtes, produire de l'énergie dans des conditions météorologiques arctiques ou tropicales, en mer, à proximité des côtes ou en plein désert. Il existe un grand nombre de modèles destinés à remplir des exigences spécifiques. Les éoliennes peuvent être à axe vertical ou horizontal, comporter des rotors de 1 à 20 pales, avoir une capacité allant de quelques watts à plusieurs mégawatts, comporter ou non un multiplicateur, une génératrice à courant continu ou à courant alternatif. Il n'y a pas de modèle général, mais les éoliennes à trois pales face au vent sont les plus répandues.



**Figure 1.3 :** Principaux composants d'une éolienne

- **La nacelle**

La nacelle abrite toute la machinerie permettant le fonctionnement de l'éolienne. Avant d'être à même de pivoter pour suivre la direction du vent, elle est fixée au mât par des roulements (figure 1.3). La nacelle comporte le système de transmission constitué des éléments suivants : l'arbre du rotor avec roulement, le multiplicateur (absent sur les éoliennes à entraînement

direct), les freins, l'accouplement, la génératrice, l'électronique de puissance, le système de refroidissement-réchauffement et une petite grue.

La tâche du multiplicateur est de faire correspondre les vitesses de rotation entre le rotor à marche lente (18-50 T/min) et la génératrice à marche rapide (en général 1500 T/min). Les multiplicateurs possèdent ordinairement plusieurs étages leur permettant de s'adapter aux différentes conditions de vent.

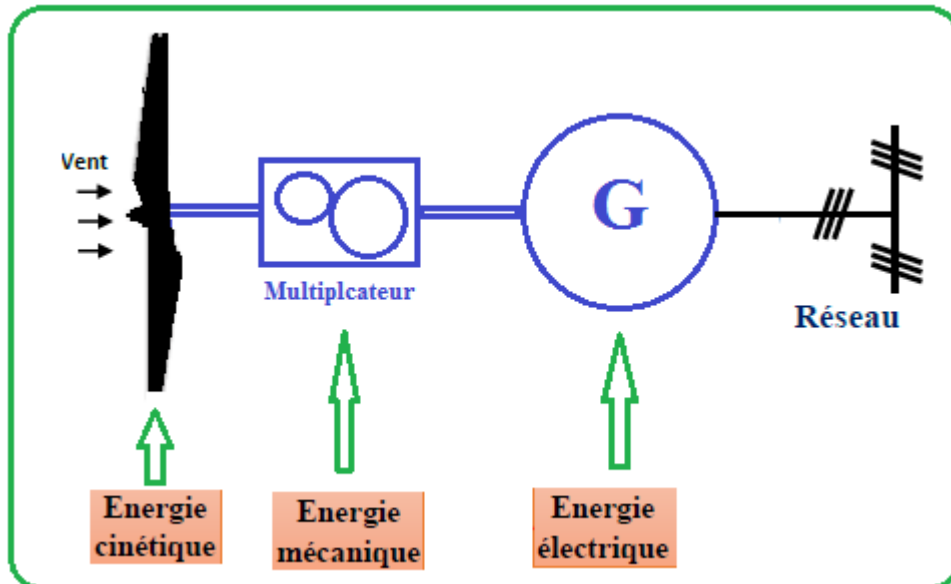
Il existe généralement deux types de freinage : les systèmes de freinage aérodynamique et les systèmes mécaniques.

- **Les pales du rotor**

Les pales du rotor extraient l'énergie du vent. Elles « capturent » ce dernier et convertissent son énergie motrice en rotation du moyeu. Le moyeu, en fonte ou en acier moulé, est le centre du rotor. C'est sur lui que sont fixées les pales. Il redirige l'énergie des pales vers la génératrice. Si l'éolienne est équipée d'un multiplicateur, le moyeu est connecté à l'arbre lent de ce dernier et l'énergie du vent est convertie en énergie de rotation. Si elle est en revanche à entraînement direct, le moyeu transfère l'énergie directement vers la génératrice.

La vitesse de rotation des pales de l'éolienne varie de 10 à 200 tr/min. Cette vitesse est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur couplé au rotor du générateur qui peut être lié directement ou indirectement au réseau électrique. S'il est lié directement (figure 1.18), le générateur tourne à vitesse fixe ou très faiblement variable en joue sur le glissement de la machine asynchrone.





**Figure 1.4 :** Chaîne de conversion de l'énergie éolienne avec intégration directe au réseau.

### 3 L'énergie biomasse

La production d'énergie électrique à partir des centrales thermiques à biomasse consiste à utiliser des combustibles d'origine organique renouvelables afin de produire de la chaleur pour entraîner une turbine. Bien que quelques petites installations soient présentes sur le réseau de distribution, les centrales à biomasse sont assez rarement considérées comme étant des Générations décentralisés puisqu'elles présentent majoritairement des puissances nominales supérieures à 12 MW et sont donc connectées sur le réseau de transport.

### 4 L'énergie hydraulique

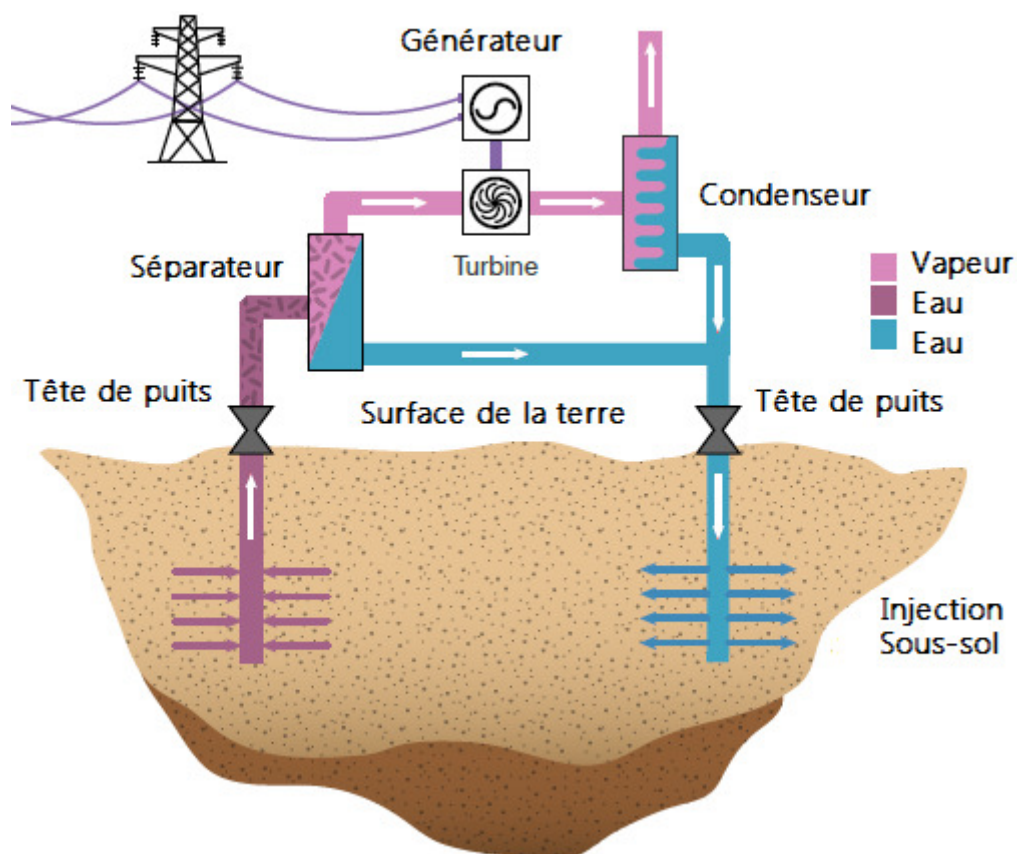
Les installations hydrauliques utilisent l'énergie potentielle de la pesanteur de l'eau. Ce sont le débit et la hauteur de la chute d'eau qui dimensionnent la puissance de l'installation. Les centrales hydroélectriques peuvent être dites « au fil de l'eau », elles privilégient alors le débit à la hauteur, ou au contraire, de type « chute d'eau » où la puissance sera d'avantage issue de la hauteur. La puissance des installations hydroélectriques varie fortement. Les installations assimilables à des GED sont appelées microcentrales hydrauliques. L'ordre de grandeur de leur puissance est de 5 MW.

### 5 L'énergie géothermie

La géothermie consiste à utiliser la chaleur des nappes d'eau souterraine pour entraîner une turbine. Fréquemment exploitée en cogénération chauffage / électricité, elle permet d'alimenter

un réseau d'eau chaude et de produire de l'électricité. Elle est beaucoup plus exploitée dans les pays à fort potentiel géothermique comme en Islande, où 30 % de la production d'électricité est d'origine géothermique ou encore aux Philippines avec 17%.

En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C).



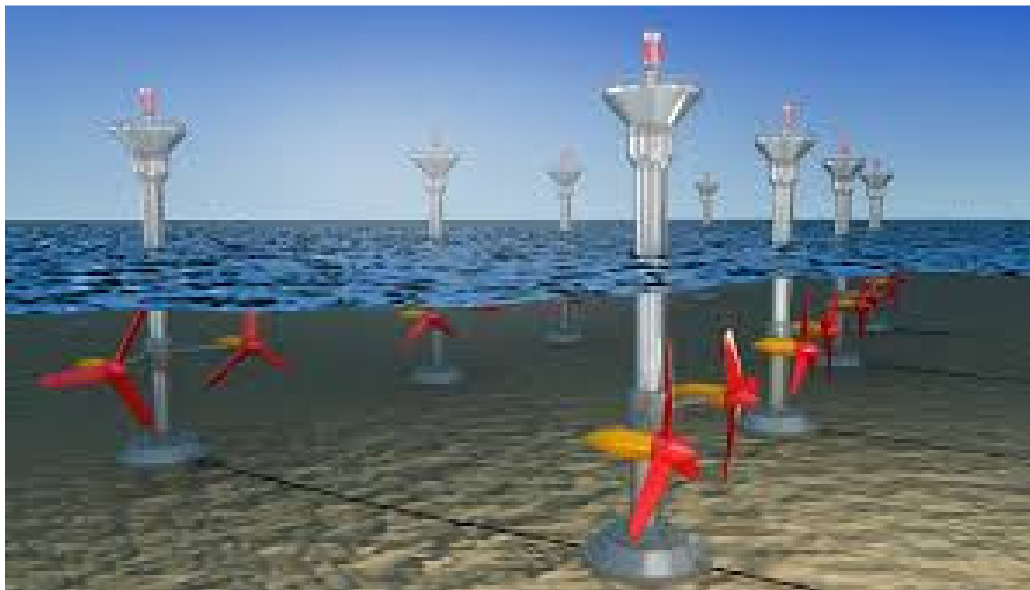
**Figure 1.5 : Énergie Géothermique**

## 6 Énergie marémotrice

L'énergie marémotrice comprend à la fois des barrages et des turbines marémotrices. Les barrages capturent le raz-de-marée à l'intérieur de grands enclos ouverts lorsque la marée monte

et se ferme à marée haute. Avec le retrait des marées, une tête se crée entre l'eau emprisonnée à l'intérieur du barrage et le niveau naturel de la mer à l'extérieur du barrage.

L'électricité est générée lorsque les niveaux d'eau sont égalisés par le biais de turbines à basse pression.

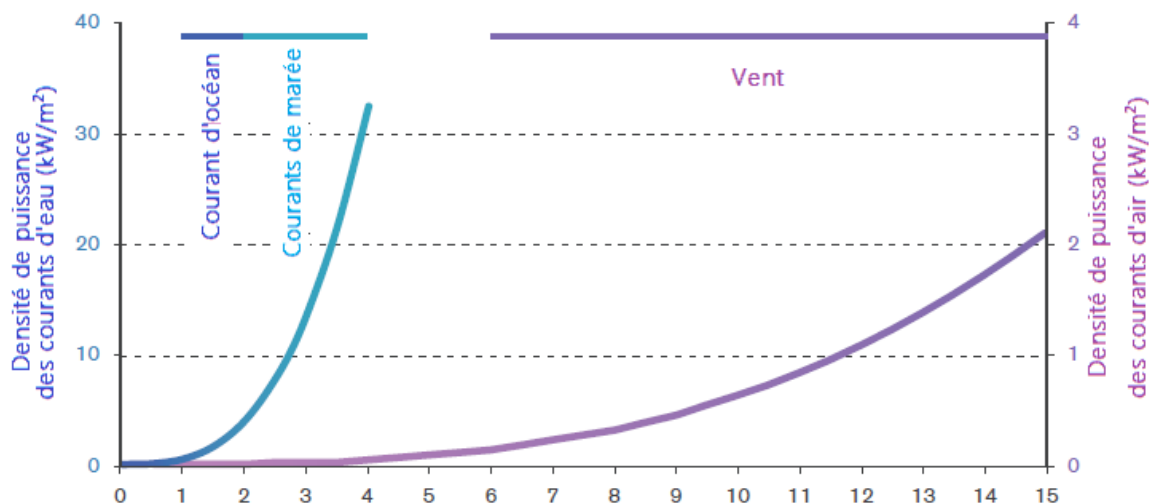


**Figure 1.6 : Énergie marémotrice**

La technologie des barrages marémoteurs est éprouvée depuis plus de 50 ans, mais seule une poignée de grands barrages ont été installés. Les barrages de marée impliquent une modification du régime de marée naturel, affectant inévitablement l'environnement local. L'impact des barrages de marée sur l'environnement a longtemps été considéré comme un obstacle majeur à l'extension de la technologie.

## **7 Énergie du courant océanique**

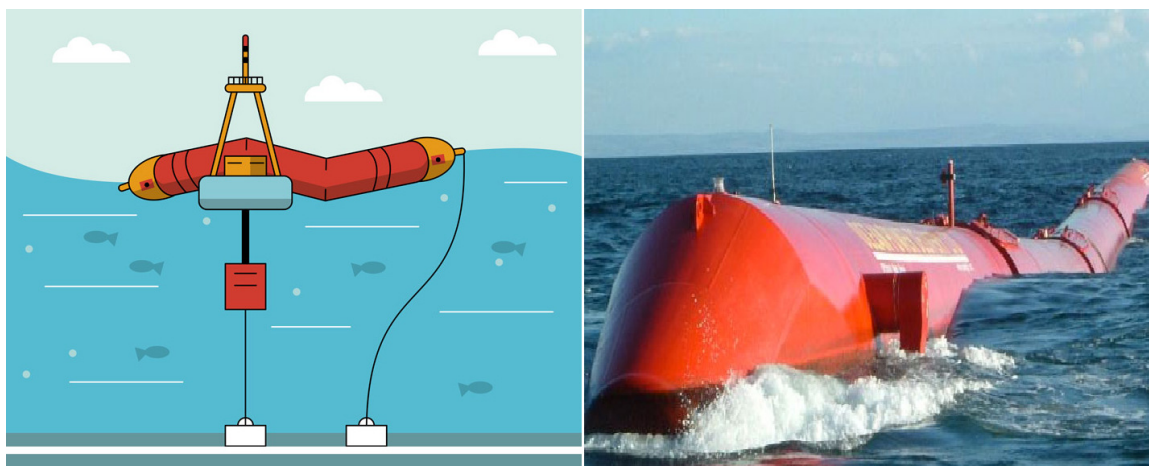
L'énergie du courant océanique, ou conversion de courant océanique, fonctionne fondamentalement selon des principes similaires à ceux du courant de marée, les turbines captant l'énergie du flux. Cependant, en raison de la faible densité énergétique des courants océaniques, les dispositifs de puissance doivent être très gros ou particulièrement ingénieux (figure 1.7) .



**Figure 1.8 :** Densité de puissance des courants d'eau et d'air en fonction de la vitesse du courant.

## 8 Énergie des vagues (énergie houlomotrice)

La puissance des vagues utilise des ondes de surface entraînées par le vent pour générer de l'électricité. Les nombreuses solutions techniques en cours de développement peuvent être classées comme des systèmes à colonne d'eau oscillante où les vagues mettent en pression des chambres à air et des turbines.



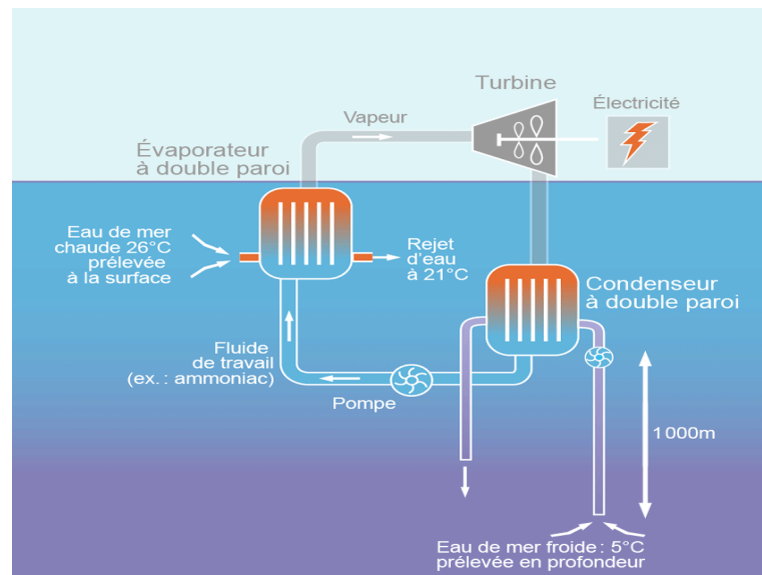
**Figure 1.9 :** Energie des vagues

Les dispositifs houlomoteurs peuvent être installés à terre, installés dans des eaux peu profondes ou ancrés dans des eaux plus profondes. Les unités de puissance houlomotrice

flottantes sont petites (<1 MW) mais destinées au déploiement en réseau. En tant qu'indicateur général, les dispositifs de puissance des vagues récupèrent environ un cinquième de l'énergie des vagues entrantes et certains sont plus généralistes que d'autres dans la capture de fréquences variables. La puissance de sortie est variable et subit des changements saisonniers et quotidiens, mais elle est généralement moins variable et plus prévisible que l'énergie éolienne. Les vagues à longue distance (houle), qui caractérisent les océans tropicaux, sont en grande partie adaptées aux variations à court terme et, partant, à la puissance des vagues autour des îles tropicales. Un problème courant pour les systèmes d'énergie houlomotrice, et en particulier pour les équipements off-shore, est d'être suffisamment sensible pour utiliser efficacement les vagues courantes et en même temps suffisamment robuste pour résister aux vagues extrêmes, mais puissantes. On peut s'attendre à ce que l'impact des vagues sur l'environnement soit limité, à moins que les centrales absorbent une proportion élevée de l'énergie des vagues entrante.

## **9 Energie thermique de l'océan**

Les océans et les mers couvrent approximativement 70% de la planète et captent l'énergie solaire de façon directe (rayonnement solaire) et indirecte (rayonnement réfléchi par l'atmosphère terrestre). Les rayons solaires sont absorbés par l'océan de façon optimale au niveau des zones intertropicales où ils touchent perpendiculairement la surface de l'eau. L'énergie solaire absorbée par l'eau diminue également avec la profondeur. La masse volumique de l'eau augmente avec la baisse de température, ce qui empêche les volumes d'eau froide des fonds océaniques de se mélanger avec les volumes d'eau chaude en surface. Des volumes d'eaux profondes et de surface peuvent être pompés et leur différentiel de température exploité afin de produire de l'électricité. Cette exploitation présente un intérêt en zone intertropicale où la température de l'eau reste uniformément proche de 4°C à une profondeur de 1 000 m tandis qu'elle est supérieure à 24°C en surface.



**Figure 1.10 :** Conversion de l'énergie de l'océan

# Chapitre 2

## La source solaire

### 2.1 Introduction :

Pour toute application de l'énergie solaire, il est indispensable de connaître de façon détaillée les caractéristiques de l'ensoleillement et du rayonnement sur le site géographique choisi. Ces caractéristiques qui constituent le gisement solaire peuvent être déduites des mesures régulières effectuées pendant plusieurs années par une station météorologique locale. Dans le cas où il n'existe pas de telles stations on peut extrapoler les mesures de stations voisines en utilisant une méthode de calcul fondée sur de corrélations statistiques. Les difficultés majeures des mesures du rayonnement solaire proviennent à la fois des fluctuations climatiques et du mouvement apparent du soleil au lieu d'observation. Certaines mesures, réalisées de façon continue nécessitent l'utilisation d'un suiveur solaire de même que toutes les installations à concentration. Il est donc important de bien connaître les lois qui régissent ce mouvement apparent et de voir leurs influences sur le rayonnement utilisable au sol.

### 2.2 Généralités sur le rayonnement solaire :

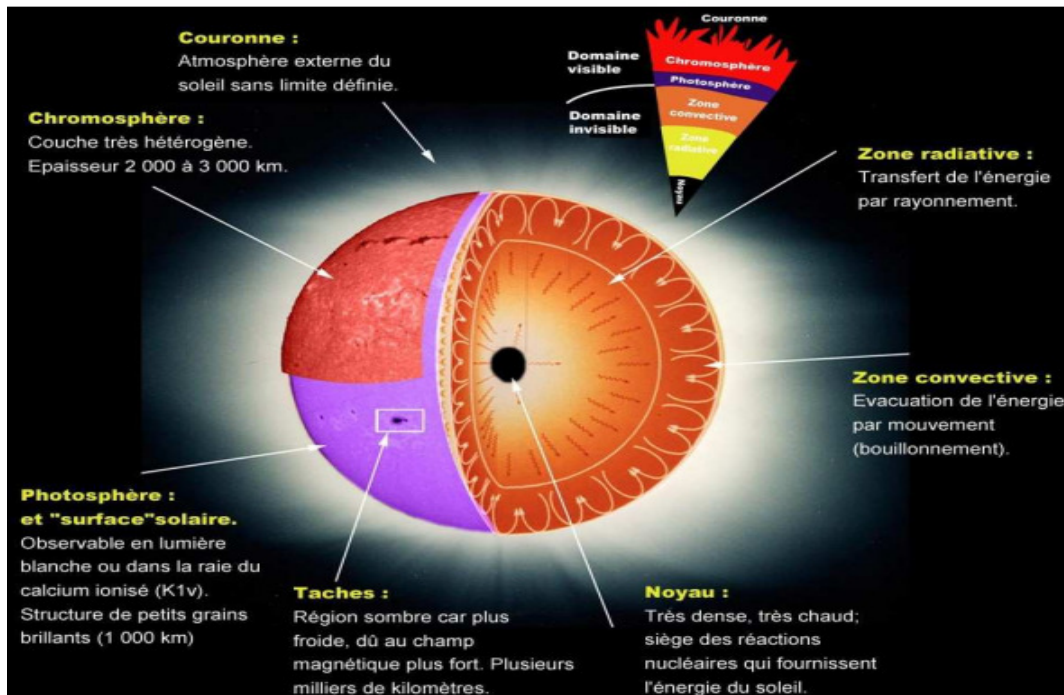
#### 2.3 Le soleil :

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus.

Il exerce sur notre planète une action vitale, véritable source de vie. Bien qu'il soit le centre du système qui porte son nom, le soleil n'est qu'une étoile parmi tant d'autres dans notre galaxie, sa lumière met 8 mn et 18 s pour parvenir sur terre.

#### 2.4 Les principales caractéristiques du soleil :

La figure montre les principales caractéristiques du soleil



**Figure 2.1:** Les principales caractéristiques du soleil

Ce tableau montre les principales caractéristiques du soleil :

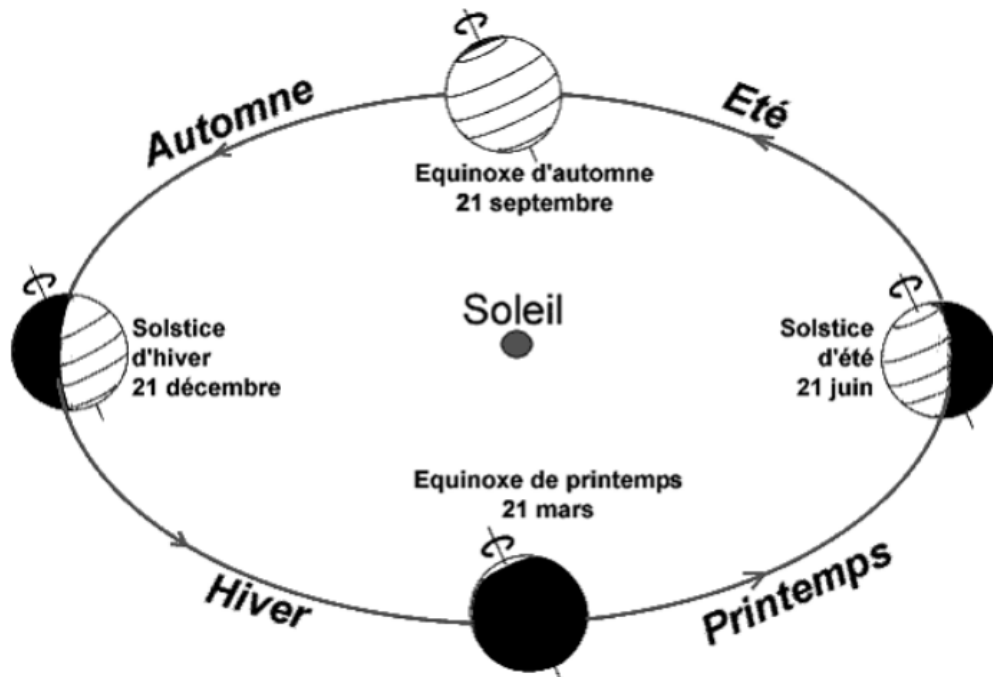
**Tableau 2.1 :** Les principales caractéristiques du soleil.

|                                     |                       |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Masse (kg)                          | $1,989 \cdot 10^{30}$ |
| Masse (Terre = 1)                   | 332 946               |
| Rayon équatorial (km)               | 696 000               |
| Rayon équatorial (Terre = 1)        | 109,12                |
| densité moyenne ( $\text{g/cm}^3$ ) | 1,410                 |
| Vitesse de libération (km/sec)      | 618                   |
| Luminosité (ergs/sec)               | $3,827 \cdot 10^{33}$ |
| Période de rotation (en jours)      |                       |
| au pôle en surface                  | 36                    |
| à l'équateur en surface             | 25                    |
| à l'intérieur partout               | 27                    |



## 2.5 Mouvements de la terre autour du soleil :

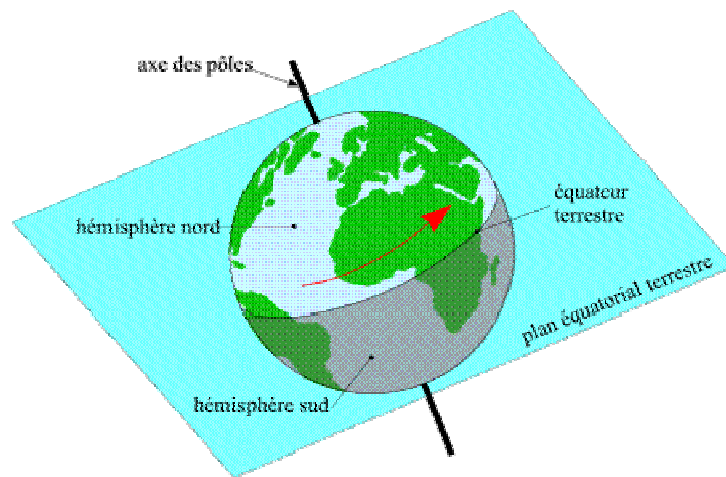
La trajectoire de la terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de 1,7% par rapport à la distance moyenne qui est de  $149.675 \times 10^6$  km.. Le mouvement de la Terre autour du Soleil est schématisé sur la figure I.2 .



**Figure 2.2:**Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.

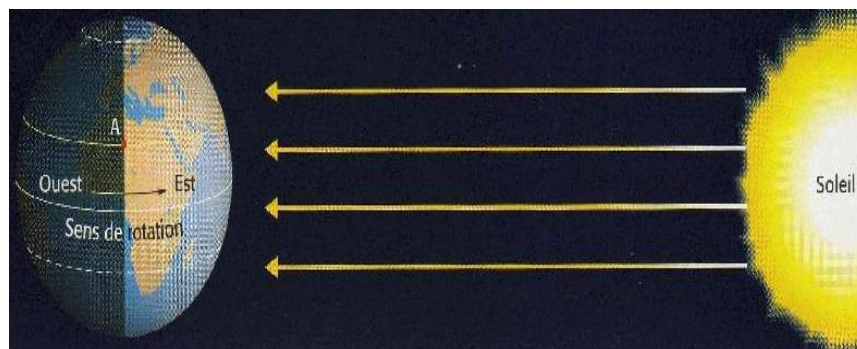
## 3.6 La terre tourne sur elle-même :

La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut  $23^{\circ}27'$  (figure 2.3). Si on l'observe depuis un point fixe de l'espace situé au Nord de l'équateur terrestre, on constate que la Terre tourne sur elle-même dans le sens anti-horloger, avec un axe de symétrie qui est perpendiculaire à l'équateur terrestre et qui passe par les pôles géographiques Nord sud.



**Figure 3.3:** Schématisation des mouvements de la Terre sur elle-même.

À cause de la forme presque sphérique de la Terre, l'énergie qui arrive à chaque instant ne frappe qu'un seul point de sa surface (appelé point sous-solaire) à un angle de 90 degrés. Tous les autres points de la surface éclairée de la Terre reçoivent les rayons du Soleil à des angles plus faibles, répandant ainsi cette énergie sur de plus grandes superficies de surface horizontale. Plus le Soleil est bas dans le ciel, moins la lumière solaire reçue est intense.



**Figure 2.4:** la surface éclairée de la Terre par les rayons du Soleil.

A chaque heure, la rotation est donc de  $15^\circ$  ( $360^\circ / 24\text{heures}$ ). Au cours de ce mouvement diurne, à une date donnée, un point A situé à la surface de la terre va donc successivement se trouver placé dans une situation particulière par rapport au soleil et voir son état d'éclairement modifié.

## 2.7 Constante solaire :

C'est le flux solaire moyen reçu par une surface plane orientée perpendiculairement aux rayons solaires en dehors de l'atmosphère terrestre, en ( $W / m^2$ ). Constante (qui varie peu dans le temps et l'espace). Les mesures effectuées par la NASA à bord des satellites avancent une valeur moyenne de  $1353 W / m^2$ . Certains ouvrages avancent la valeur de  $1390 W / m^2$  et d'autres  $1367 W / m^2$  (par Claus Frohlich et Cristoph Wehrli du centre radiométrique mondial). Si on adopte la valeur moyenne de  $I=1353 W / m^2$  ; l'énergie d'irradiation qui lui correspond en une journée (de 8 h) est égale à  $(1353 \times 8) = 10,824 W / m^2$ . Les mesures récentes faites à l'aide de radiomètres embarqués sur satellite (Nimbus 7, NOAA 10) ont permis de bien mettre en évidence les faibles variations de la constante solaire. Les mesures par satellite ont permis d'établir une formule empirique, d'une précision acceptable, donnant la constante solaire  $I$  en fonction du jour  $D_j$  de l'année :

$$I = 1353. (1 + 0.033 \cdot \cos(0.984 \cdot D_j)) \dots \dots \dots (2.1)$$

## 2.8 Les coordonnées célestes :

### 2.8.1 Les coordonnées géographiques :

Tout point de la surface terrestre est repéré par ses coordonnées géographiques : longitude et latitude. Figure 2.5:

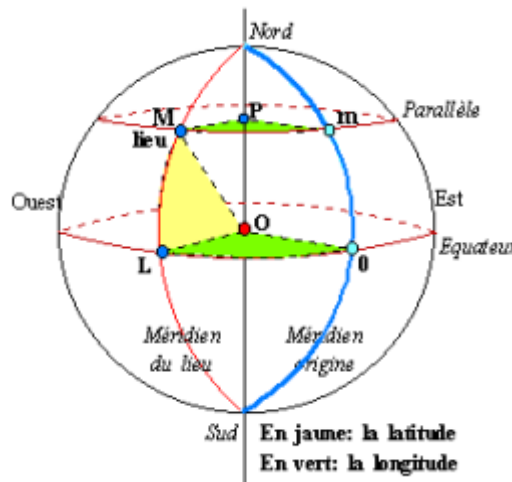


Figure 2.5: Coordonnées géographiques

#### 2.8.1.1 La longitude :

Il correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien origine  $0^\circ$  le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention, on affecte le signe (+) les méridiens situés à l'Est

de ce méridien, et de signe (-) les méridiens situés à l'Ouest. La longitude sera désignée ici par la lettre (l), elle peut ainsi être comprise entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ .

### 2.8.1.2 La latitude :

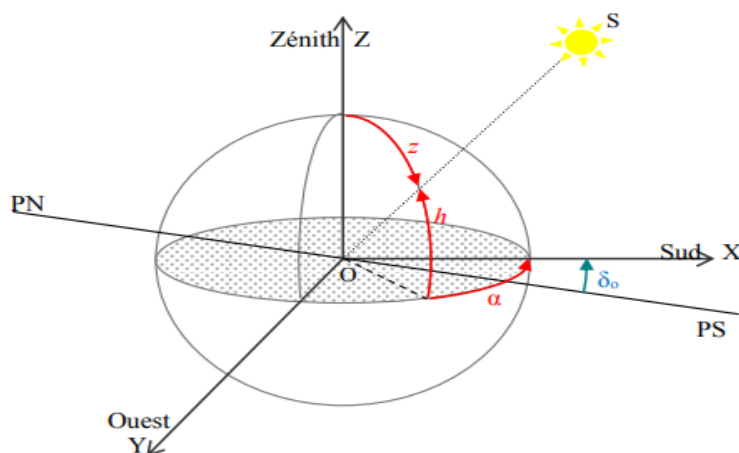
Il correspond à l'angle que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu, avec le plan équatorial. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à  $0^\circ$ , le pôle nord par la latitude  $+90^\circ$  et le pôle sud par la latitude  $-90^\circ$ . Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude sera désignée ici par la lettre ( $\varphi$ ). Elle peut ainsi être comprise entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$ .

## 2.8.2 Les coordonnées horizontales :

### 2.8.2.1 Hauteur

Angle compris entre l'horizon astronomique et l'axe issu du point considéré au soleil. Il est compté de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  si le soleil se trouve dans l'hémisphère Nord (Zénith) et de  $0$  à  $-90^\circ$  si le soleil se trouve dans l'hémisphère Sud (Nadir) :

$$\sin(h) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \dots \dots \dots (2.2)$$



**Figure 2.6:** Système local de coordonnées azimutales.

### 2.8.2.2 L'azimut $\alpha$ :

C'est l'angle entre la projection de la direction du soleil (OS), sur le plan horizontal et le Sud, il est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est. En pratique on exprime l'angle ( $\alpha$ ) en fonction de la hauteur du soleil, la déclinaison et l'angle horaire du soleil :

$$\sin(\alpha) = (\cos(\delta) \sin(\omega)) / \cos(h) \dots \dots \dots (2.3)$$

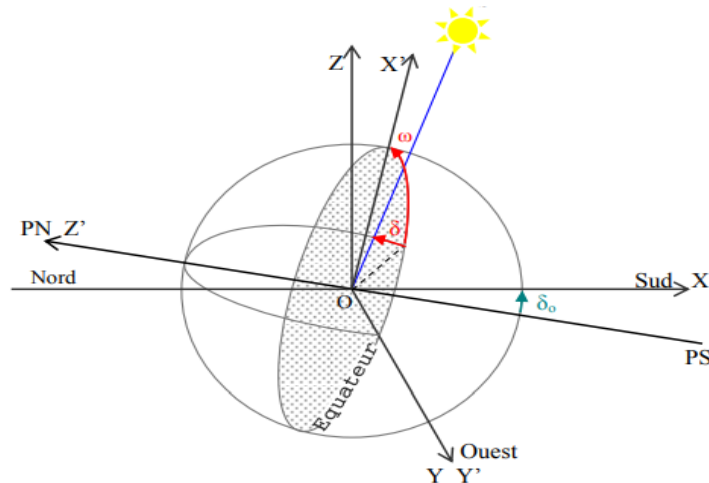
Et si l'on souhaite exprimer l'azimut indépendamment de la hauteur h, on peut utiliser la formule :

$$tg(\alpha) = \frac{\sin(\omega)}{\sin(\varphi)\cos(\omega) - \cos(\varphi)tg(\delta)} \dots\dots\dots(2.4)$$

Les angles (h) et ( $\alpha$ ) varient au cours de la journée à cause de la rotation de la terre sur elle-même, c'est pour cette raison qu'un second système de coordonnées a été défini et axé sur la direction des pôles, c'est le système des coordonnées horaires :

Le trièdre de référence de ce système est celui représenté sur la figure (I.7) :

- OX' dans le plan (OX, OZ) est perpendiculaire à OZ'.
- OY' vers l'ouest.
- OZ' vers le pôle nord.



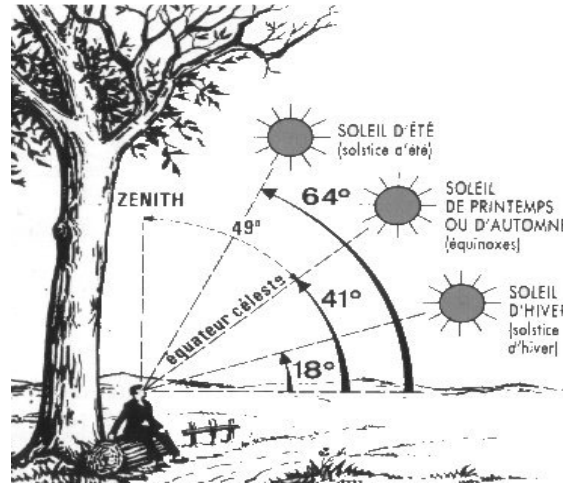
**Figure 2.7 :** Système de coordonnées horaires.

## 2.9 Les coordonnées horaires :

### 2.9.1 Déclinaison ( $\delta$ ) :

Angle entre la direction terre soleil et le plan équatorial de la terre ou bien la latitude du lieu où le soleil est à la verticale à midi solaire. Cet angle varie de  $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver à  $23^{\circ}27'$  au solstice d'été et il est nul aux équinoxes. La déclinaison, qui est fonction du jour de l'année est définie par son quantième (Dj), pour le premier janvier Dj = 1 et ainsi de suite. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\delta = 23.45 \sin[0.986(284 + Dj)] \dots\dots\dots(2.5)$$

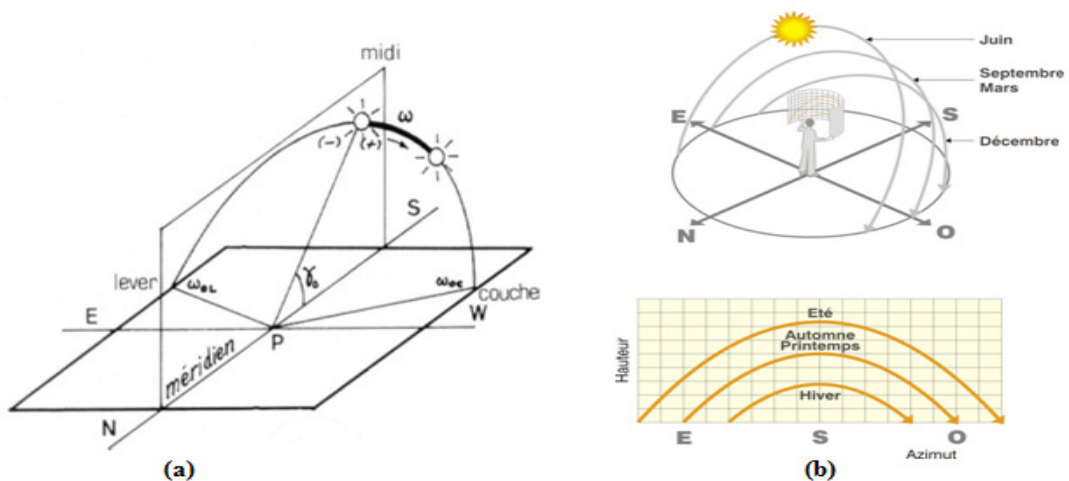


**Figure 2.8:** Déclinaison du soleil en degré et en fonction de la saison de l'année.

### 2.9.2 L'angle horaire ( $\omega$ ) :

L'angle horaire est formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu. Au midi solaire l'angle horaire ( $\omega$ ) est égal à  $0^\circ$  ensuite chaque heure correspond à  $15^\circ$  car la terre effectue un tour complet ( $360^\circ$ ) sur elle-même en 24 heures. L'angle ( $\omega$ ) est compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir (négative du lever du soleil au midi solaire et positive du midi solaire au coucher du soleil).

$$\omega = 15 \times (TSV - 12) \dots \dots \dots (2.6).$$



**Figure 2.9 :** Trajectoire apparente du soleil, (a) Angle horaire  $\omega$  du soleil, (b) principe de la carte de trajectoire du soleil .

## 2.10 Temps solaires:

### 2.10.1 Temps solaire vrai :

On appelle " Temps Solaire Vrai " (en abrégé TSV) en un lieu et à un instant donné, l'angle horaire du Soleil en ce lieu et à cet instant .C'est une notion qui traduit à la fois le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même et son mouvement autour du Soleil. Son introduction est naturelle, car il est lié à l'alternance des jours et des nuits. C'est le TSV qui est indiqué sur les cadrans solaires.

La définition de TSV donnée ci-dessus est la définition en Astronomie. En physique, on prend, par commodité,  $TSV = 12h$  pour la valeur nulle de l'angle horaire (c'est-à-dire à midi). C'est cette dernière définition que nous utiliserons par la suite.  $TSV = 12 + (w/15)$  en heures.

### 2.10.2 Temps solaire moyen :

La vitesse de la Terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année. Pour avoir un temps qui " s'écoule " à vitesse constante (celui mesuré par les horloges), on définit donc un temps solaire moyen. Historiquement, la journée solaire moyenne a été utilisée pour définir les unités de temps. On a encore avec une bonne précision ,  $1 \text{ jour} = 24h \ 00m \ 00s$ .

L'écart entre TSV et TSM varie selon la date, mais est nul en moyenne, par définition.

L'expression de cet écart porte le nom de " Equation du temps ".

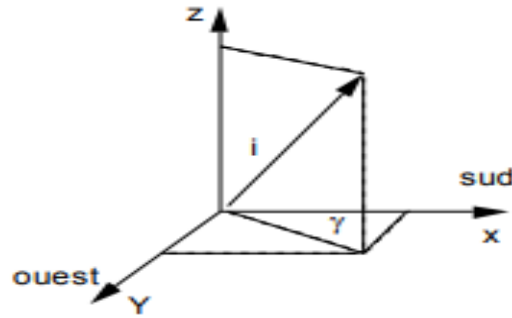
## 2.11 Angle d'incidence du rayonnement solaire direct

La question est donc de calculer l'angle ( $\theta$ ) entre un rayon arrivant directement du soleil et la normale à un plan quelconque (souvent ce plan représente la face avant réceptrice du rayonnement solaire (insolateur par exemple). L'orientation du capteur solaire est définie par :

**a) son inclinaison( $i$ )** : Angle que fait le capteur avec le plan horizontal.

**b) son orientation ( $\gamma$ )** : Angle que fait la normale à la surface du capteur et le plan méridien.

$$\cos(\theta) = \cos h \sin i \cos(\gamma - \alpha) + \cos i \sin h \dots\dots\dots (2.7)$$



**Figure 2.10:** Orientation et inclinaison d'un plan quelconque

$\gamma > 0$  vers l'ouest

$\gamma < 0$  vers l'est

$\gamma = 0$ , direction sud

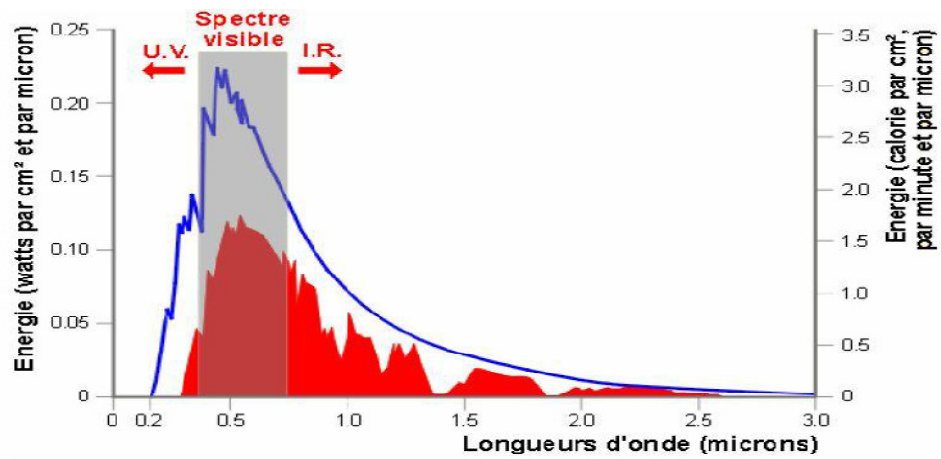
Au cours d'une journée ( $\theta$ ) est minimale au midi solaire vrai où l'angle ( $\omega$ ) est égal à  $0^\circ$ . Pour une exploitation optimale du rayonnement solaire, la surface de captage devrait toujours être orientée autant que possible perpendiculairement au rayonnement. Toutefois comme la position du soleil par rapport à la terre varie continuellement au cours d'une journée et d'une année, l'angle d'incidence du rayonnement sur le capteur (fixé sur un socle ou sur une toiture) varie également.

### 2.11 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques varie de  $0.22 \mu\text{m}$  à  $10 \mu\text{m}$ . En dehors de l'atmosphère terrestre, il donne un éclairement énergétique à peu près constant et égale à  $1367 \text{w/m}^2$ , appelé de ce fait constante solaire. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $< 0,4 \mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible ( $0,4$  à  $0,8 \mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges ( $> 0,8 \mu\text{m}$ ).





**Figure 2.11:** Répartition spectrale de rayonnement solaire.

## **2.12 Types de rayonnements:**

### **2.12.1 Rayonnement direct:**

Le rayonnement direct est reçu directement du sol, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre elle. Et définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

### **2.12.2 Rayonnement diffus :**

Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit.

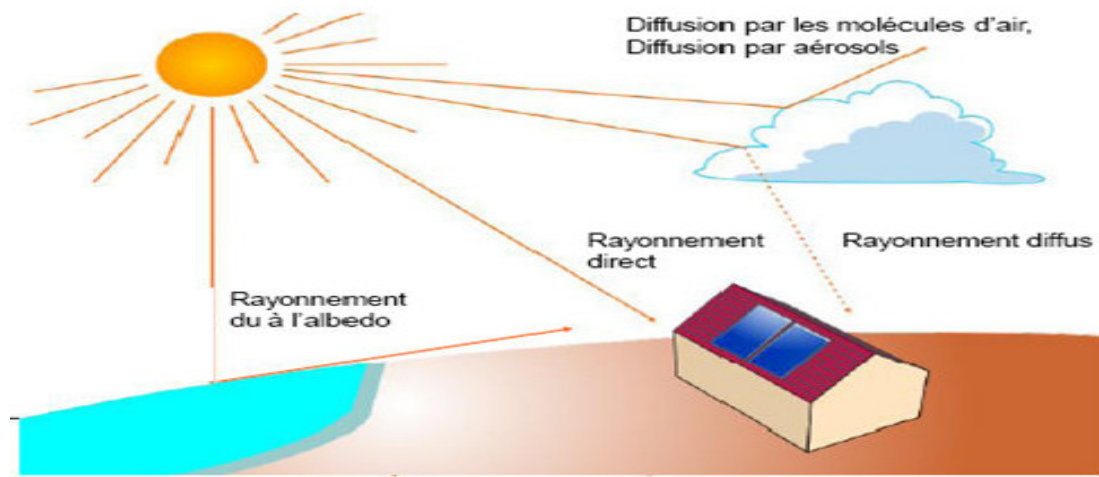
### **2.12.3 Rayonnement l'albédo :**

C'est la partie réfléchié par le sol. Il dépend de l'environnement du site.

### **2.12.4 Rayonnement global :**

Il comprend l'ensemble des composants direct et diffus. Il est mesuré à l'aide d'un pyranomètre. Donc d'après les différentes formes du rayonnement on peut déduire la formule du rayonnement global :

$$\text{Rayonnement global} = \text{Rayonnement direct} + \text{Rayonnement absorbé} + \text{Albédo}.$$

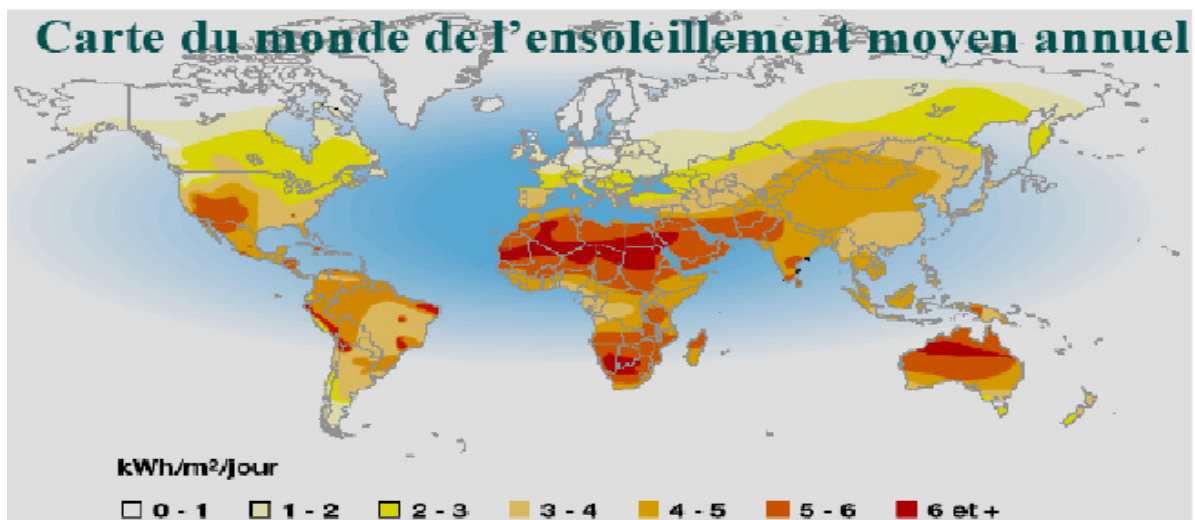


**Figure 2.12:** Rayonnement solaire.

### 2.13 Le gisement solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire .

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure (2.13) :



**Figure 2.13 :** Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.

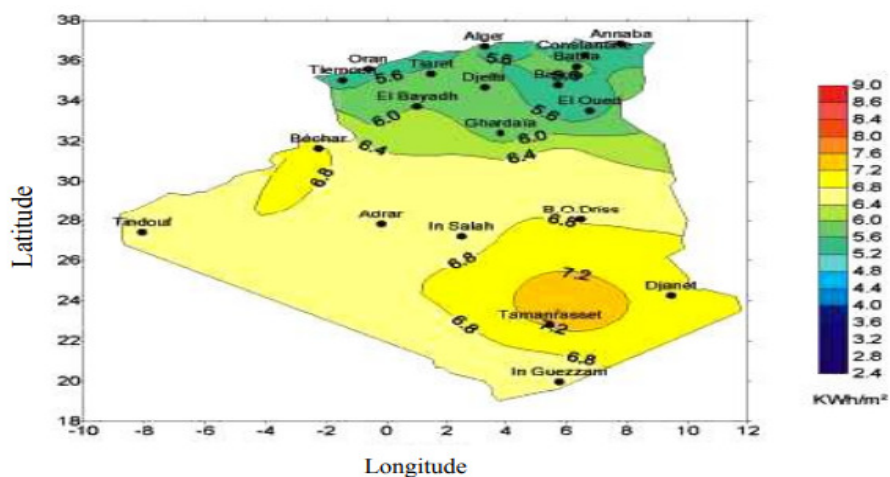
Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le

potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau (2.2) selon l'ensoleillement reçu annuellement .

**Tableau 2.2 :** La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire Algérien.

| Régions                                        | Régions côtières | Hauts plateaux | Sahara |
|------------------------------------------------|------------------|----------------|--------|
| Superficie(%)                                  | 4                | 10             | 86     |
| Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)          | 2650             | 3000           | 3500   |
| Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an) | 1700             | 1900           | 2650   |

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale . La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figure I.14).



**Figure 2.14:** Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu .

### 2.14 Spécification du site d'El-Bayadh:

Pour le site d'El-Bayadh, les spécifications sont données par les grandeurs météorologiques suivantes .

**Tableau (3.3) :** Spécifications du site d'El Bayadh.

|                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| Latitude : 33.680278 | Longitude : 1.020278 |
| Altitude : 1313 m    | Albédo :             |
| 33 40'49'' Nord      | 1' 13'' EST          |

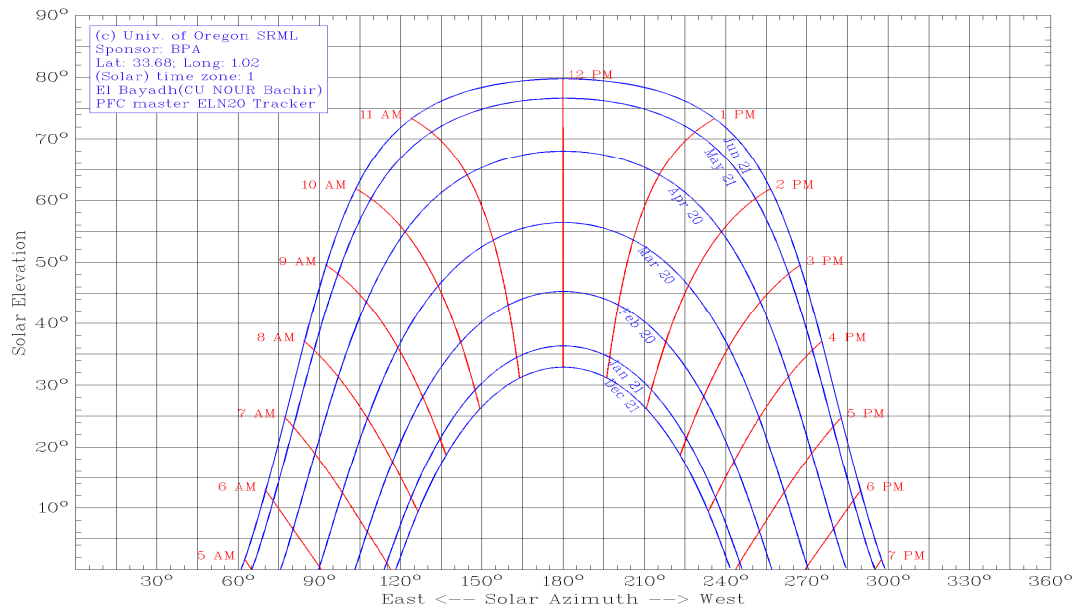
### 2.15 La carte de la trajectoire solaire d'El Bayadh :

La carte de la Figure 2.16 est réalisée à partir d'un programme Web de l'université d'Oregon disponible sur le lien suivant :

<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>

Ce programme crée des cartes de trajectoire du soleil en coordonnées cartésiennes pour un site spécifique:

- (1) les dates "typiques"
- (2) de chaque mois (c'est-à-dire; les jours recevant environ la quantité moyenne de rayonnement solaire pour une journée du mois donné);
- (2) des dates espacées d'environ 30 jours, d'un solstice à l'autre; ou
- (3) une seule date que vous spécifiez. Vous pouvez choisir si les heures sont tracées en utilisant l'heure standard locale ou l'heure solaire. De plus, plusieurs options sont disponibles pour vous permettre de modifier l'apparence du graphique.



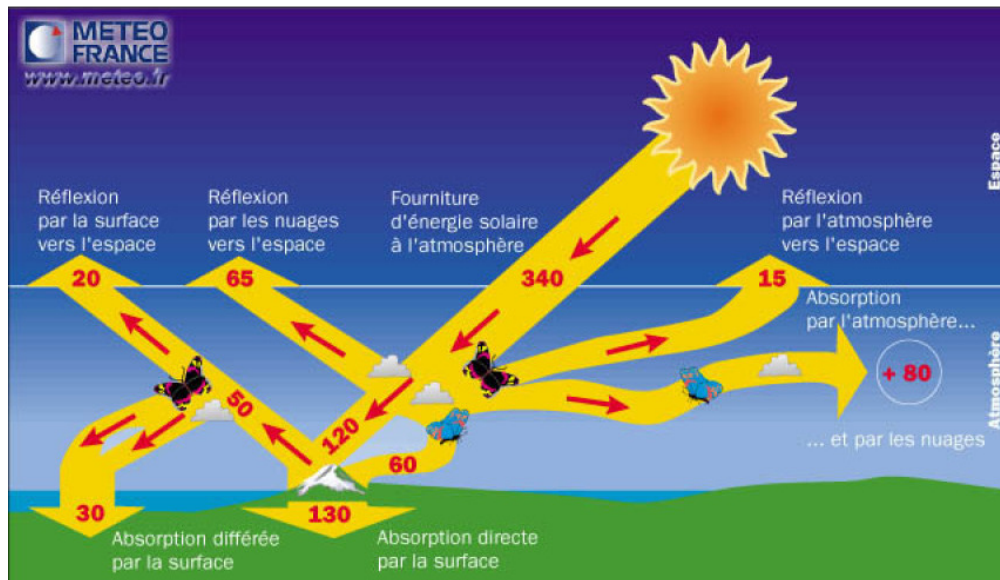
**Figure 2.15:** La carte de la trajectoire solaire d'El Bayadh.

## 2.16 La Conversion d'énergie solaire:

L'énergie solaire est l'énergie rayonnée par le soleil. Cette énergie est à l'origine de nombreux phénomènes physiques tels que la photosynthèse, le vent ou le cycle de l'eau. Elle vient de la fusion nucléaire se produisant au cœur du soleil.

L'énergie solaire circule dans l'espace sous forme d'un rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est composé de photons, petites particules d'énergie élémentaires. Cette énergie a connue quelques techniques de transformation selon les besoins. Actuellement.

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil et parvenant à la surface de la Terre, après filtrage par l'atmosphère terrestre ( voir figure 2. 16).

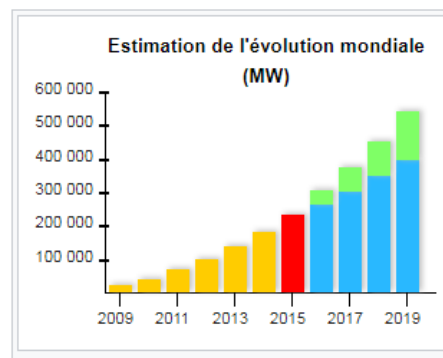


**Figure 2.16 : L'énergie émise par le soleil**

Les techniques pour capter une partie de cette énergie (énergie absorbée par la terre) sont disponibles et sont constamment améliorées. On peut distinguer le solaire passif, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique. Le type qui nous intéresse c'est l'énergie solaire photovoltaïque.

### 2.17 Évolution de l'utilisation de l'énergie solaire :

Au cours de la dernière décennie, l'énergie solaire PV a monté son énorme potentiel. La quantité de puissance PV installée a rapidement augmenté. Actuellement, la puissance PV installée à l'échelle mondiale est d'environ 500 GW. La figure I.16 montre la puissance PV installée cumulée.



**Figure 2.17 : Evolution de la Capacité mondiale d'énergie solaire photovoltaïque.**

# Chapitre 3

## La source photovoltaïque

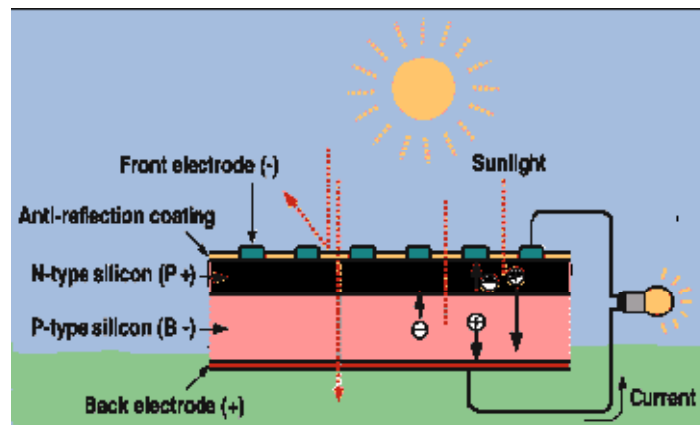
### 3.1 Définition :

La cellule photovoltaïque est le composant électronique à la base des installations produisant l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire. Elle fonctionne selon le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles pour former ce qu'on appelle un module solaire photovoltaïque, par la suite, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation ou même une centrale solaire.

### 3.2 Principe de fonctionnement :

L'absorption d'un photon par un semi-conducteur donne naissance à une paire électron-trou lorsque son énergie est supérieure à celle de la largeur de la bande interdite du matériau. Le champ électrique interne à la jonction, entraîne alors le trou vers la région P et l'électron vers la région N.

Par dopage du semi-conducteur de région de type P et de type N ; La cellule solaire est donc une jonction P-N avec des diverses parties représentées sur le schéma de la figure suivante :



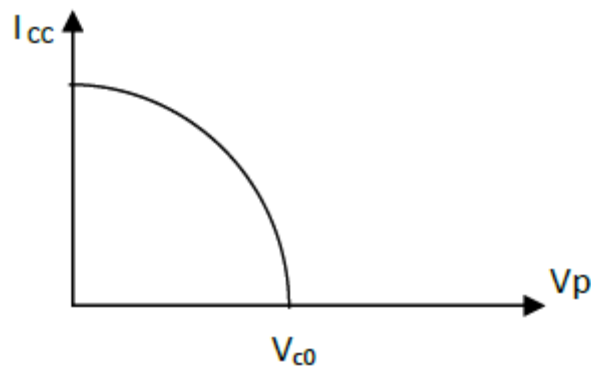
**Figure 3.1 :** Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.



**Figure 3.2:** Cellule photovoltaïque

Lorsqu'un photon vient frapper la zone de transition, il arrache un électron à l'atome de Silicium qui va se déplacer du côté N, tandis que le « trou » ainsi créé par cet arrachement va se déplacer du côté P. Il apparaît ainsi aux bornes du dispositif, une différence de potentiel. Si on ferme la cellule sur un circuit extérieur, un courant circule. La cellule qui se comporte comme une pile sensible aux photons (c.à.d. à la lumière) s'appelle des photopiles. Le défaut principal des photopiles reste la limitation de leur rendement, il est de l'ordre de 12% pour une cellule de Silicium monocristallin.

Une cellule photovoltaïque représentée par la caractéristique  $I_p = f(V)$  peut être schématisée comme suit :



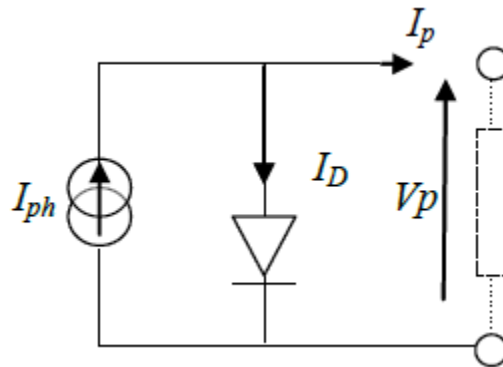
**Figure 3.3 :** la caractéristique Courant-tension d'une cellule PV au Silicium.

### 3.2.1 Modèle de la cellule PV

Expression mathématique caractérisant la relation courant-tension ( $I - V$ ) des cellules PV est issue de la théorie des semi-conducteurs. L'équation de base qui décrit analytiquement la caractéristique  $I - V$  de la cellule PV idéale est dérivée des solutions des équations de diffusion des porteurs minoritaires. En particulier, ces solutions peuvent être utilisées pour évaluer les équations de densité de courant des porteurs minoritaires. Le modèle de circuit de la cellule PV



repose sur l'hypothèse de linéarité, c'est-à-dire sur l'hypothèse selon laquelle le courant traversant la cellule PV est la superposition de deux courants, l'un dû à la polarisation de la jonction et l'autre à l'éclairage de la lumière. Le courant total de la cellule PV est obtenu par la relation suivante:



**Figure 3.4 :** Modèle équivalent simple à une diode d'une cellule PV au Silicium.

La caractéristique électrique d'une diode est régie par :

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right) \dots \dots \dots (3.1)$$

Le courant dans une cellule PV est donnée par :

$$I_p = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_S \left( e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right) \dots \dots \dots (3.2)$$

$I_p$  : courant fournie par une cellule (A) .

$I_{ph}$  : photo courant (A).

$I_D$  : courant diode (A).

$I_S$  : courant inverse de la jonction PN.

$V_p$  : tension aux bornes de la cellule (V).

$V_T = K.T/q$  : potentielle thermique.

$q$  : charge électrique élémentaire (C).

$k$  : constante de Boltzmann,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ .

$T$  : température en  $^\circ\text{K}$ .

Comme il existe un model à deux diodes qui tient repose sur des solutions pouvant être utilisées pour évaluer les équations de densité de courant des porteurs minoritaires. Le modèle de circuit de la cellule PV repose sur l'hypothèse de linéarité, c'est-à-dire sur l'hypothèse selon laquelle le courant traversant la cellule PV est la superposition de deux courants, l'un dû à la

polarisation de la jonction et l'autre à l'éclairage de la lumière. Le courant total de la cellule PV est obtenu par la relation suivante:

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (3.3)$$

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_{s2} \left( e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

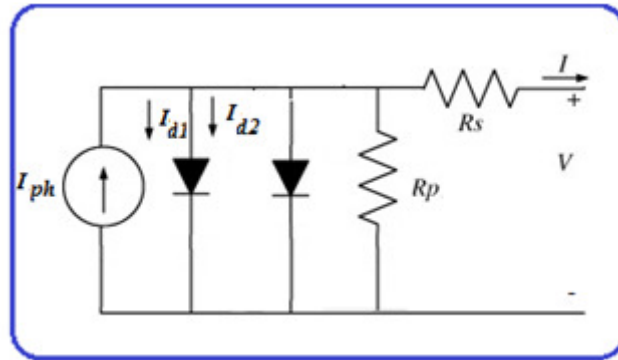
$I_{s1}$  est le courant de saturation sombre dû à la recombinaison dans la région quasi neutre (diffusion).

$I_{s2}$  est le courant de saturation dans l'obscurité dû à la recombinaison dans la région de charge d'espace.

$I_{ph}$  est le courant photo-généré, linéairement en fonction de l'irradiance solaire.

Un tel modèle ne tient pas compte non plus des mécanismes de perte se produisant dans la cellule du fait du ruban métallique assurant la continuité du courant entre chaque cellule et les deux cellules avant et après dans la séquence, ni des caractéristiques de diffusion et de recombinaison des porteurs de charge dans le semi-conducteur. Telles pertes sont introduites dans le modèle en ajoutant une résistance série  $R_s$  et une résistance parallèle  $R_p$  afin de prendre en compte les résistances internes des cellules et les résistances de contact, ainsi que l'effet des courants de fuite, respectivement.

En conséquence, le modèle devient celui illustré à la figure 3.5.



**Figure 3.5 :** Modèle de la cellule PV à deux diodes

Une expression plus complexe en tant que caractéristique I-V résultante décrivant le circuit équivalent représenté à la figure 3.5 est exprimée par l'équation.1.3.

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left( e^{q \frac{V+IR_s}{\eta kT}} - 1 \right) - I_{s2} \left( e^{q \frac{V+IR_s}{\eta_2 kT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (3.5)$$

Où :

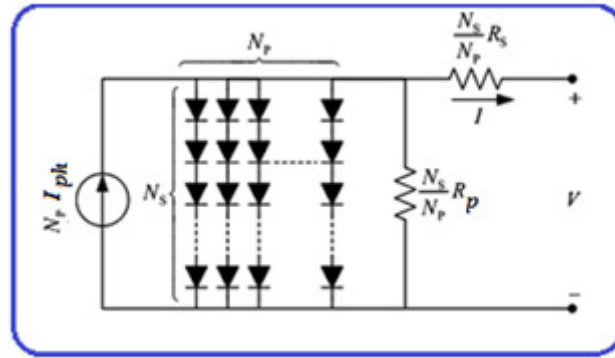
$\eta$  : est le facteur d'idéalité

En condition de fonctionnement, lorsque le rayonnement solaire se produit, le courant du générateur passe à travers les diodes et une tension apparaît aux bornes. Si aucune charge n'est appliquée, cette tension est une tension de «circuit ouvert», c'est-à-dire la tension d'une jonction PN directement polarisée et la valeur maximale pouvant être atteinte par une cellule photovoltaïque. Si une charge est connectée, une partie du courant du générateur circule dans la charge, la tension diminue et de l'énergie électrique est fournie à la charge. Le processus de conversion est terminé.

À partir du rayonnement solaire, de l'énergie électrique a été obtenue. Il convient de noter que si la charge est augmentée (cela correspond à une résistance plus faible), le courant augmente également et la tension diminue; la puissance fournie atteint un maximum puis diminue jusqu'à la condition de court-circuit.

### 3.2.2 Modélisation du module PV et du champ PV

En supposant que toutes les cellules sont égales et qu'elles fonctionnent dans les mêmes conditions de fonctionnement, toutes les tensions seront multipliées par  $N_s$ , s'il s'agit du nombre de cellules connectées en série, et tous les courants sont multipliés par  $N_p$ , si c'est le nombre de chaînes connectées en parallèle comme illustré à la figure 3.6.



**Figure 3.6 :** Modèle du champ PV

En conséquence, la résistance série  $R_s$  et la résistance parallèle  $R_p$  augmentent d'un facteur  $N_s$  et sont divisées par un facteur  $N_p$  et on obtient les équations suivantes :

$$I = I_{ph, champ} = N_p \cdot I_{ph} \quad (3.6)$$

$$R_{s, champ} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s \quad (3.7)$$

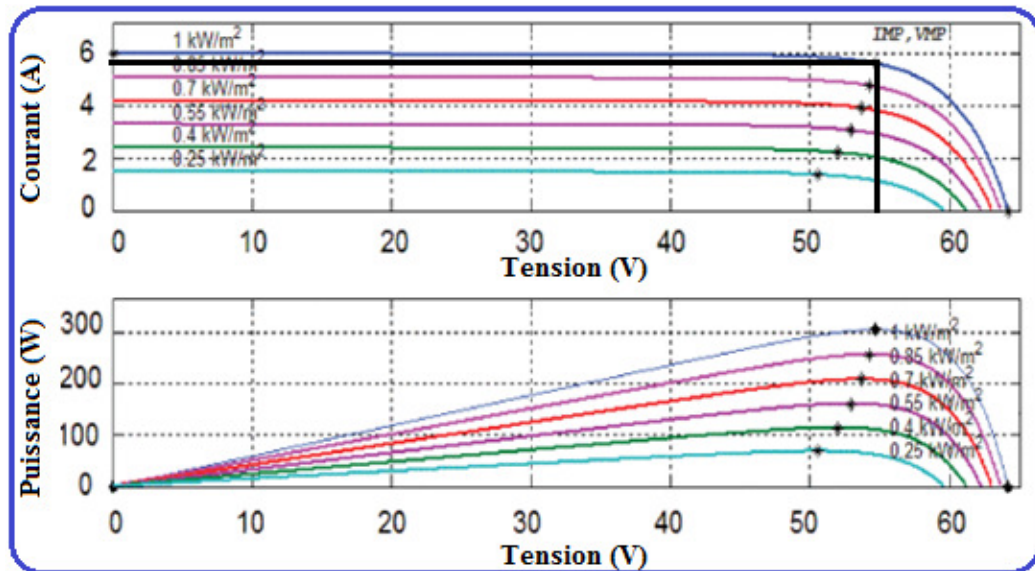
$$R_{p,champ} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_p \quad (3.8)$$

### 3.3 Principe du système de poursuite du point de puissance maximale MPPT

Le système contrôleur MPPT pointe sur le point de puissance maximale (MPPT), qui est un convertisseur CC-à-CC à haut rendement qui fonctionne comme charge électrique optimale pour une cellule photovoltaïque (PV), le plus souvent pour un panneau solaire ou un champ photovoltaïque, et qui convertit la puissance en un niveau de tension ou de courant plus adapté à la charge. Les cellules PV ont un seul point de fonctionnement où les valeurs du courant (I) et de la tension (V) de la cellule génèrent une puissance de sortie maximale. Cette puissance de sortie est nulle à la fois aux points de courant de court-circuit  $I_{sc}$  et de tension ouverte  $V_{oc}$  puisque la tension de sortie et le courant de sortie sont à zéro, respectivement, dans ces deux cas.

Entre ces deux points extrêmes, la puissance générée par la cellule photovoltaïque est positive.

Un point remarquable de la caractéristique électrique de la cellule PV est le point où la puissance produite est maximale. Ce point est appelé point de puissance maximale (MPP) et la tension et le courant correspondants sont indiqués en tant que  $V_{MP}$  et  $I_{MP}$ , en règle générale. La figure 1.9 montre la caractéristique I – V du module photovoltaïque avec les points de court-circuit, de tension ouverte et de puissance maximale mis en évidence.



**Figure 3.7 :** Caractéristique I-V et P-V du module PV sous différents niveaux de rayonnement solaire à 25°C avec des points MPPT

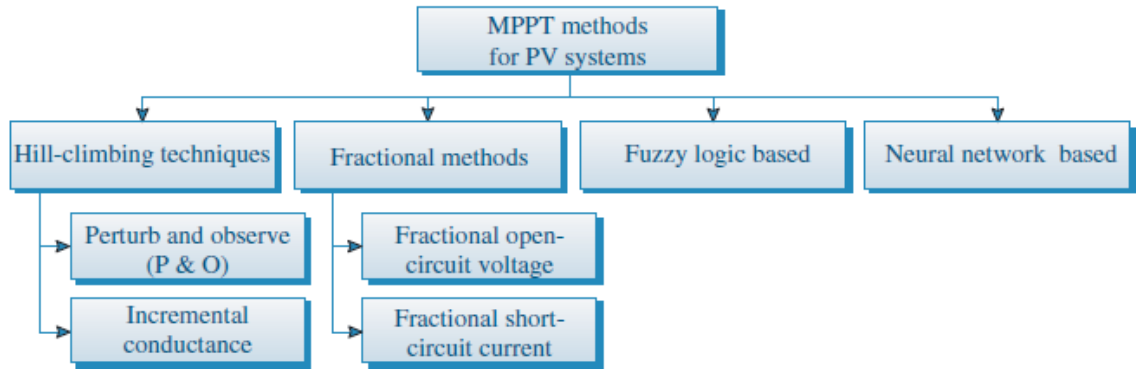
Comme illustré à la figure 3.7, le MPP définit le rectangle dont l'aire,  $P_{MP} = V_{MP} I_{MP}$ , est la plus grande pouvant être obtenue pour tout couple I – V de la caractéristique Module. Les coordonnées du  $V_{MP}$  sont trouvées par:

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_{MP}} = \left. \frac{d(IV)}{dV} \right|_{V=V_{MP}} = \left( I + \frac{dI}{dV} \right) \Big|_{V=V_{MP}} = 0 \quad (3.9)$$

Ensuite,  $I_{MP}$  est déterminé en évaluant l'Eq.1.7 pour  $V = V_{MP}$ .

### 3.4 Contrôle de conversion de puissance photovoltaïque

Plusieurs méthodes différentes sont décrites dans la littérature pour les contrôleurs du point de puissance maximale (MPPT), certaines d'entre elles sont très proches l'une à l'autre quant à leur principe de fonctionnement. Le contrôleur MPPT peut être réalisé sur la base de différentes méthodes et algorithmes. Une classification des méthodes MPPT les plus courantes est donnée à la figure 3.8.



**Figure 3.8:** Méthodes MPPT pour les PV

#### 1) Méthode de tension de circuit ouvert fractionnaire:

Les courbes I – V d'un module, d'une chaîne ou d'un réseau photovoltaïque, comme celle représentée à la figure 3.7, suggèrent une relation linéaire entre la tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) et le MPP tension ( $V_{MP}$ ) pour différentes conditions d'éclairement et de température. Cette relation linéaire peut être décrite par la relation

$$V_{MP} = k_1 \cdot V_{OC} \quad \text{for } k_1 < 1 \quad (3.10)$$

La constante de proportionnalité  $k_I$  dépend des caractéristiques du système PV et elle est déterminée en mesurant le  $V_{MP}$  et le  $C_{OV}$  dans différentes conditions d'éclairement et de température. Bien que la constante  $k_I$  diffère selon le type de système photovoltaïque, la plage de  $k_I$  est rapportée dans la littérature entre 0,71 et 0,8. Afin de trouver le MPP en utilisant Eq.1.8, la valeur de  $C_{OV}$  doit être mesurée pour une irradiance et une température donnée.

Afin de suivre le MPP dans des conditions variables, ce processus est répété périodiquement tous les  $\Delta t$  (généralement autour de 15 ms) .

Cette méthode est simple et directe à mettre en œuvre. Cependant, il existe une erreur d'approximation dans la linéarité des modules PV et les arrêts fréquents du système nécessaires à la mesure des  $C_{OV}$  entraînent des pertes de puissance. Ce dernier problème peut être évité en utilisant une cellule PV séparée pour mesurer les  $C_{OV}$ .

1) Cette solution entraîne un coût supplémentaire et une non-concordance entre les caractéristiques de la cellule photovoltaïque de référence et du système photovoltaïque réel peut entraîner une erreur d'état stable dans le MPPT .

## **2) Méthode du courant de court-circuit fractionnel:**

Cette méthode est la contrepartie actuelle de la méthode de la tension en circuit ouvert. Au lieu de cela, le courant  $I_{MP}$  est calculé par la relation linéaire avec le courant de court-circuit  $I_{SC}$  dans différentes conditions environnementales. Cela peut être exprimé par :

$$I_{MP} = k_2 \cdot I_{SC} \quad \text{for } k_2 < 1 \quad (3.11)$$

La constante de proportionnalité  $k_2$  dépend des caractéristiques du système PV et se situe généralement entre 0,78 et 0,92. La mesure du courant de court-circuit  $I_{SC}$  en ligne est plus complexe que la mesure de la tension en circuit ouvert et peut nécessiter des composants supplémentaires dans le circuit d'alimentation, tels qu'un commutateur de dérivation. Comme avec la méthode de la tension en circuit ouvert, cette méthode produit des pertes supplémentaires lors de la mesure de  $I_{SC}$  .

## **3) Les méthodes basées sur la logique floue et réseau de neurones:**

Ils peuvent être très utiles pour résoudre un problème non linéaire, tel que la MPPT.

Les contrôleurs basés sur la logique floue ont montré de très bonnes performances dans des conditions d'irradiance variables sans aucune connaissance détaillée du modèle de source PV.

De l'autre coté une connaissance approfondie du fonctionnement du système et de l'expérience sont nécessaires pour choisir l'erreur de calcul pertinente et la table de la base de règles. De plus, les stratégies de réseau de neurones nécessitent une formation spécifique pour chaque type de panneau ou de panneau PV, ainsi que de nouvelles périodes de formation pour pouvoir prendre en compte les dérivées paramétriques à long terme.

#### **4) Algorithme d'escalade:**

Ce sont les méthodes les plus populaires utilisées dans la pratique. Leur popularité est due à la simplicité de mise en œuvre et au suivi efficace du MPP . Les méthodes les plus populaires sont les méthodes de perturbation et observation (P & O) et de conductance incrémentielle (INC) .

La mise en œuvre pratique des contrôleurs MPPT est principalement réalisée sous forme numérique. La vitesse des convertisseurs analogique-numérique nécessaire pour réaliser le MPPT basé sur la commande numérique n'est pas une question critique en raison de la variation relativement lente de la température et de l'éclairement énergétique à suivre .

#### **5) Algorithme de perturbation et d'observation:**

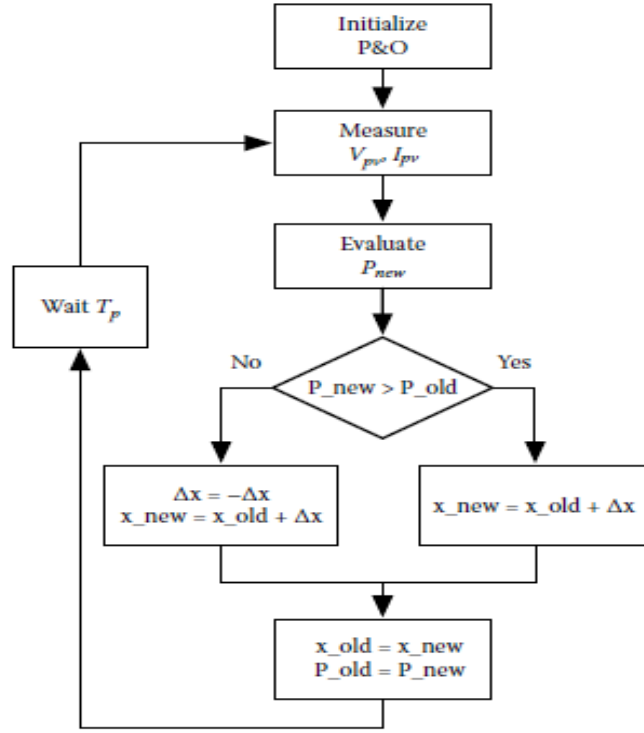
Perturbation and Observation (P & O) est un type de méthode d'escalade consistant en un processus de recherche continue de la tension de référence pour atteindre le MPP. La recherche est effectuée en perturbant la tension de référence, puis en mesurant la réponse du système (observation) afin de déterminer le sens de la prochaine perturbation.

Les perturbations de la tension de référence sont effectuées dans la direction dans laquelle la puissance devrait augmenter.

L'équation générale décrivant l'algorithme P & O est la suivante:

$$x_{((k+1)T_P)} = x_{(kT_P)} \pm \Delta x = x_{(kT_P)} + (x_{(kT_P)} - x_{((k-1)T_P)}) \cdot \text{sign}(P_{(kT_P)} - P_{((k-1)T_P)}) \quad (3.12)$$

Où  $x$  représente la variable qui est perturbée;  $T_P$  est l'intervalle de temps entre deux perturbations, dans la suite appelée période de perturbation;  $\Delta x$  est l'amplitude de la perturbation imposée à  $x$ , dans la suite appelée amplitude de perturbation; et  $P$  est la puissance extraite du générateur photovoltaïque . La figure 1.11 présente l'organigramme de l'algorithme P & O basé sur l'équation 1.10.



**Figure 3.9:** Organigramme de base pour la mise en œuvre de l'algorithme P&O

#### 6) Algorithme de conductance incrémentielle:

L'approche INC peut être considérée comme une version améliorée de celle de P & O. Cette méthode est similaire à l'algorithme de P & O et a été proposée pour les conditions atmosphériques en évolution rapide. Cette méthode est dérivée des courbes de puissance de la figure 1.9, où la pente de la courbe est positive à gauche, négative à droite et nulle au sommet. La pente de la courbe de puissance peut être trouvée de :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \Rightarrow \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (3.13)$$

La puissance maximale est alors obtenue lorsque la dérivée de puissance est nulle;

Par conséquent on obtient :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(I_{PV}V_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \cdot \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (3.14)$$

En introduisant  $1/V_{PV}$  des deux côtés de l'équation 1.12, nous obtenons :

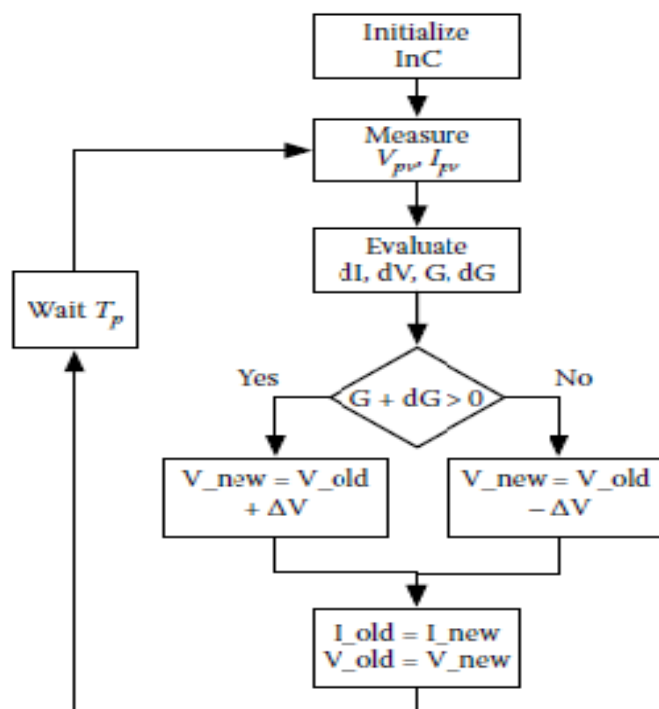
$$\frac{1}{V_{PV}} \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = G_{PV} + dG_{PV} \quad (3.15)$$

Où  $G$  est la conductance et  $dG$  la conductance incrémentielle. Il en résulte que, du côté gauche de la courbe PV par rapport au MPP,  $dP_{PV}/dV_{PV} > 0$ :



Cela signifie, selon l'équation 1.13, que  $G + dG > 0$ . Par conséquent, si la conductance est supérieure à la valeur absolue de la conductance incrémentielle, que le point de fonctionnement est sur le côté gauche du MPP, de sorte que la tension doit être augmentée afin de se rapprocher du MPP. De même, si  $G + dG < 0$ , le point de fonctionnement réel est à une tension supérieure à celle du MPP, de sorte que la tension doit être réduite si le MPP doit être approché.

Comme le montre la figure 1.12, l'algorithme peut suivre le MPP et y rester jusqu'à ce qu'un changement de  $dI_{PV}$  ou de  $dV_{PV}$  se produise à la suite d'un changement des conditions atmosphériques.



**Figure 3.10:** Organigramme de l'algorithme de conductance incrémentielle

### 3.5 Convertisseur DC / DC Boost pour le MPPT

Un convertisseur CC-CC permet de changer le niveau de tension d'une source à CC d'une valeur à une autre. En fonction de la relation entre les tensions d'entrée et de sortie, un convertisseur continu-continu peut être conçu pour réduire le niveau de tension, augmenter le niveau de tension ou les deux. Le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée est appelé rapport de conversion  $\alpha$ . Lorsqu'il est inférieur à 1, le convertisseur est appelé convertisseur abaisseur; lorsqu'il est supérieur à 1, le convertisseur est appelé convertisseur

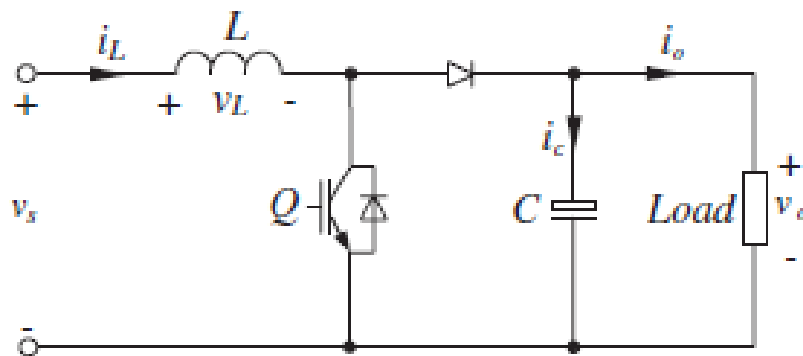
élévateur; lorsqu'il peut être supérieur ou inférieur à 1, le convertisseur est appelé convertisseur abaisseur-élévateur .

Selon la configuration des éléments du circuit de base, il existe plusieurs convertisseurs DC / DC différents.

Globalement, ils pourraient être classés en tant que convertisseurs sans isolation galvanique. L'application la plus large aujourd'hui trouve des convertisseurs CC/CC utilisant la modulation de largeur d'impulsion (PWM).

La tension de sortie est contrôlée en faisant varier le rapport cyclique de l'interrupteur avec une fréquence de commutation constante .

La figure 1.13 montre un convertisseur boost typique. Un convertisseur élévateur est également appelé convertisseur boost, car la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. En conséquence, le courant de sortie est inférieur au courant d'entrée en raison de l'équilibre des puissances. De même, il existe également deux modes de fonctionnement lorsque le commutateur Q est activé et désactivé. Les circuits équivalents dans ces deux modes sont représentés sur les Fig.3.12 (b) et Fig.3.12 (c), respectivement.



**Figure 3.11:** Convertisseur de boost typique

Supposons que la période de commutation est  $T_s$  et que le rapport cyclique est  $D$ .

Pendant le Mode 1, le courant de l'inductance augmente linéairement et l'inductance stocke l'énergie de la source pendant que le condensateur se décharge pour alimenter la charge. Pendant le mode 2, l'énergie emmagasinée dans l'inducteur et celle provenant de la source d'énergie sont transférées à la charge et au condensateur.

La figure 3.12 montre les formes d'onde à l'état stationnaire pour ce mode de conduction (CCM) où le courant de l'inducteur circule de manière continue.

Étant donné qu'en régime permanent l'intégrale de la tension de l'inducteur sur une période doit être égale à zéro

$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0 \quad (3.16)$$

La division des deux côtés par  $T_s$  et la réorganisation des termes donnent :

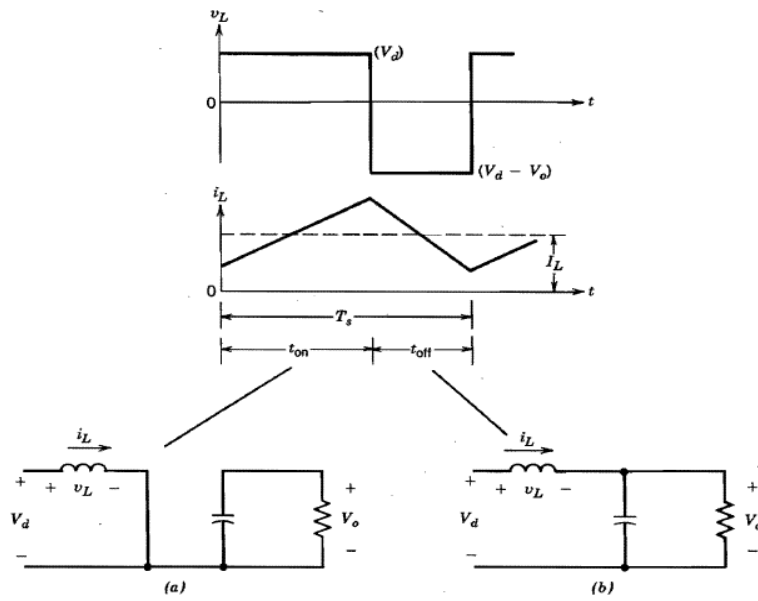
$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{T_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (3.17)$$

En supposant un circuit sans perte,  $P_d = P_o$ ,

$$V_d I_d = V_o I_o \quad (3.18)$$

Par conséquent,

$$\frac{I_o}{I_d} = (1 - D) \quad (3.19)$$

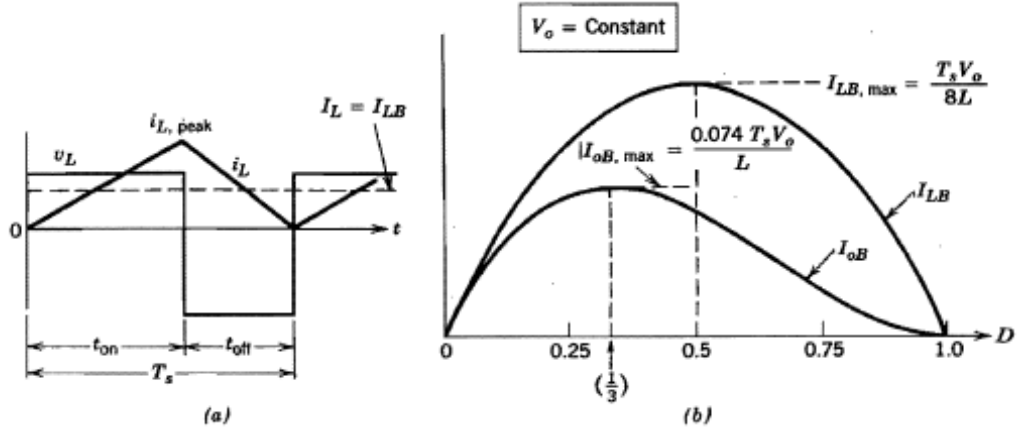


**Figure 3.12:** Mode de conduction continu: (a) Interrupteur on, (b) Interrupteur off .

Afin d'évaluer les éléments d'un convertisseur, il est nécessaire de reconnaître la limite entre la conduction continue et la conduction discontinue.

La figure 3.13 montre les formes d'onde au bord de la conduction continue. Par définition, dans ce mode,  $i_L$  passe à zéro à la fin de l'intervalle de désactivation. La valeur moyenne du courant inducteur à cette limite est :

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L,peak} = \frac{1}{2} \frac{V_d}{L} t_{on} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1 - D) \quad (3.20)$$



**Figure 3.13:** Convertisseur élévateur continu-continu à la limite de conduction discontinue continu .

Reconnaissant que dans un convertisseur élévateur, le courant de l'inductance et le courant d'entrée sont identiques ( $i_d = i_L$ ) et en utilisant les équations.1.17 et 1.18, on constate que le courant produit moyen au bord de la conduction continue est :

$$I_{oB} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1 - D)^2 \quad (3.21)$$

La plupart des applications dans lesquelles un convertisseur élévateur est utilisé exigent que  $V_o$  soit maintenu constante. Par conséquent, avec une  $V_o$  constante, les  $I_{oB}$  sont tracés sur la figure 3.13(b) en fonction du rapport cyclique  $D$ .

La figure 1.15 (b) montre que  $I_{LB}$  atteint une valeur maximale à  $D = 0.5$  :

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_o}{8L} \quad (3.22)$$

De plus,  $I_{oB}$  a son maximum à  $D = 1/3 = 0,333$

$$I_{oB,max} = \frac{2}{27} \frac{T_s V_o}{L} = 0.074 \frac{T_s V_o}{L} \quad (3.23)$$

Afin de maximiser la puissance extraite de la source photovoltaïque, le convertisseur de puissance à interface doit être capable d'ajuster automatiquement ses propres paramètres au moment de fonctionnement.

La valeur du rapport cyclique  $D$  doit être modifiée en permanence par un contrôleur afin de garantir que le générateur photovoltaïque fonctionne toujours à son MPP quelles que soient les conditions de fonctionnement de l'éclairement et de la température:

Pour cette raison, il s'agit du contrôleur MPPT (Maximum Power Point Track). Sur la base des valeurs instantanées du courant et de la tension détectés aux bornes du générateur PV, le contrôleur MPPT ajuste de manière dynamique le rapport cyclique du convertisseur pour suivre le MPP .

### 3.6 Puissance produite :

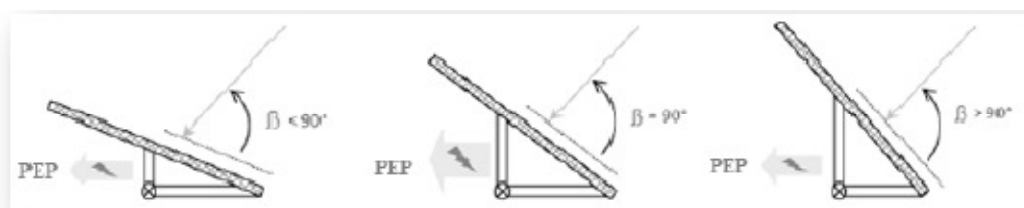
Le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque dépend des technologies utilisées lors de sa fabrication. Il existe plusieurs types dont les plus connus sont les panneaux PV à base de cellules en Silicium poly-cristallin, Silicium monocristallin, Silicium amorphe, les cellules multi-jonctions, etc. Chacune de ces technologies présente des avantages et des inconvénients. En particulier, le rendement, qui est généralement le critère de choix, dépend des conditions climatiques du lieu d'installation (dans les régions caractérisées par des températures élevées comme le cas de notre Sahara, d'après des recherches et des essais des chercheurs, ont constaté que les systèmes au Silicium amorphe sont préférés à ceux au mono ou poly-cristallin).

Pour un panneau PV, le rendement  $R$  exprimé en pourcent (%), est défini par le rapport de la puissance électrique produite par le panneau PV (PEP) à la puissance solaire reçue (PSR).

$$R(\%) = \frac{PEP}{PSR} \dots \dots \dots (3.24)$$

### 3.7 Positionnement et techniques de poursuite :

Comme mentionné auparavant, l'énergie fournie par le panneau PV dépend fortement de la quantité d'éclairement solaire absorbée par ce dernier. Cette quantité dépend de l'orientation du panneau par rapport au soleil. Pour collecter le maximum d'énergie, le panneau PV doit être constamment orienté perpendiculairement aux rayons solaires ( voir figure 3.14) .



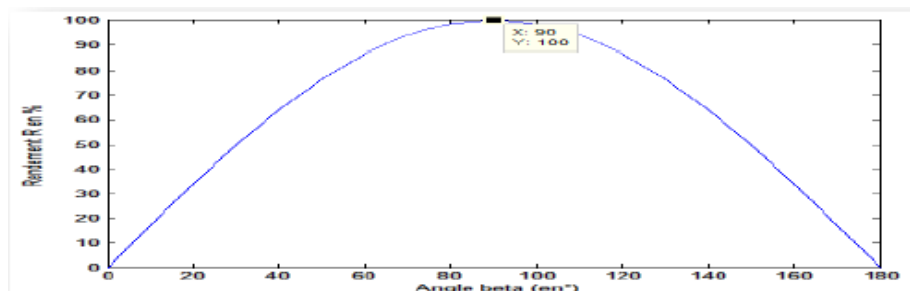
**Figure 3.14 :** Dépendance des performances d'un panneau PV à l'angle  $\beta$ .

Avec  $\beta$ : l'angle formé entre le plan du panneau et les rayons lumineux incidents, l'angle optimal correspond à un angle de  $90^\circ$  comme indiqué dans la figure (3.14).

Chaque fois que cet angle diminue ou augmente, la surface ( $m^2$ ) du panneau exposée aux rayons diminue et donc en partant de la puissance produite, le rendement diminue aussi, d'où l'importance de l'orientation des panneaux par rapport à la position du Soleil.

Le rendement en puissance solaire exploitée peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$RN = \sin(\beta) \times 100 \dots\dots\dots (I.4).$$



**Figure 3.15 :** Rendement en puissance solaire exploitée en fonction de l'angle  $\beta$  des rayons solaires.

Un autre facteur qui influence sur les performances du panneau PV est l'angle d'inclinaison, qui correspond à l'angle formé par le plan du panneau solaire par rapport à l'horizontale (le plan du sol).



**Figure 3.16:** Représentation de l'angle d'inclinaison  $\theta$ .

En effet, l'évolution de la trajectoire du soleil varie selon les saisons (l'inclinaison de la terre varie), l'angle d'inclinaison est plus réduit en été et plus important en hiver. Cependant si l'on désire maximiser la puissance générée par un panneau PV et avoir un rendement optimal, il faut tenir compte de tous ces paramètres et les contraintes liées à l'orientation du module

ainsi que la position du soleil. Ceci peut être assurée par un système de poursuite solaire (suiveur soleil ou encore dit tracker solaire) qui permettant de suivre le soleil tout au long de la journée. Pour cela, la structure possède deux degrés de liberté qui sont:

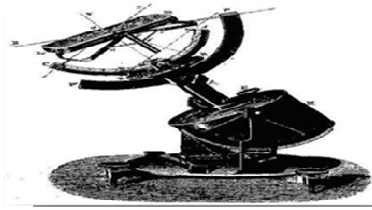
- une rotation horizontale pour régler l'azimut 
- une rotation verticale pour l'inclinaison 

Ce système permet ainsi, aux panneaux photovoltaïques de suivre continuellement et en temps réel la trajectoire du soleil pour assurer une production électrique maximale, d'où la nécessité de définir avec exactitude les trajectoires empruntées par le soleil, de manière à définir la meilleure façon avec laquelle sera effectué le suivi automatique.

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés dans les sites isolés et même dans les villes et les cités avec des puissances crêtes qui varient des centaines de Watts à quelques MW. Mais dans la grande majorité des cas, les générateurs photovoltaïques sont fixes. L'énergie solaire incidente sur les cellules n'est pas optimale en fonction de l'heure d'une part et de la saison, d'autre part. Le rendement d'un module photovoltaïque est assez faible (autour de 15%), c'est pourquoi, il faut exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes énergétiques reçues du soleil. Des études ont prouvé que le rendement optimal s'obtient si les cellules sont placées perpendiculairement par rapport au rayon solaire incident. Ainsi et pour garder cette perpendicularité aussi longtemps que possible, nous avons opté pour un système suiveur solaire.

### **3.8 Les suiveurs solaires :**

Les premières applications des suiveurs solaires remontent vers les années 1750 où le principe repose sur l'utilisation de l'héliostat (figure II.1). La rotation du miroir de l'héliostat est assurée par un mécanisme d'horlogerie dont la plus ancienne mention du système se trouve dans des publications datant de 1742 du physicien néerlandais Willem Jacob 's Gravesande. Un champ d'héliostats repère le mouvement du soleil en convergeant les rayons lumineux vers un même point, concentrant ainsi la lumière incidente en employant des miroirs de réflexion, tout au long de la journée. Ce dernier se rencontre dans diverses installations utilisant l'énergie solaire, notamment les centrales solaires à concentration appelées champs d'héliostats. Un exemple en France de la centrale solaire Thémis qui après avoir fonctionné de 1983 à 1986, fait l'objet d'une nouvelle expérimentation depuis 2007.



**Figure 3.17 :** modèle d'un héliostat dans ses premières applications.



**Figure 3.18:** champ d'héliostat -centrale solaire Thémis France.

La puissance et le sens des rayons solaires variant en permanence en raison de la rotation terrestre et de la composition de l'atmosphère. Les cellules des modules photovoltaïques à montage fixe ne peuvent transformer qu'une fraction de l'énergie lumineuse émise par le soleil en énergie électrique. Les suiveurs ou trackers solaires sont des dispositifs mobiles qui permettent de maintenir l'orientation des modules photovoltaïques vers le soleil. Ainsi, l'angle d'incidence reste constant, et l'intensité de la lumière et par conséquent de l'énergie, reste stable. Cela permet non seulement d'exploiter efficacement les heures d'ensoleillement, mais aussi de tirer parti de la lumière diffuse, ce qui se traduit par un sur plus d'énergie solaire de 25 à 50% et une meilleure rentabilité économique ainsi qu'un amortissement plus rapide des coûts d'acquisition.

Le diagramme comparatif de production électrique (Figure 3.19) montre pour une journée en soleillée d'été, le gain de production électrique obtenu en passant d'une installation fixe à une installation équipée d'un suiveur de trajectoire solaire. Les principales caractéristiques différenciant les suiveurs sont les suivantes :



- Le gain en production électrique (par rapport à des panneaux solaires fixes).
- L'orientation mono ou multi axiale.
- La précision du positionnement vis-à-vis du soleil (type d'asservissement).
- La robustesse (tenue au vent) et la fiabilité.
- Le coût.

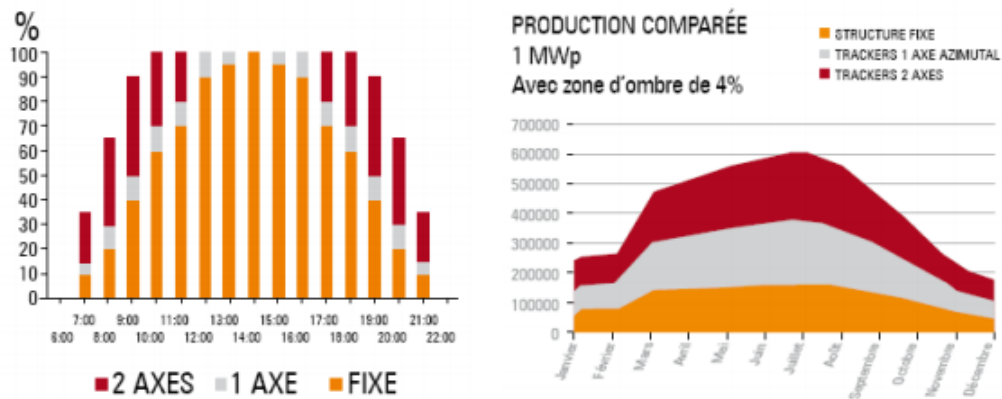


Figure 3.19: Production électrique.

### 3.9 Les type des suiveurs solaires :

On distingue principalement deux grandes familles de suiveurs solaires : les passifs et les actifs qui comportent les suiveurs mono-axe et double axe. (Figure 3.20).

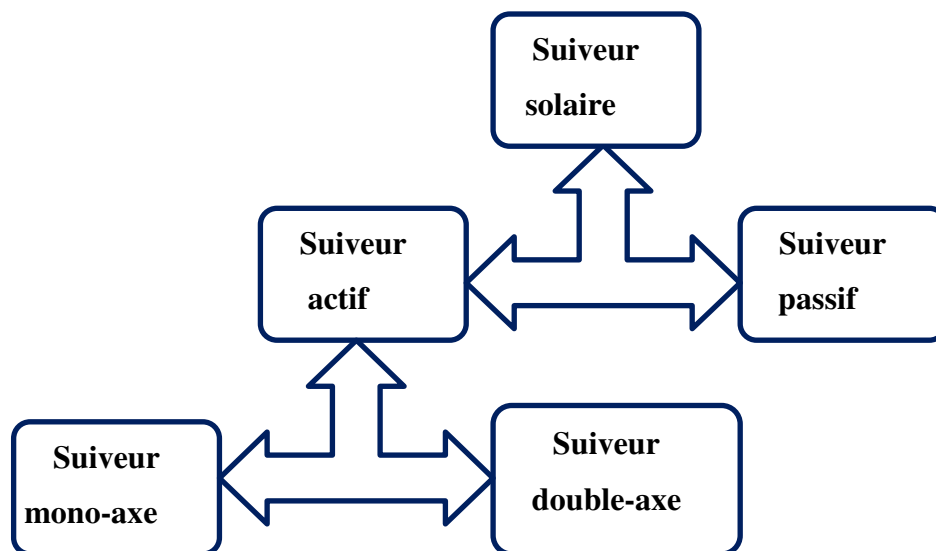
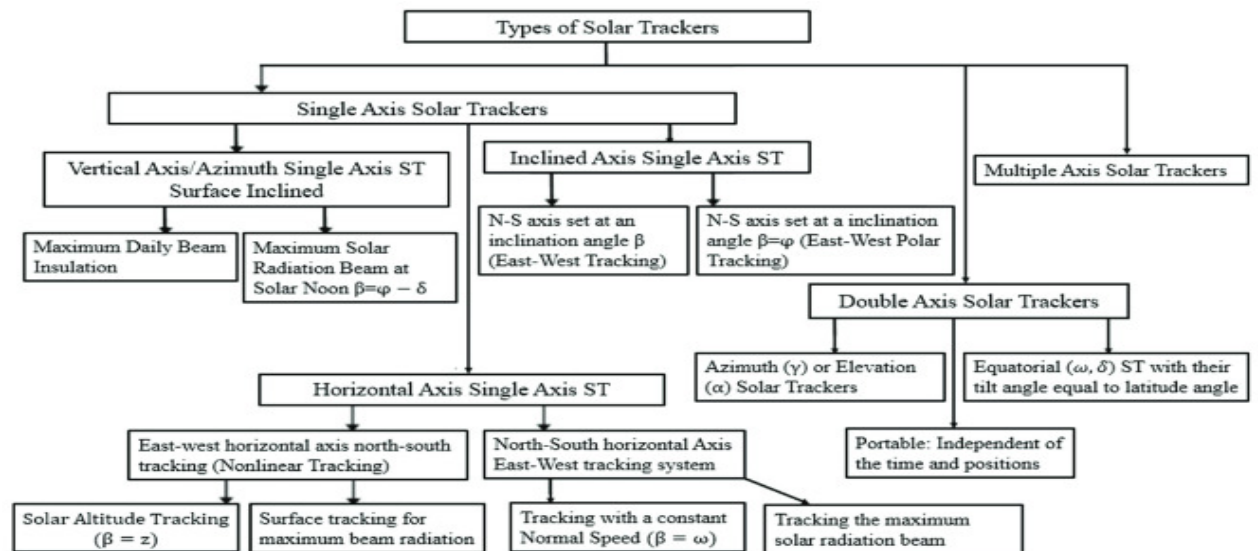


Figure 3.20: Types de suiveurs solaires.

Les systèmes de contrôle des systèmes de suivi de la position du soleil peuvent être classés selon le schéma présenté sur la Figure 3.21.

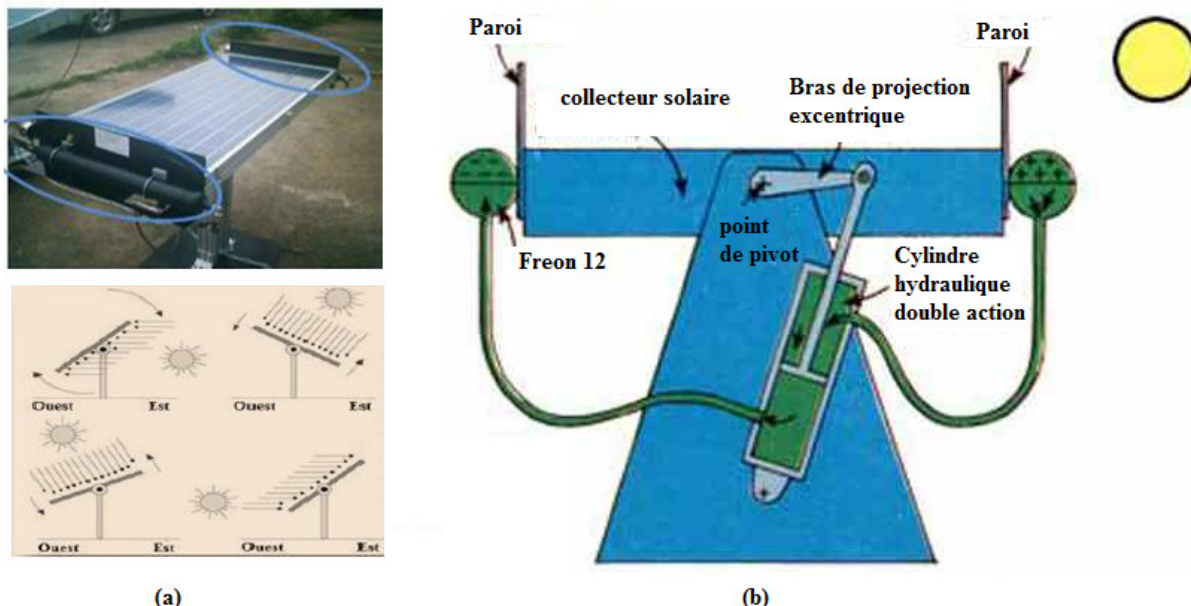
La conversion de l'énergie solaire en électricité est une réponse viable pour résoudre la plupart des problèmes énergétiques mondiaux. Parmi les paramètres affectant les performances des cellules photovoltaïques (PV) et des systèmes de concentration d'énergie solaire (CSP), on trouve leur orientation et leur angle d'inclinaison par rapport au soleil. Les trackers solaires (ST) sont des dispositifs idéaux pour l'amélioration de l'efficacité. L'optimisation de ces appareils nécessite des spécifications lourdes pour éviter les erreurs de suivi potentielles qui conduisent souvent à leurs mauvaises performances. Ces spécifications ne peuvent pas être remplies par de simples méthodes de suivi en raison de différentes sources d'erreurs de suivi telles que le désalignement du dispositif de suivi, le niveau de pollution de la zone, l'ombrage des capteurs, les types de systèmes de contrôle impliqués, les unités auxiliaires de le système, le manque d'entretien ainsi que l'imperfection et l'inadéquation de puissance des réseaux de connexion. L'étude révèle que le double axe ST sous forme d'axe polaire et d'azimut / élévation comprenant les modèles de mouvement solaire et le contrôle de rétroaction en boucle fermée dynamique sont les plus efficaces et donnent généralement plus de 40% d'amélioration du retour d'énergie par rapport aux panneaux photovoltaïques fixes. De plus, les grands systèmes réduisent considérablement les coûts et économisent sur les matériaux. L'énergie consommée par les appareils mobiles est généralement faible (2 à 5% de l'énergie collectée), mais elle pourrait être plus élevée si aucune optimisation n'est effectuée. Enfin, tous les paramètres d'économie d'énergie matérielle et logicielle doivent être optimisés dès les premiers stades de développement du système pour éviter le gaspillage de matériaux et la surconsommation d'énergie par les unités de suivi.



**Figure 3.21 :** Classification des poursuiveurs solaire.

### 3.10 Suiveur passif :

Le premier type des suiveurs passifs est constitué dans son architecture de deux tubes en cuivre montés sur les côtés Est et Ouest du panneau PV. Le tube de matière cuivre (entouré dans la figure (3.22) est rempli de fluides chimiques capable de se vaporiser à basse température. En effet, lorsque l'exposition au rayonnement solaire augmente la température d'un côté du panneau, le composé dans le tube en cuivre se vaporise . La partie gazeuse du composé occupe un plus grand volume interne, et sa partie liquide est décalée vers le côté ombragé. Cette opération de transfert de masse ajuste l'équilibre du panneau PV en le faisant tourner vers la source des rayons solaires. Ce type de suiveur ne consomme aucune énergie pour le repositionnement du panneau.

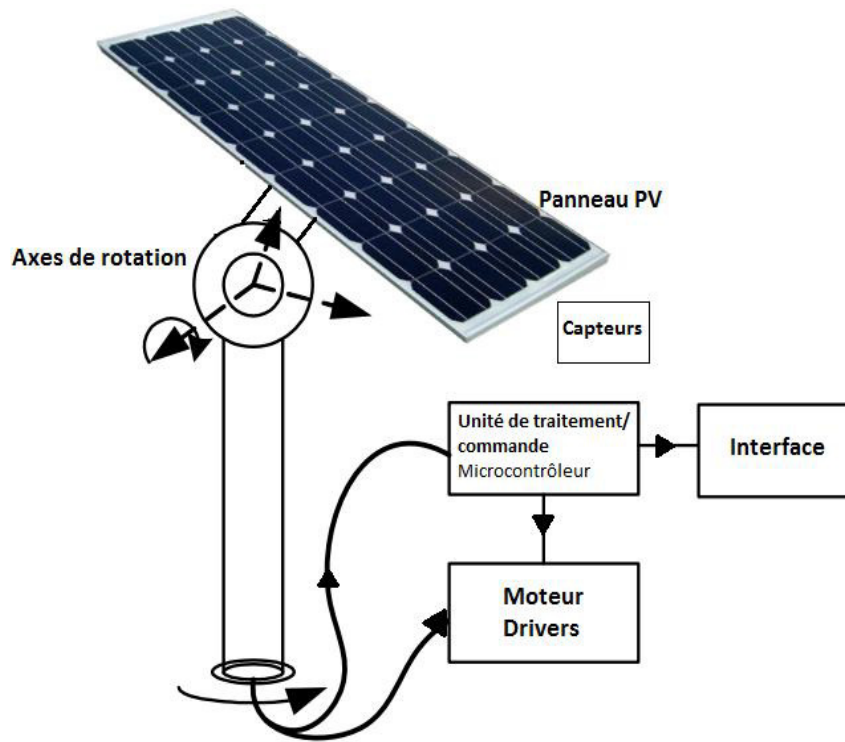


**Figure 3.22:** Exemples et fonctionnement des poursuiveurs passifs, (a) action chimio-mécanique], (b) action chimio-hydraulique.

### 3.11 Suiveur actif :

Les suiveurs solaires actifs utilisent le principe de la détection de lumière, suivant la trajectoire solaire en cherchant à optimiser au maximum l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface. Il existe deux types dans cette famille : les suiveurs mono-axe et double axe. L'avantage de ces derniers par rapports aux suiveurs passifs c'est qu'ils représentent une meilleure précision de suivi et ne nécessitent aucune intervention manuelle pour les ajuster.

Figure 3.23.



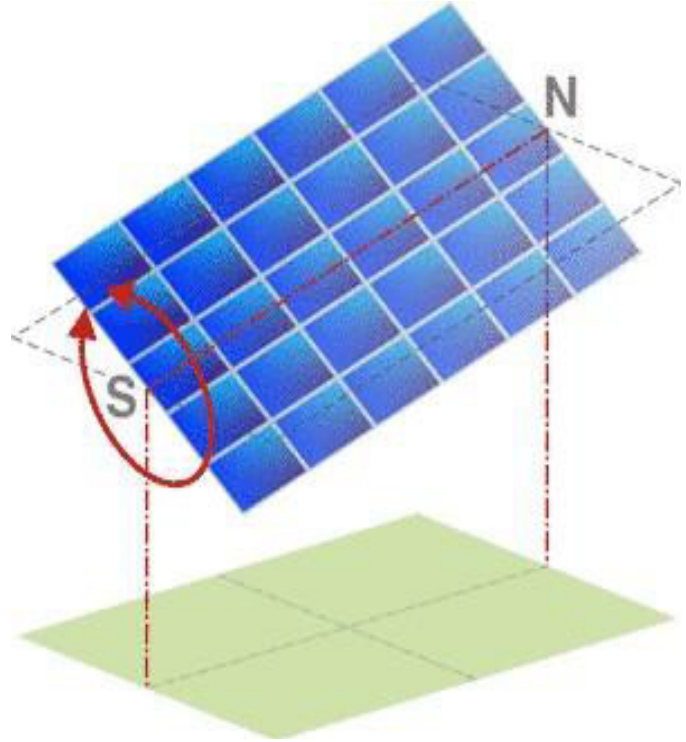
**Figure 3.23:** Exemple et fonctionnement du suiveur actif.

### 3.12 Les suiveurs mono-axe :

Le suiveur solaire mono-axe tourne autour d'un axe simple. Le trajet suivi par cet axe est souvent en azimut, c'est-à-dire d'est en ouest au fil de la journée. L'angle d'inclinaison du panneau est fixé, il est placé selon l'angle le plus propice à recevoir le maximum de rayon du soleil durant toute l'année et selon la latitude du lieu où le capteur est déposé. Ainsi l'angle d'inclinaison du panneau reste constant mais son azimut varie au cours de la journée. Le système de poursuite mono-axial est la solution la plus simple et la plus utilisée.

### 3.13 Le Suiveur à axe horizontal :

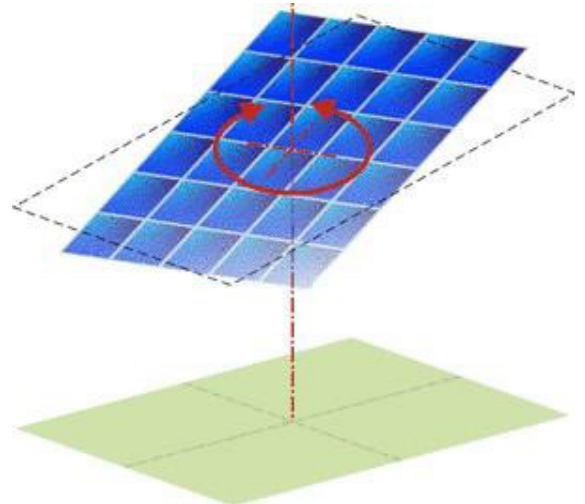
Ce type de suiveur n'apporte que très peu de gain par rapport à un système fixe. Il est plus intéressant d'utiliser des suiveurs à un axe vertical. En revanche, sa conception est la plus simple de l'ensemble des suiveurs, si ce type de suiveur est équipé d'un organe de régulation appelé back tracking, qui empêche d'incliner davantage les modules dès que les ranges se font mutuellement de l'ombre. Il faudrait un suiveur permettant une plage d'inclinaison allant de 10 à 30° pour obtenir la meilleure solution. Cependant, le gain resterait assez faible : de l'ordre de 2,2% (ce gain ne compense pas le surcoût).



**Figure 3.24:** Suiveur à axe horizontal.

### **3.14 Suiveur à axe vertical incliné :**

Ce type de suiveur permet un gain d'environ 20% .Il est souvent moins imposant que les suiveurs à 2 axes, moins coûteux et permet d'installer plus de puissance sur un terrain donné comparé aux 2 axes.

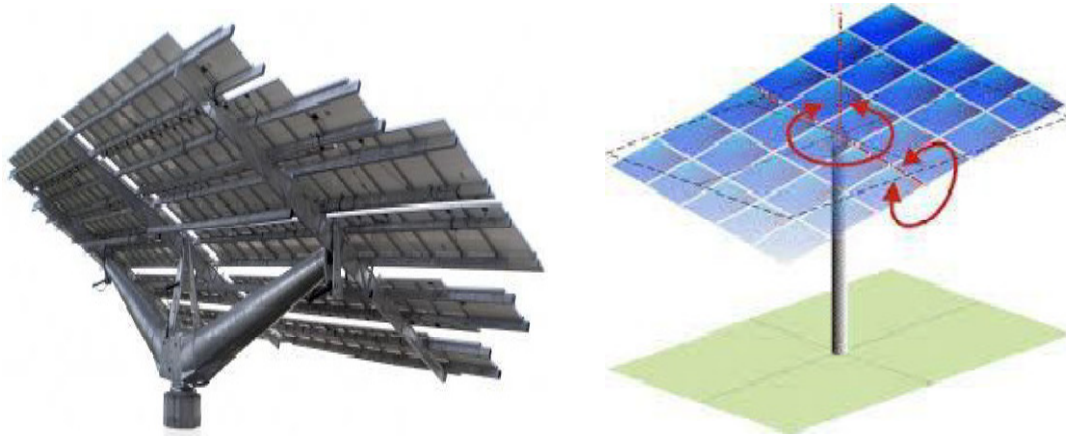


**Figure 3.25:**Suiveur à 1axe vertical incliné.



### 3.15 Suiveur solaire double axes :

Contrairement au précédent, ce suiveur solaire possède deux axes ce qui lui permet de suivre les mouvements en azimut et en inclinaison au cours de la journée. Ainsi, le capteur reste constamment orienté vers le soleil. Ce type de suiveur est très imposant et fournit de meilleures performances par rapport au suiveur mono-axe.

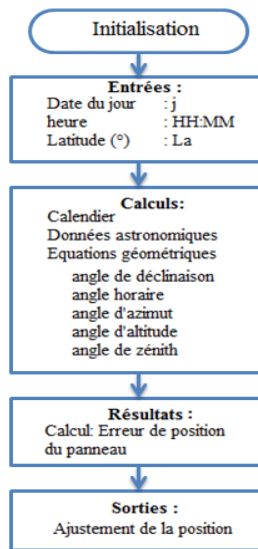


**Figure 3.26 :** Suiveur à deux axes ADES modèle 5F-27 M

### 3.16 Les suiveurs solaires actifs actuels :

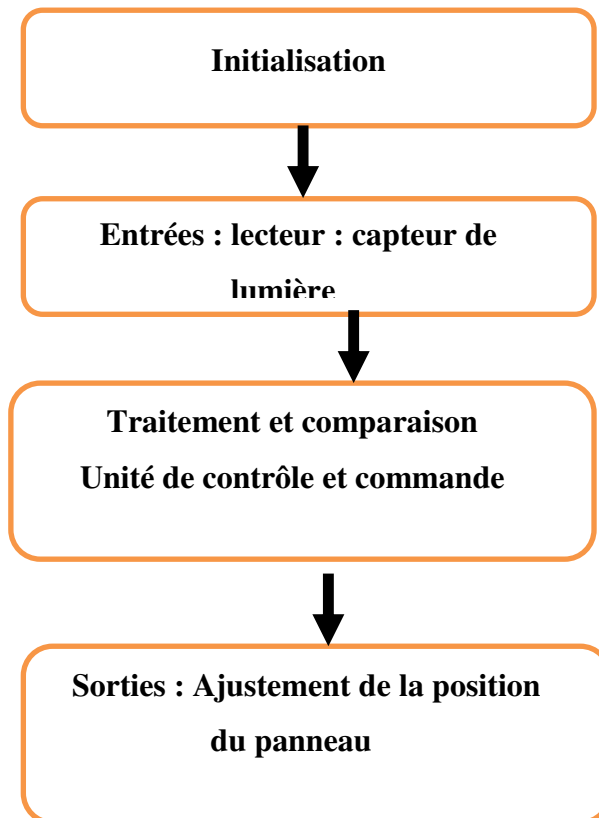
Les systèmes de suivi aujourd'hui diffèrent d'un concepteur à un autre et de la technologie utilisée afin d'assurer de bonnes performances, avec une grande précision et un système fiable à faible coût ; C'est dans cette optique que les recherches scientifiques et projets porteurs visent à trouver le bon compromis entre précision et puissance consommée.

Il existe deux grandes techniques pour assurer le suivi et en se tenant compte de la précision voulue. L'une repose sur le calcul de la position du soleil en se basant sur les équations géométriques et astronomiques prédéfinies et qui nécessite une intervention manuelle pour modifier la latitude du site, la date du jour et l'heure. Cette technique est dite la méthode astronomique du fait que la position est directement fonction du parcours solaire préprogrammé (Figure 3.27). L'autre méthode est dite active, permanente ou asservie vu que les algorithmes adoptés sont basés sur des capteurs de lumière photorésistances ou cellules PV pour déterminer la position du soleil à tout moment, permettant ainsi un suivi instantané et notamment une orientation optimale du panneau (Figure 3.28). C'est vers cette dernière que va s'orienter notre travail, en réalisant un système de poursuite automatique.



**Figure 3.27 : Méthode de poursuite astronomique.**

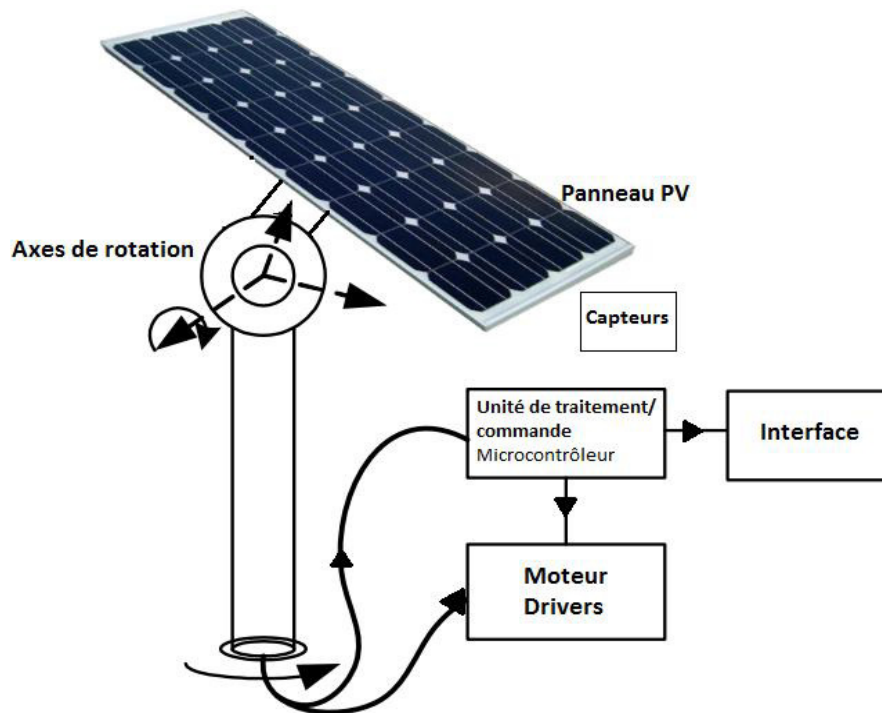
Plusieurs algorithmes ont été développés au cours de ces dernières années. Aujourd'hui, les techniques de suivi reposent sur la rapidité de traitement de l'information et de commande via des systèmes électroniques classiques ou des électroniques embarquées (Figure 3.28).



**Figure 3.28: Méthode de poursuite active.**

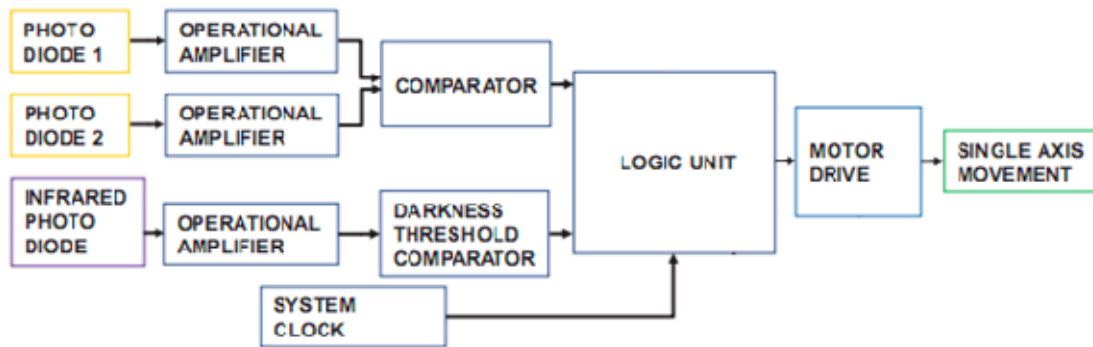


Plusieurs algorithmes ont été développés au cours de ces dernières années. Aujourd'hui, les techniques de suivi reposent sur la rapidité de traitement de l'information et de commande via des systèmes électroniques classiques ou des électroniques embarquées (Figure II.13).



**Figure 3.29 :** Principe général d'un système de suivi pour les panneaux PV.

L'exemple ci-dessous démontre une méthode de suivi automatique récente et dont le système de suivi est composé par deux photodiodes, un comparateur de courant, une unité logique de traitement et un moteur comme unité d'action comme montré dans le schéma de principe de la figure (Figure II.14). Les deux photodiodes convertissent les rayons solaires incidents en un signal électrique proportionnel à leurs intensités. Par la suite le comparateur compare les signaux reçus et envoie un signal de sortie à l'unité logique, qui commande le moteur de façon à réorienter le panneau solaire vers la direction où le rayonnement est plus intense. Or, lorsque le rayonnement solaire est très faible, une photodiode IR envoie un signal à l'unité logique pour arrêter le moteur et donc limiter les pertes et diminuer la consommation.



**Figure 3.30 :** Principe général du système de suivi à base de photodiode.

### **3.17 Les Avantages et Les inconvénients des systèmes de suivi solaire :**

#### **3.17.1 Les avantages des systèmes de suivi solaire:**

Les systèmes de suivi solaire sont utilisés pour orienter les capteurs continuellement vers le soleil et peuvent aider à minimiser l'investissement en augmentant le rendement des capteurs.

- La surface du parc solaire est réduite tout en grand le même potentiel.
- Exploitation optimal du rayonnement solaire même en présence des nuages.
- Gain intéressant, notamment aux heures de la journée les moins ensoleillées.
- Simplicité de mise en œuvre.

#### **3.17.2 Les inconvénients des systèmes de suivi solaire :**

- Le cout d'investissement initial (surtout pour le suiveur à deux axes) est élevé.
- La maintenance des suiveurs, car les systèmes mécaniques atteignent rarement une durée de vie de 20 ans.
- Pour les raisons de sécurité, les panneaux solaires doivent être parallèles au sol lors de vent forts.

### **3.18 Les avantages et les Inconvénients de l'énergie PV :**

#### **3.18.1 Les avantages de l'énergie PV :**

L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville. L'énergie photovoltaïque est renouvelable et gratuite. Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût. Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium) résistent aux conditions météorologiques extrêmes. L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins.

La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire.

### **3.18.2 Les inconvénients de l'énergie PV:**

Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé. Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans). Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante. Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente. Le rendement réel de conversion d'un module est faible.

## Annexe A

### Spécifications SunPower SPR-305-WHT

# SUNPOWER

#### BENEFITS

**Highest Efficiency**  
Panel efficiency of 18.7% is higher than any commercially available competitor panel

**More Power**  
SunPower 305 delivers 50% more power per unit area than conventional solar panels and 100% more than thin film solar panels

**Reduces Installation Cost**  
More power per panel means fewer panels per install. This saves both time and money

**Reliable and Robust Design**  
Proven materials, tempered front glass, and a sturdy anodized frame allow panel to operate reliably in multiple mounting configurations



SPR-305-WHT

## 305 SOLAR PANEL

EXCEPTIONAL EFFICIENCY AND PERFORMANCE



The SunPower 305 Solar Panel provides today's highest efficiency and performance. Utilizing 96 next generation SunPower all-back contact solar cells, the SunPower 305 delivers an unprecedented total panel conversion efficiency of 18.7%. The 305 panel's reduced voltage-temperature coefficient and exceptional low-light performance attributes provide outstanding energy delivery per peak power watt.

SunPower's High Efficiency Advantage - Up to Twice the Power

| Comparable systems covering 1000 m <sup>2</sup> / 10,750 ft <sup>2</sup> |           |              |          |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------|----------|
|                                                                          | Thin Film | Conventional | SunPower |
| Watts / Panel                                                            | 65        | 165          | 305      |
| Efficiency                                                               | 9.0%      | 12.0%        | 18.7%    |
| kWs                                                                      | 90        | 120          | 187      |



### Electrical Data

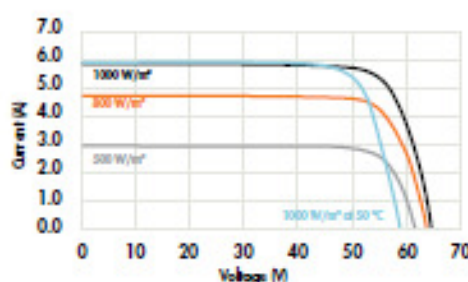
Measured at Standard Test Conditions (STC): irradiance of 1000 W/m<sup>2</sup>, air mass 1.5, and cell temperature 25°C.

|                          |                            |                                               |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|
| Peak Power (+/-5%)       | P <sub>max</sub>           | 305 W                                         |
| Rated Voltage            | V <sub>mp</sub>            | 54.7 V                                        |
| Rated Current            | I <sub>mp</sub>            | 5.58 A                                        |
| Open Circuit Voltage     | V <sub>oc</sub>            | 64.2 V                                        |
| Short Circuit Current    | I <sub>sc</sub>            | 5.96 A                                        |
| Maximum System Voltage   | IEC, UL                    | 1000 V, 600 V                                 |
| Temperature Coefficients |                            |                                               |
|                          | Power                      | -0.38% / °C                                   |
|                          | Voltage (V <sub>oc</sub> ) | -176.6 mV/°C                                  |
|                          | Current (I <sub>sc</sub> ) | 3.5 mA/°C                                     |
| Series Fuse Rating       |                            | 15 A                                          |
| Peak Power per Unit Area |                            | 187 W/m <sup>2</sup> , 17.4 W/ft <sup>2</sup> |
| CEC PTC Rating           |                            | 282.1 W                                       |

### Mechanical Data

|               |                                                 |
|---------------|-------------------------------------------------|
| Solar Cells   | 96 SunPower all-back contact monocrystalline    |
| Front Glass   | 4.0 mm (5/32 in) tempered                       |
| Junction Box  | IP65 rated with 3 bypass diodes                 |
| Output Cables | 900 mm length cables / Multi-Contact connectors |
| Frame         | Clear anodized aluminum alloy type 6063         |
| Weight        | 24 kg, 53 lbs                                   |

### IV Curve



Current-voltage characteristics with dependence on irradiance and module temperature.

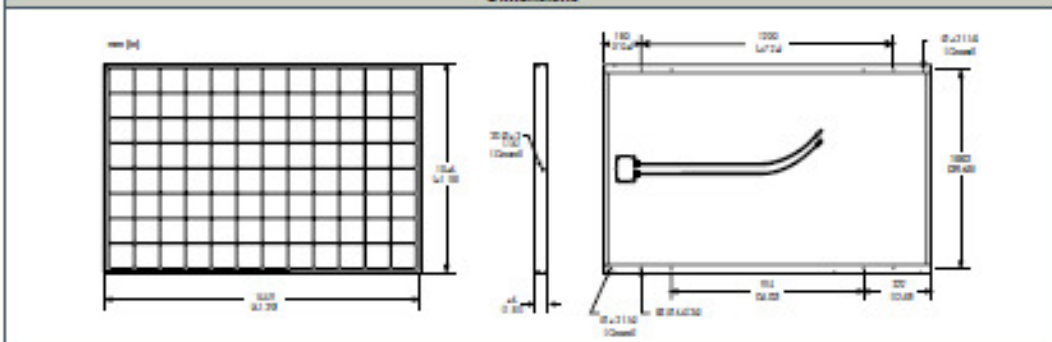
### Tested Operating Conditions

|                   |                                       |
|-------------------|---------------------------------------|
| Temperature       | -40° C to +85° C [-40° F to +185° F]  |
| Max. load         | 50 psf (2400 Pascals) front and back  |
| Impact Resistance | Hail - 25mm (1 in) at 23 m/s (52 mph) |

### Warranty and Certifications

|                |                                                                                 |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Warranty       | 25 year limited power warranty<br>10 year limited product warranty              |
| Certifications | IEC 61215, Safety tested IEC 61730;<br>UL listed (UL 1703), Class C Fire Rating |

### Dimensions



**CAUTION: READ SAFETY AND INSTALLATION INSTRUCTIONS BEFORE USING THE PRODUCT.** Go to [www.sunpowercorp.com/panels](http://www.sunpowercorp.com/panels) for details.

### About SunPower

SunPower designs, manufactures and delivers high-performance solar electric technology worldwide. Our high-efficiency solar cells generate up to 50 percent more power than conventional solar cells. Our high-performance solar panels, roof tiles and trackers deliver significantly more energy than competing systems.

© October 2007 SunPower Corporation. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

Document #3051-022009 Rev1.6

Printed on recycled paper

[www.sunpowercorp.com](http://www.sunpowercorp.com)