

I. Les énergies renouvelables :

I.1.Introduction :

Une énergie renouvelable est une énergie dont le gisement se reconstitue en permanence à un rythme au moins égal à celui de la consommation.

Leurs diverses formes ont chacune leurs spécificités selon leur nature. Il faut toutefois préciser que leurs potentialités, en termes d'énergie exploitable, sont très différentes.

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables permet de réduire la pression sur les ressources naturelles et de limiter les rejets polluants dans l'atmosphère. Différentes filières d'énergies renouvelables existent à l'heure actuelle. Elles permettent la production d'énergie mécanique, d'énergie électricité et de l'énergie thermique.

I.2. Les différentes énergies renouvelables :

I.2.1. L'énergie hydraulique :

C'est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marées, vagues. Ce mouvement peut-être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou pour être converti en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour amorcer le cycle de production d'électricité. L'eau s'engouffre alors dans une conduite forcée ou dans une galerie creusée dans la roche suivant l'installation, et se dirige vers la centrale hydraulique située en contrebas. [1]

➤ Principe de fonctionnement de la centrale hydraulique :

- Le rôle du barrage consistera à la retenir l'eau des fleuves.
- De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue.
- à la sortie de la conduite, la pression ou la vitesse(ou les deux en même temps) entraîne la rotation de la turbine.
- La rotation de la turbine entraîne celle du rotor de l'alternateur.
- Un transformateur élève alors la tension du courant produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à haute et très haute tension.
- L'eau turbinée qui a perdu son énergie s'échappe par le canal de fuite et rejoint la rivière.

L'avantage de cette énergie disponible tant que les cours d'eau ne sont pas à sec ; et fournit de fortes puissances et elle peut être stockée dans les retenues d'eau. Par contre, son exploitation a des impacts écologiques dans le sens où les barrages menacent d'extinction des espèces terrestres et aquatiques, mais ils portent aussi atteintes à la

biodiversité ; et exigent parfois un déplacement de population car il y a toujours des risques de rupture de barrage qui peuvent engendrer des dégâts matériels et humains considérables. [2]

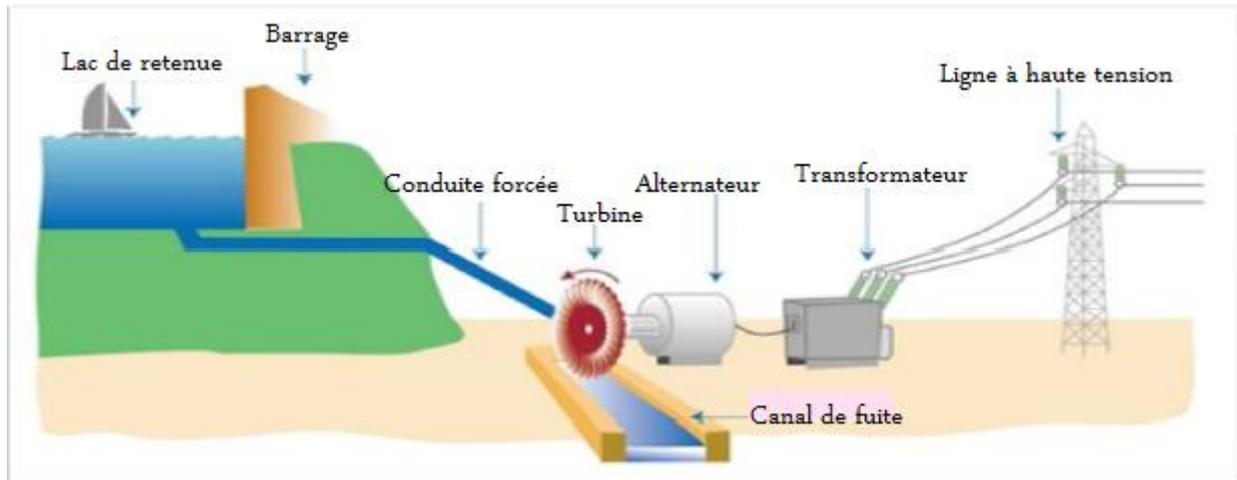


Figure I.1 : principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

I.2.2. L'énergie éolienne :

Par définition l'énergie éolienne est l'énergie produite par le vent. Cette énergie mécanique est exploitée à des éoliennes, hélices installées au sommet de pylônes et qui tournent sous l'action du vent. La rotation des hélices actionne un système produisant de l'électricité.

➤ Principe de fonctionnement de la centrale éolienne :

Une éolienne est un dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité. Elle est composée des principaux éléments suivants :

- ❖ **un mât**, haut d'une centaine de mètres en moyenne, qui soutient la nacelle afin que celle-ci puisse capter des vents plus hauts donc plus forts;

- ❖ **une nacelle**, située en haut de ce mât, qui abrite notamment la génératrice ;

- ❖ **le rotor**, auxquelles sont fixées les trois pales, entrent en mouvement rotatif grâce à l'intensité du vent et fait ainsi tourner un arbre mécanique. Le multiplicateur augmente la vitesse de celui-ci, cette énergie est enfin convertie en électricité par la génératrice.

- ❖ **Une éolienne** produit de l'électricité lorsque la vitesse du vent se situe entre 3 mètres par seconde (force suffisante pour entraîner la rotation des pales) et 25 mètres par seconde. Lorsque ce dernier seuil de vitesse est atteint, un dispositif présent dans la nacelle se met alors en marche, celui-ci actionne le frein du rotor ainsi qu'une modification de l'inclinaison des pales, ce qui conduit à un arrêt de la machine tant que le vent ne faiblit pas.

Actionnées par le vent, les pales fixées sur le rotor entraînent une génératrice électrique installée dans la nacelle. Le courant ainsi produit, d'une tension de 400 à 690 Volts est ensuite transporté par câble souterrain jusqu'au poste de livraison, afin d'être injecté sur le réseau national. [1]

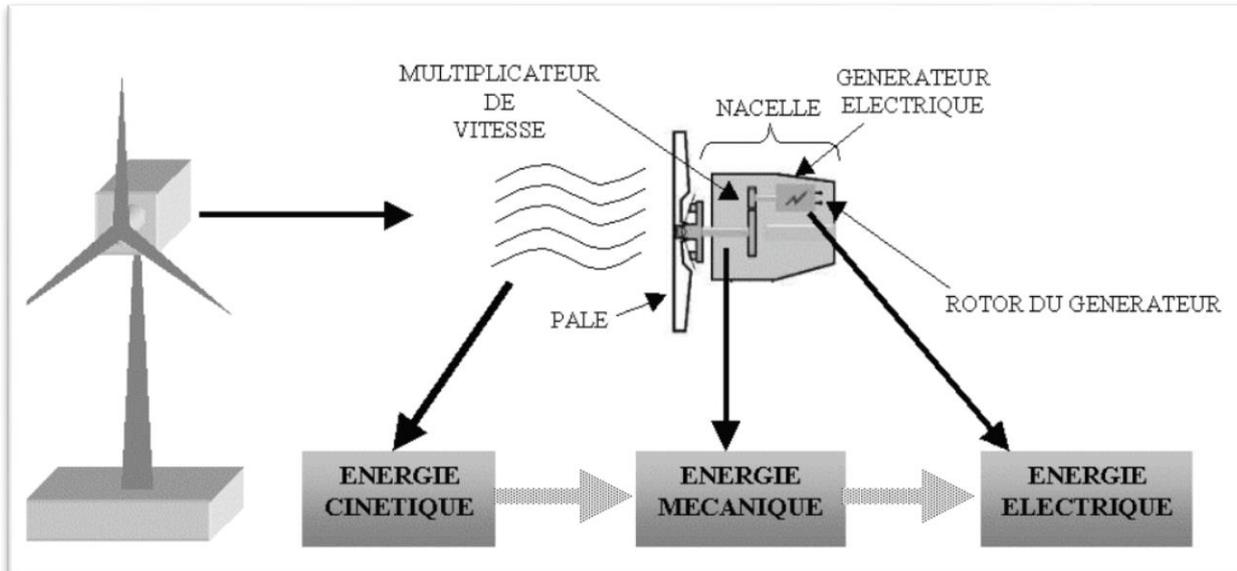


Figure I.2 : schéma principal d'un central éolien

Son avantage c'est d'être disponible un peu partout à la surface de notre planète, surtout dans les zones côtières, les plaines et les zones de collines, et nécessite une faible emprise au sol.

L'inconvénient de cette énergie est dépendant du vent. Et pour son utilisation isolée, il faut donc prévoir un système de batterie de stockage de l'électricité pour les journées non ventées ; leurs dimensions sont immenses et ne passent pas inaperçu dans le paysage ; produisant du bruit. [3].

I.2.3. L'énergie géothermique :

L'énergie géothermique : est une ressource juste sous nos pieds. Provenant de la chaleur accumulée dans nos sols, l'énergie géothermique apparaît être une ressource quasi inépuisable puisque constamment réapprovisionnée. [4]

Cette énergie est vouée à plusieurs utilités :

Elle peut servir à produire de l'eau chaude, à chauffer une maison ou même à rafraîchir une pièce, à grande échelle, elle est utilisée dans l'agriculture pour le chauffage des serres par exemple.

Il existe différents types de gisements géothermiques classés suivant leur énergie. On distingue généralement:

- **La géothermie très basse énergie** (température inférieure à 30°C):

Elle concerne les aquifères peu profonds d'une température inférieure à 30°C, température très basse qui peut cependant être utilisée pour le chauffage et la climatisation si l'on adjoint une pompe à chaleur.

- **La géothermie basse énergie** (température entre 30 et 90°C) :

Appelée également basse température ou basse enthalpie, elle consiste en l'extraction d'une eau à moins de 90°C dans des gisements situés entre 1 500 et 2 500 mètres de profondeur. L'essentiel des réservoirs exploités se trouve dans les bassins sédimentaires de la planète car ces bassins recèlent généralement des roches poreuses (grès, conglomérats, sables) imprégnées d'eau.

- **La géothermie moyenne énergie** (température entre 90 et 150°C) :

La géothermie de moyenne température ou moyenne enthalpie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 et 150°C. Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1000 m. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2000 à 4000 mètres.

- **La géothermie haute énergie** (température supérieure à 150°C) :

La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à 150°C. Les réservoirs, généralement localisés entre 1500 et 3000 mètres de profondeur, se situent dans des zones de gradient géothermal anormalement élevé. . [5]

Lorsqu'il existe un réservoir, le fluide peut être capté sous forme de vapeur sèche ou humide pour la production d'électricité

Son avantage c'est que le

-Cette énergie ne produit aucun déchet.

Par contre la surexploitation d'un gisement amène la température du sous-sol à chuter ce qui fait baisser la qualité du gisement jusqu'à épuisement. [3]

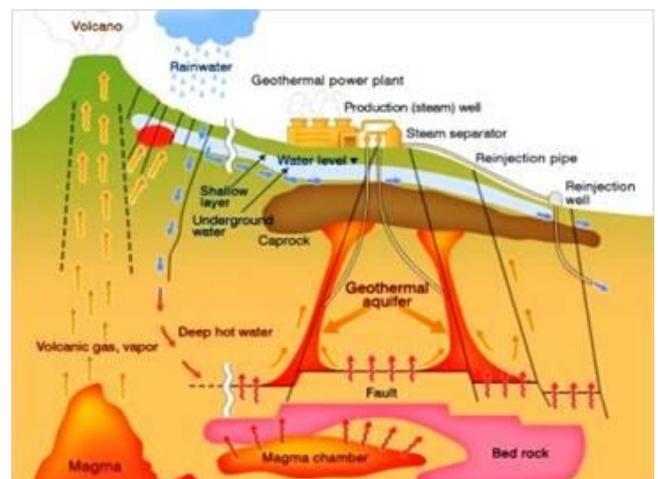


Figure I.3 : La géothermique

I.2.4. L'énergie de biomasse :

Il s'agit de l'ensemble des végétaux et donc l'ensemble des déchets organiques de l'agriculture et de l'activité humaine.

La biomasse est divisible en 3 secteurs :

➤ **Le bois énergie** : on connaît tous le bois en bûches, qui constituent l'essentiel du bois énergie. Au-delà de l'usage domestique, cette énergie se présente sous plusieurs formes comme les résidus bocagers et forestiers, sciures ... Ces déchets seront brûlés dans des chaudières à alimentation automatique pour couvrir des besoins de chauffage et aussi d'électricité, en cogénération.

Les technologies qu'on utilise pour la combustion du bois ont évolué avec des rendements atteignant les 80%.

➤ **Le biogaz** : ce sont les matières organiques qui libèrent le biogaz lors de leur décomposition selon un processus de fermentation aussi appelé méthanisation, on l'appelle aussi gaz naturel renouvelable ou même gaz de marais, par opposition au gaz d'origine fossile.

✓ **Compositions du biogaz :**

Le biogaz est un mélange de méthane de formule brute CH_4 et de gaz carbonique additionné d'autres composants, le biogaz est un gaz combustible il sert à produire de la chaleur, de l'électricité ou du biocarburant.

➤ **Les agrocarburants** : issus du colza, du tournesol, du blé ou même de la betterave, utilisés purs ou mélangés a de l'essence ou du gazole, alimentent des moteurs.[4]



Figure I.4 : schéma explicatif d'une source de la biomasse

L'avantage de cette énergie c'est une énergie qui émet peu de gaz à effet de serre et qui peut être stockée.

Par contre, elle ne peut avoir qu'un apport limité car le recours intensif à la biomasse entrainerait des impacts négatifs sur l'environnement tels que des phénomènes de déforestations (en cas d'exploitation intensive du bois-énergie).d'érosions des sols. [2]

I.2.5. L'énergie solaire :

Est l'énergie que dégage le soleil sous forme de rayonnement, direct ou diffus. Sur terre l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et du vent, le règne végétal dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique par la photosynthèse. Grâce aux diverses exécutions, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir du rayonnement solaire.

➤ Le soleil :

Le soleil est une sphère gazeuse d'hélium et d'hydrogène (80 % H 19 % He et 1 % autres éléments), sa densité moyenne est de 76000 Kg /m au centre, la masse du soleil représente 99.58% de la masse totale du système solaire et 330000 fois celle de la terre, son âge est estimé 5.10*9 ans, le diamètre du soleil atteint 1391 994 K m, Distance Terre-Soleil : 150000000 km ; Pression au centre : plus d'un milliard d'atmosphère

- Fusion nucléaire
- Consommation de 576 millions de tonnes d'hydrogène à la seconde.
- Le soleil rayonne comme un corps noir à 5800K.
- L'énergie solaire reçue par la Terre représente 10000 fois la consommation énergétique mondiale. [6]

Rayon	695997km ~ 109 rayon terrestres
Masse	1 ,989.10 ³⁰ kg ~333000 masse terrestres
Luminosité	3 ,826.10 ²⁶ W
Température de surface	5770 K
Densité de surface	~ 5.10 ⁻⁷ g /cm ³ ~ 10 ⁻⁴ atmosphère terrestre
Composition de surface	~ 70% H , 28 % He, 2 % (C , N, O, etc.)
Température centrale	~14 millions k

Tableau I.1 : paramètres solaires [7]

Le soleil est composé de trois régions principales :

- **L'intérieur** : c'est le lieu de la production de l'énergie par une suite de réactions thermonucléaires exothermiques dites « cycle de Bethe ». la température dans ces régions peut atteindre de 8.10^6 à 40.10^6 K et la pression un milliard fois la pression atmosphérique.
- **La photosphère** : c'est une mince région (300 Km d'épaisseur environ) .Elle est seule responsable de la majorité du rayonnement qui arrive au sol, sa température moyenne est quelques milliers de degrés, mais elle décroît rapidement dans l'épaisseur jusqu'à la température de la surface qui est de l'ordre de 5720 K.
- **la chromosphère et la couronne** : C'est une région faible densité, sa matière est très diluée et le rayonnement émis est très faible. [6]

Zone (désignation usuelle)	Dimensions (avec R_S = rayon du soleil)	Température (degrés kelvin)	Densité (en kg /litre)
Cœur nucléaire	0 à 0,03 R_S	13 à 15 millions k, au centre	160(au centre) à 10
Zone radiative interne	0,3 à 0,7 R_S	7 à 1 million k	10 à 1
Zone convective	0,7 à 0,999 R_S	1 million à 1500k	1 à 3.10^{-6}
Photosphère	Epaisseur de l'ordre de 350 km	En moyenne 6000 k	3.10^{-6} à 10^{-7}
Chromosphère	3000 km environ au-dessus de la surface	4000 à 20000 k	10^{-7} à 10^{-13}
Couronne	Des millions de km d'étendue	1 million à 10 millions k	10^{-13} à 10^{-17}

Tableau I.2 : structure du soleil. [7]

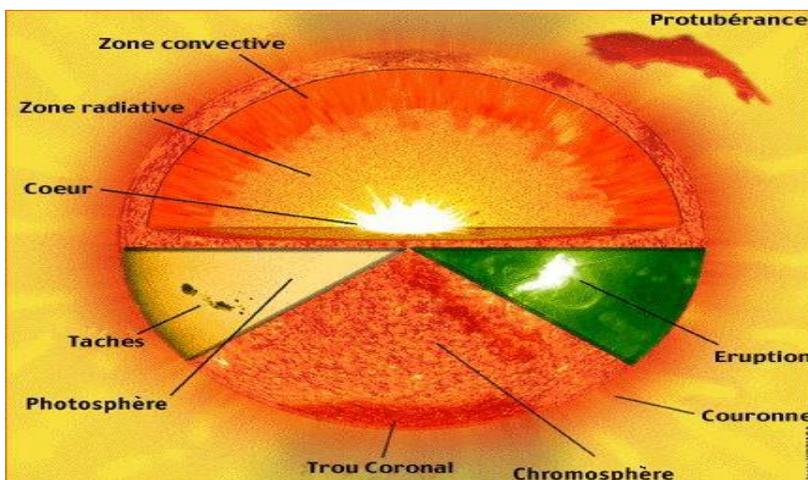


Figure I.5 : Couches externes du soleil

➤ **Structure et composition de l'atmosphère :**

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, ce sont:

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude.
- L'ionosphère entre 80 et 200 km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de:

- CO₂ (0,03%)
- Vapeur d'eau: en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.
- Ozone O₃ située entre 10 et 30 km d'altitude.
- Aérosols: grains de sable, poussières, fumées.... [8]

➤ **Le spectre solaire :**

La physique atomique nous montre que les variations d'énergie dans les atomes ne se font pas de façon continue, mais sont quantifiées.

Un ensemble de nombres quantiques définit l'état initial d'énergie de l'atome, et un autre ensemble définit l'état final. Ce passage d'un état à un autre s'appelle une transition. Il s'accompagne soit de l'absorption d'énergie à une longueur d'onde précise si l'état final est plus énergétique, soit de l'émission d'énergie à une longueur d'onde précise si l'état final est moins énergétique. Un atome excité de cette façon a toujours tendance, au bout d'un temps plus ou moins long, à revenir à son état le plus stable, directement ou non, appelé état fondamental.

➤ **Les principaux types de rayons qui parviennent sur Terre et leurs effets :**

Le soleil émet des particules, appelées photons, en très grandes quantités. C'est le rayonnement solaire. Ces flux de photons qu'on appelle également radiations ou rayons, voyagent dans l'espace à la vitesse de 300 000 km/s (c'est la vitesse de la lumière) et atteignent la terre à différentes longueurs d'ondes. On distingue par leur longueur d'onde les différents types de rayons :

Les rayons de longueur d'ondes très courtes (les rayons x, gamma,), extrêmement dangereux sont heureusement arrêtés dès les couches supérieures de l'atmosphère.

Les rayons de longueur d'onde très longue (ondes radio) sont très faibles à la surface de terre.

Nous parviennent essentiellement :

- Les Ultraviolets (UV), de 200 nm à 400 nm, invisibles, sans échauffer, provoquent des dommages sur les cellules.
- La Lumière visible, de 400 à 800 nm, visibles, ils nous permettent de distinguer les formes et les couleurs.
- Les Infrarouges (IR), de 800 à 1400 nm, invisibles, chauffent la matière solide ou gazeuse qu'ils rencontrent. [9]
- Généralement le rayonnement émis par le soleil (AM0 : hors l'atmosphère de la terre) est constitué de 9% UV, 43% lumière visible et 48% d'infrarouge.

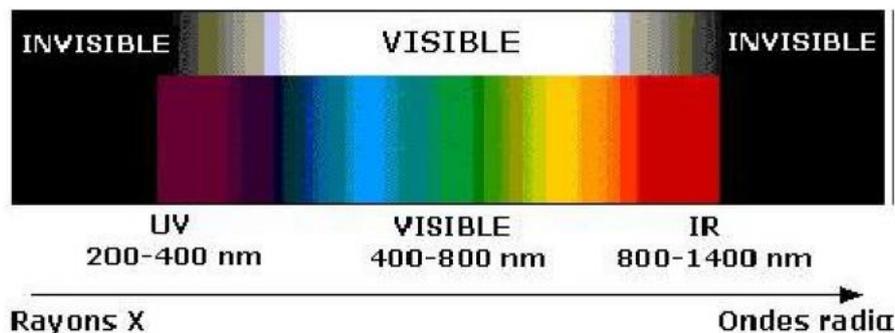


Figure I.6 : Répartition du rayonnement solaire

➤ **L'albédo solaire :**

C'est la partie réfléchi par le sol .

Il dépend de l'environnement du site .

La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun.

Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

Surface	Albédo solaire a^*
mer chaude	0,05
Lune	0,07
mer froide	0,15
pierre ,cimet	0,15 à 0,25
sable claire	0,37
Nuage	0,8

Tableau I.3 : Albédo solaire de différentes surfaces

➤ **Constante solaire :**

La valeur du flux de rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaire placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre.

Soit à environ 80 Km d'altitude, vari au cours de l'année avec la distance terre /soleil. Sa valeur moyenne est appelée la constante solaire C^* . Cette valeur est environ à $1353\text{W}/\text{m}^2$. [10]

L'écarte relatif du flux solaire ne dépasse pas 3,4% en valeur absolue

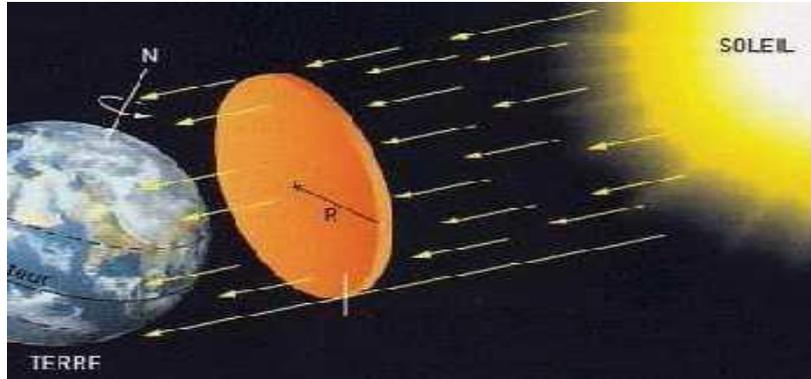


Figure I.7 : la constante solaire.

I.2.5.1. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire :

➤ la masse atmosphérique (masse d'air) : [11]

L'atténuation dépend de la longueur du trajet optique l , et de la densité de molécules, définie par la masse volumique ρ .

Le produit $(l \cdot \rho)$ représente la masse d'une colonne d'air de longueur l et de section unité. On l'appelle "masse atmosphérique \dot{m} " (ou masse optique) \dot{m}

$$\dot{m} = \int_0^{\infty} \rho \cdot dl \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (\text{I.1})$$

ρ et l sont fonction de l'altitude z .

On appelle "masse atmosphérique unité \dot{m}_1 " la masse atmosphérique pour la direction du zénith :

$$\dot{m}_1 = \int_0^{\infty} \rho \cdot dz \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (\text{I.2})$$

La grandeur utilisée par la suite sera la "masse atmosphérique relative m^* " :

$$m^* = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_1} \quad (\text{I.3})$$

C'est donc le rapport entre la masse atmosphérique pour un trajet optique de hauteur h et celle pour un trajet vertical.

Calcul, cas simplifié :

On considère l'atmosphère de densité uniforme (pas de réfraction par conséquent) et plate. Le trajet des rayons lumineux est donc rectiligne. (Voir figure I.8)

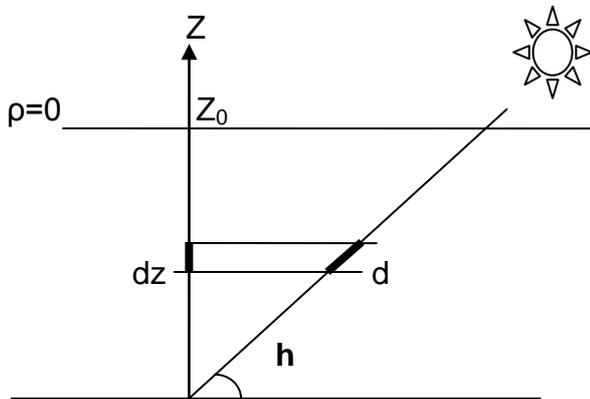


Figure I.8 : cas simplifié

$$dl = \frac{dz}{\sin h} \quad \text{d'où : } m^* = \frac{\int_0^{Z_0} \rho_0 \cdot dl}{\int_0^{Z_0} \rho_0 \cdot dz} = \frac{1}{\sin h} \quad (I.4)$$

La masse atmosphérique relative est donnée par la relation, très simple :

$$m^* = \frac{1}{\sin h} \quad (I.5)$$

Pour le soleil au zénith ($h=90^\circ$), $m^* = 1$, et pour le soleil vu sous un angle $h=30^\circ$, $m^*=2$

En réalité, la courbe de la terre implique un trajet plus long.

De plus la densité variable de l'atmosphère entraîne une courbure des rayons lumineux ce qui rallonge un peu plus le trajet parcouru par la lumière.

Lorsqu'un récepteur est placé en altitude par rapport au niveau de la mer ($z_0=0$, $\rho_0=1013hPa$), le trajet des rayons lumineux est raccourci.

La masse atmosphérique réelle m que l'on distingue de la masse atmosphérique théorique m^* est : **[12]**

$$m = [(1229+ (614 \cdot \sin h)^2)^{1/2} - 614 \cdot \sin h] \frac{P}{1013} \quad (I.6)$$

➤ **Atténuation du rayonnement solaire :**

Deux phénomènes atténuent le rayonnement solaire traversant l'atmosphère terrestre. Il s'agit de l'absorption et de la diffusion.

a) L'absorption :

Elle est sélective et dépend principalement de 4 éléments :

- L'ozone qui forme un écran qui arrête les UV ($\lambda < 0,28$) nocifs pour la vie.
- L'oxygène qui absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers 0,69 et 0,676)
- Le gaz carbonique qui absorbe une partie de l'IR lointain ($\lambda > 2$).
- La vapeur d'eau qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'IR. On ne la rencontre pratiquement qu'au niveau du sol ($z < 5$ km).

b) la diffusion :

Elle se produit avec les molécules de l'air, celles de la vapeur d'eau et les particules en suspension. Elle est d'autant plus importante que la longueur d'onde du rayonnement est petite (loi de Rayleigh en λ^{-4}) et que l'air est humide et pollué. Ce que l'air est humide et pollué. Ce phénomène explique pourquoi le ciel est bleu dans la journée et rouge-orangé le matin et le soir lorsque le soleil est bas sur l'horizon. [12]

En effet, considérons le soleil à midi ; le trajet des rayons lumineux est relativement court. Compte tenu de la loi de Rayleigh, le rayonnement de courte longueur d'onde est plus diffusé par les molécules de l'atmosphère que le rayonnement de grande longueur d'onde ; il s'en suit que la lumière bleue ($\lambda = 0,47\mu\text{m}$) est plus diffusée que la lumière rouge ($\lambda = 0,67\mu\text{m}$) et le ciel nous paraît bleu. A l'aurore ou au crépuscule, la même loi s'applique ; mais comme le trajet de la lumière est beaucoup plus long, les longueurs d'onde bleues sont diffusées mais aussi absorbées et il ne reste, fortement atténuées, que les grandes longueurs d'onde. La rétine de l'observateur qui fixe le soleil enregistre alors un disque rougeoyant.

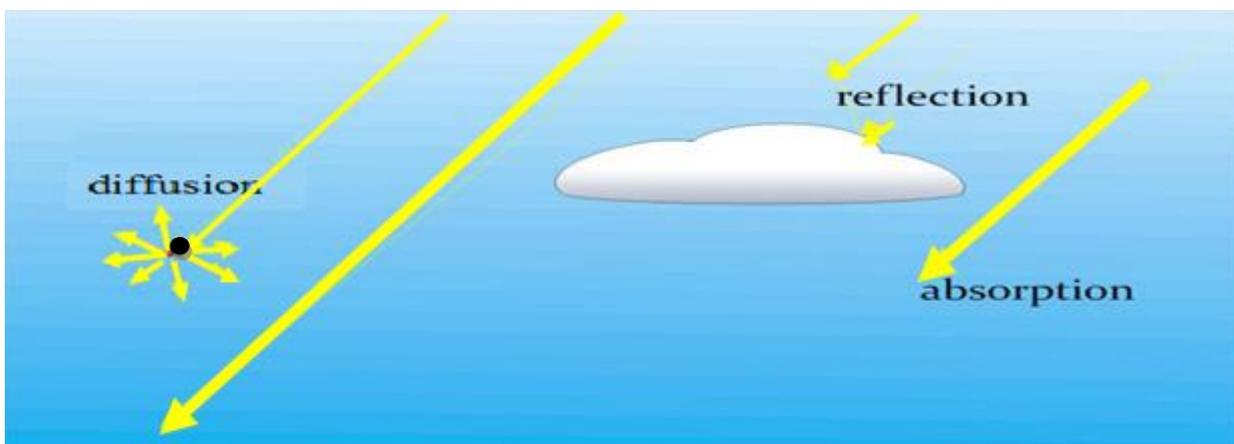


Figure I.9 : Atténuation du rayonnement solaire

➤ **Importance et effets de l'énergie solaire reçue par la terre et son atmosphère :**

L'énergie rayonnante d'origine solaire parvenant au niveau du sol ou des eaux, aux environs de midi vrai et par bonne insolation, correspond à une puissance d'environ 1 kilowatt par mètre carré.

La puissance moyenne parvenant à la surface de la Terre de 107000 milliards de kilowatts (107 milliards de mégawatts). On comprend combien cette puissance est gigantesque quand on sait qu'une centrale électrique de 1000 mégawatts est déjà une grande centrale.

L'énergie solaire parvenant en une année aux terres émergées représente plusieurs milliers de fois la consommation annuelle actuelle de l'humanité en énergie et, si l'on considère l'ensemble du globe, l'énergie solaire reçue en un an à sa surface représente environ 5000 fois la consommation mondiale d'énergie qu'on peut prévoir pour l'an 2000.

Cette énergie reçue par la terre est diversement utilisée. Tout d'abord, elle contribue à maintenir la surface de la terre à une température moyenne voisine de 290 degrés absolus (17 degrés centigrades). De plus, elle crée les courants marins, les vents et les pluies, les orages les tempêtes et les cyclones. Elle est aussi la source énergétique de la photosynthèse chlorophyllienne.

Les nuages et les pluies sont consécutifs à l'évaporation des eaux et des terres humides.

C'est l'énergie solaire parvenant à la surface du globe qui entretient cette évaporation, celle-ci absorbant par kilogramme d'eau environ 580 kilocalories, soit 0,7 kilowatt-heure. La vapeur d'eau atmosphérique peut ensuite se condenser et l'on peut dire que sa chaleur de condensation est une forme évoluée de l'énergie solaire. La vapeur d'eau atmosphérique constitue donc autour du globe un énorme accumulateur d'énergie ex-solaire, qui est libérée quand la vapeur d'eau se condense : c'est ce qui se produit au cours de la formation des nuages, et c'est cette libération d'énergie latente, quand elle est intense ou brutale, qui provoque la formation violents orages, tempêtes, d'ouragans.

Les pluies mettent en jeu pour l'ensemble du globe une masse d'eau d'environ mille milliards de tonnes par jour. S'il n'y avait pas de recyclage naturel de l'eau, par suite de l'évaporation sur les terres et les mers le niveau de l'ensemble des océans baisserait d'un mètre par an. Lors des pluies, la retombée des eaux est, du point de vue de l'énergie directement utilisable, en grande partie perdue pour l'humanité, les usines hydroélectriques ne pouvant fournir qu'à peine le dixième des besoins mondiaux actuels

en énergie. Par contre, les végétaux utilisent une bonne partie des eaux de pluie ; un kilogramme de végétal, compté en matières sèches, nécessite pour se former de 300 à 1000 kg d'eau selon les espèces et les climats, et il y a là conjonction de deux aspects de l'utilisation naturelle de l'énergie solaire, étant donné que la photosynthèse intervient dans la formation des végétaux. On admet que la production primaire annuelle de la photosynthèse, exprimée en carbone fixé, est pour l'ensemble des végétaux terrestres de 20 milliards de tonnes ; en outre, la production des algues vertes, brunes et rouges dans le milieu marin décuple probablement ce chiffre. [13]

Les transformations de l'énergie solaire ont permis le développement de 3 filières d'exploitation :

- + pour la chaleur : solaire thermique (capteurs plans)
- + pour l'électricité : solaire photovoltaïque (capteurs photovoltaïque)
- + pour l'électricité : solaire thermodynamique (capteurs concentrateurs)

a) Energie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire. La chaleur utilise une onde électromagnétique propulsée par des photons lesquels sont des quantas d'énergie résultant de l'interaction électrons-protons. La conversion thermique s'effectue dans un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique ou panneaux solaires thermiques). C'est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du soleil en convertissant la lumière en chaleur et la transmettre à un fluide caloporteur liquide (eau ou antigel ou air). Le capteur thermique est désigné comme capteur photo thermique.

L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications: [14]

- La production d'eau chaude,
- Le séchage des récoltes,
- Le chauffage des maisons,
- La réfrigération par absorption pour les bâtiments,
- Le chauffage de l'eau des piscines,

Les principaux types de capteurs solaires thermiques sont les suivants :

❖ **Les capteurs plans :**

Trois fonctions incombent à ces capteurs, absorber le rayonnement solaire, le transformer en chaleur et transmettre cette chaleur au fluide caloporteur. Pour absorber au maximum l'énergie rayonnée du soleil, il suffit d'une surface plane placée de façon judicieuse ; cette surface doit être douée du coefficient d'absorption de la couche superficielle le plus élevé possible.

Pour limiter les pertes par réémission de rayonnement infrarouge, il importe que l'absorbeur possède aussi la propriété d'émission superficielle la plus faible possible.

Dans ce cas, l'absorbeur sera qualifié de « sélectif ».[15]

b) Energie solaire photovoltaïque :

On parle généralement d'énergie solaire photovoltaïque car le soleil est la source lumineuse la plus intense de notre planète, et la plus part des applications sont en plein air.

Mais certain préfèrent l'expression énergie lumière, puisque toute source de lumière génèrent de l'électricité à travers une cellule photovoltaïque.

L'électricité produite correspond à un courant continu(CC), qui est convertie en courant alternatif (par un onduleur CC/CA) a fin de l'utilisé en secteur.

❖ **Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:**

La cellule photovoltaïque (ou cellule solaire) est l'élément de base de l'effet photovoltaïque (ou conversion par photopiles) permettant de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire.

Ce phénomène implique la production et le transport de charges négatives et positives sous l'effet de la lumière dans un matériau semi-conducteur (qui est la plupart du temps, le silicium).

En heurtant la surface de ce matériau, les photons transfèrent leur énergie aux électrons contenus dans la matière dopée négativement et positivement (jonction p-n).

Ceux- ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique continu (CC) I qui est recueilli par des fils métalliques très fins micro-soudés en surface

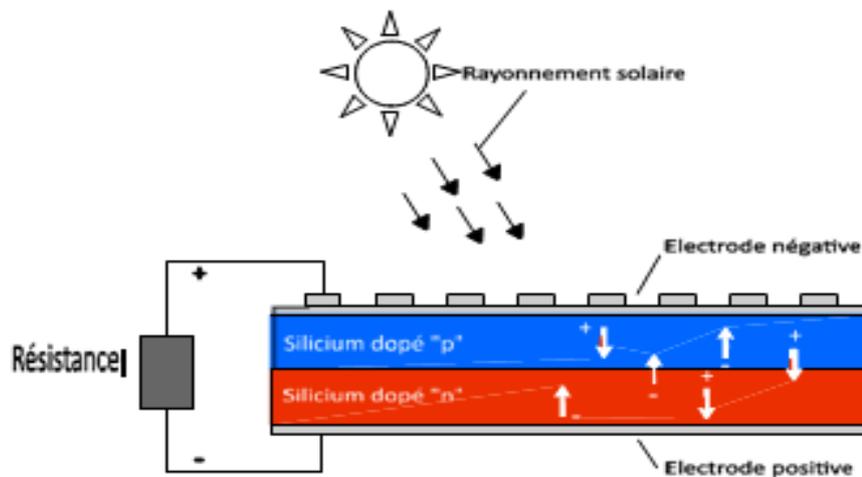


Figure I.10 : schéma d'un capteur photovoltaïque

➤ Les différentes technologies:

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel.

❖ Cellule en silicium monocristallin:

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Avantage:

- Très bon rendement (17.2%).

Inconvénients:

- Coût élevé ; Rendement faible sous un faible éclairement.

❖ Cellule en silicium poly cristallin:

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

Avantage:

- Bon rendement (13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin.

Inconvénient:

- Les mêmes que le monocristallin.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité prix).

❖ **Cellule en silicium amorphe:**

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre.

La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres.

Avantage:

- Fonctionnement avec un éclairage faible ; Moins chères que les autres.

Inconvénients:

- Rendement faible en plein soleil (environ 7%)
- Performances diminuent sensiblement avec le temps. [12]



Cellule mono cristalline



cellule poly cristalline



cellule amorphe

Figure I.11 : les différentes Cellules photovoltaïque

c) Les capteurs à concentration :

Ce sont des capteurs solaires comportant un système optique (réflecteurs, lentilles...) destinés à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement ayant traversé l'ouverture.

Les solutions pour concentrer le rayonnement solaire sont trop nombreuses pour que l'on puisse ici en faire une présentation exhaustive aussi, avant de songer à concevoir un concentrateur original, il est impératif de consulter une documentation spécialisée (livres et périodiques cités en bibliographie). [8]

Beaucoup de ces solutions ne sont d'ailleurs pas satisfaisantes en vue de la production d'énergie solaire en raison des contraintes technologiques et économiques.

Avantage et inconvénient

Le concentrateur est un dispositif qui permet, par réflexion ou réfraction du rayonnement incident, de soumettre le convertisseur à des flux surfaciques intenses ; la

conversion héliothermique à température élevée devient alors envisageable ; jusqu'à environ 300°C, sous quelques centaines de w.m^{-2}

Inconvénients

_ D'ordre physique

Perte à la réflexion ou à la transmission, d'une fraction du rayonnement direct (partie rayonnement global directement issue du soleil) selon la valeur du facteur de réflexion, ou de transmission du concentrateur (par exemple 0.9).

Perte totale ou partielle du rayonnement diffus (seconde composante du rayonnement global) qui provient de l'environnement, et non plus du soleil, par rapport auquel les calculs de trajectoires optiques ont été effectués (plusieurs dizaines de KW.m^2).

_ D'ordre technologie et économique

Le capteur à concentration est souvent plus sophistiqué (par exemple, mobile) et donc plus cher par unité de surface que le capteur plan traditionnel à l'investissement comme à la maintenance.

➤ Classification des capteurs a concentration :

❖ Les capteurs paraboliques :

Différents types de collecteurs paraboliques tout quatre expérimentés en Allemagne.

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome.

Ils sont constitués d'une grande parabole de révolution réfléchissante et d'un moteur « Stirling » au foyer de la parabole. Le tout pivote sur 2 axes pour suivre le déplacement du soleil afin de concentrer son rayonnement sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est généralement d'environ 4000 et la température obtenue entre 500 et 1000°C.

Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Pour ce type de système, le stockage n'est pas possible. **[16]**

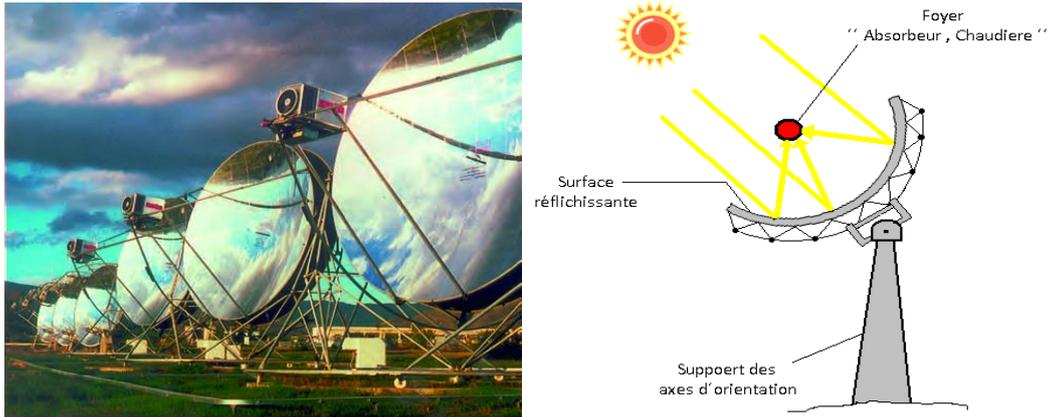


Figure I.12 : Les capteurs paraboliques

❖ **Les capteurs cylindro-paraboliques :**

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal dans lequel circule un fluide caloporteur (généralement une huile synthétique).

Les tuyaux étant noirs, ils absorbent toute la chaleur du soleil et permettent à la température du fluide de monter jusqu'à 500° C.

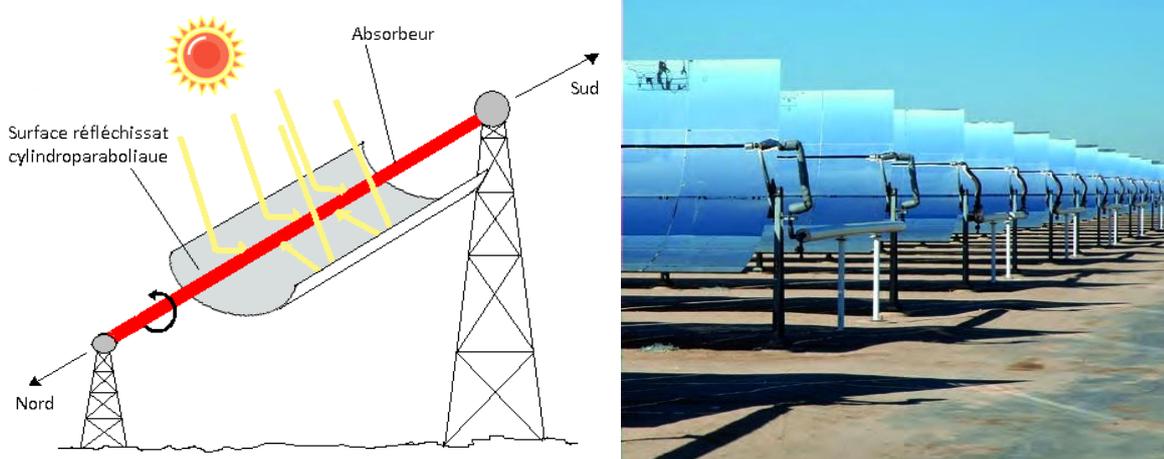


Figure I.13 : Les capteurs cylindro-paraboliques

❖ **Les centrales solaires à miroir de Fresnel :**

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques repose sur la mise en forme du verre pour obtenir sa forme parabolique. Une alternative possible consiste à approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans.

C'est le principe du concentrateur de Fresnel. Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes.

En circulant dans ce récepteur horizontal, le fluide thermodynamique peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500 °c.

La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur. [16]

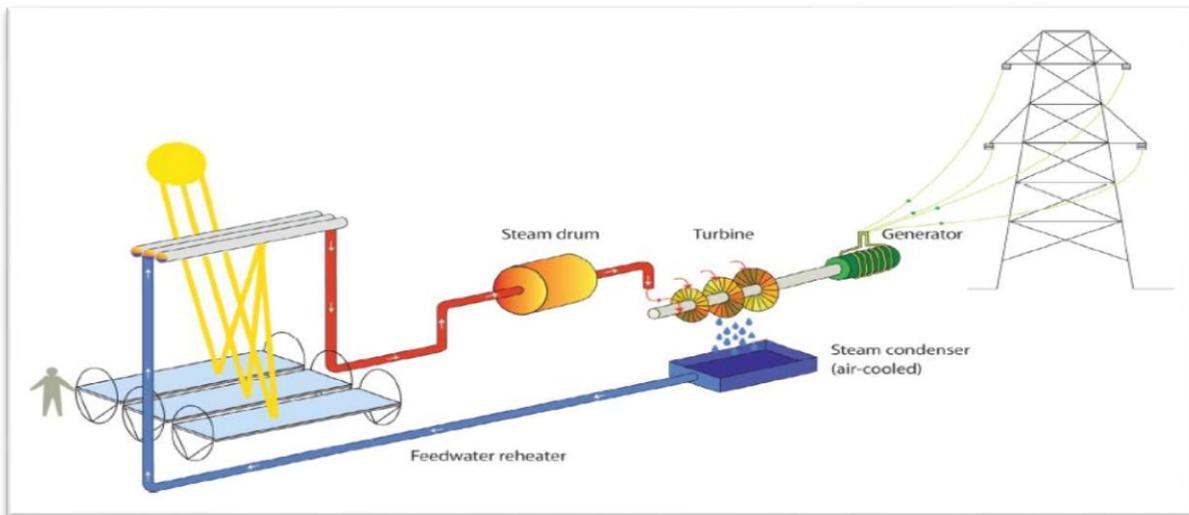


Figure I.14 : Les centrales solaires à miroir de Fresnel

❖ Les centrales à tour :

Le principe des centrales à tour est le suivant :

Des héliostats au sol réfléchissent les rayons du soleil vers une chaudière en haut d'une tour où un liquide (généralement du sel fondu) est chauffé jusqu'à 2000°C.

Ce liquide porte ensuite à ébullition de l'eau dont la vapeur actionne des turbines et produit de l'électricité

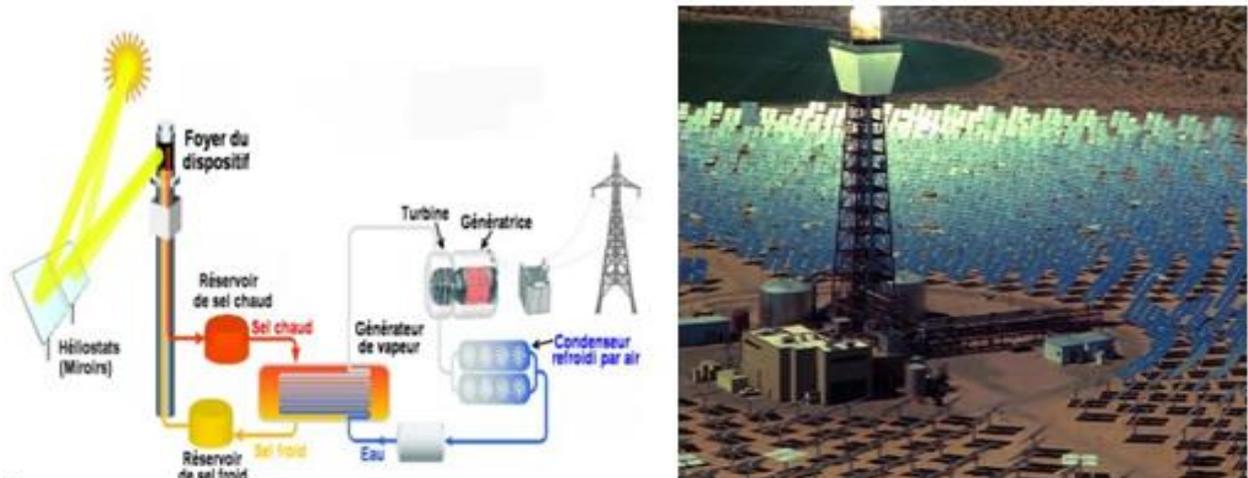


Figure I.15 : Les centrales à tour

❖ Constitution des miroirs concentrateurs :

A l'origine, les miroirs étaient généralement en cuivre ou autre métal assez facilement altérable ; puis, on a proposé d'utiliser des alliages doués d'une grande dureté, pour éviter aux miroirs d'être rayés ou dépolis sous l'action poussières de l'atmosphère ou des grains de sable projetés par le vent. Par la suite, on a utilisé divers matériaux : verre argenté ou aluminé, aluminium poli, tôle d'aluminium polie (polie par laminage puis par procédé électro-lytique, et protégée par un film d'alumine déposé par un procédé anodique) ; on a utilisé aussi des matières plastiques.

Dans dernier cas, ce peut être une matière plastique aluminée par vaporisation sous vide et protégée, selon le même procédé, par un film de silice ou d'alumine ; ce peut être une matière plastique rigide à structure stratifiée, ou se présentant en un film très mince d'une grande résistance mécanique. L'acier inoxydable a été expérimenté, mais n'est plus utilisé parce que son pouvoir réflecteur est insuffisant. [13]

I.3. Mesure du rayonnement solaire :

Pour mesurer le rayonnement solaire au niveau de sol on peut utiliser les instruments suivants :

➤ Le radiomètre : [17]

Le radiomètre est un appareil permettant de mettre en évidence l'énergie transportée par les radiations, il est constitué d'une ampoule de verre contenant de l'air à faible pression et un petit moulin à quatre pales ayant chacune une face noire et une face blanche. Il en résulte une dissymétrie dans l'absorption du rayonnement incident, qui provoque la mise en rotation du moulin.

➤ Le pyranomètre : [18]

Les pyranomètres mesurent le rayonnement global (direct + diffus) de toute l'hémisphère céleste dans la bande de longueur d'onde 0.3 à 3 μm . Le pyranomètre d'Eppler est une thermopile adaptée à cet usage. La surface réceptrice comporte deux anneaux concentriques en Argent; l'anneau intérieur est recouvert de noir, l'anneau extérieur recouvert de blanc.

La différence de température mesurée entre les deux anneaux par des thermocouples en contact thermique avec les surfaces intérieures des anneaux mais isolés électriquement, peut être enregistrée à raison d'une lecture par heure sous forme d'une tension de sortie de l'ordre du mV(enfait $10\mu\text{V/W/m}^2$).



Figure 7. Pyranometer with sun screen

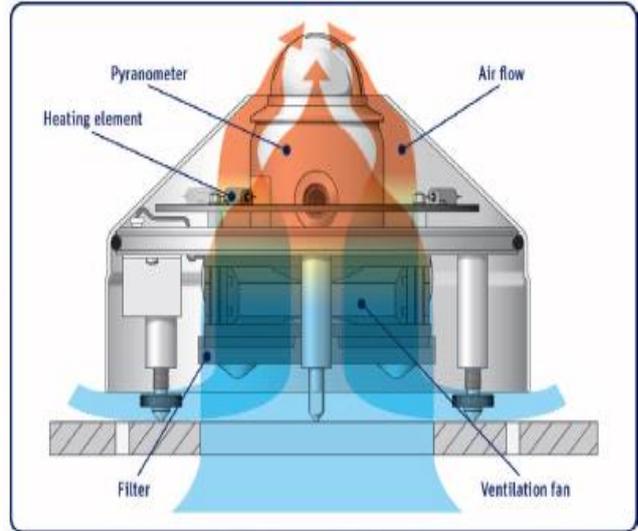


Figure 8. Ventilation unit (Source: Kipp & Zonen)

Figure I.16 : Le pyranomètre

➤ **Le pyréliomètre : [19]**

Les pyréliomètres mesurent le rayonnement direct. Ils comportent une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale au rayonnement par un système de poursuite automatique. La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à 5.7°(le diamètre apparent du soleil est de 0.5°). Le tube est fixé sur une monture équatoriale. On mesure la température du disque d'argent à intervalles réguliers en ouvrant et en occultant alternativement l'entrée de l'appareil.

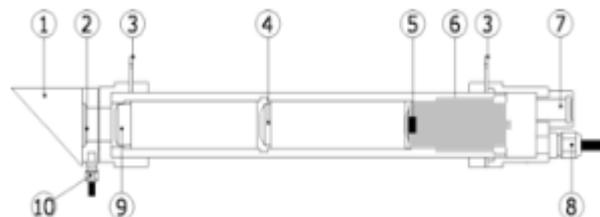


Diagramme d'un pyréliomètre :

- 1) Capuchon de protection
- 2) Ouverture chauffée
- 3) Viseur
- 4) Capteur
- 7) Hygromètre
- 10) Câble pour alimenter le chauffage

Figure I.17 :Pyréliomètre



Figure I.18 : station de mesure

- 1-Pyranomètre pour mesurer l'éclairement solaire global
- 2-Pyranomètre pour mesurer la composante de rayonnement diffus
- 3-Perhéliomètre pour mesurer l'éclairement solaire direct.
- 4-ballon utilisé pour cacher définitivement le pyranomètre 2
- 5-suiveur solaire à 2 axes