

## **Energie solaire thermique**

## I. Solaire thermique

L'énergie solaire thermique est la transformation instantanée de l'énergie des rayons solaires en énergie thermique.

Cette transformation peut être utilisée directement, comme par exemple le chauffage de l'eau sanitaire à l'aide des capteurs solaire, ou indirectement dans le cas de la production de l'électricité dans une centrale thermodynamique solaire. Le solaire thermique est basé sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement qui est différente de celle du photovoltaïque où l'électricité est générée par l'énergie des photons.

L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications :

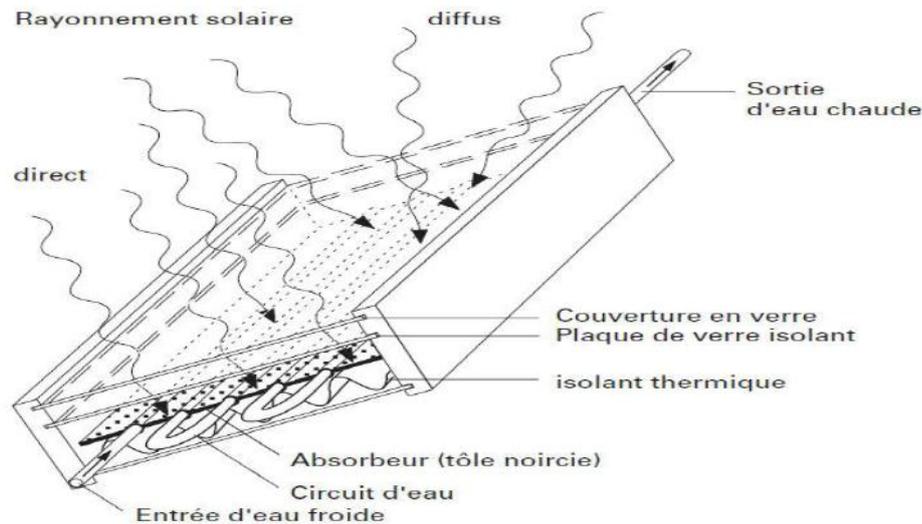
- ✚ la production d'eau chaude,
- ✚ le chauffage des maisons,
- ✚ le chauffage de l'eau des piscines,
- ✚ le séchage des récoltes,
- ✚ distillation
- ✚ la réfrigération par absorption pour les bâtiments,
- ✚ la production de très haute température.

La chaleur produite par une installation solaire thermique permet donc de subvenir directement à des besoins, contrairement à une installation solaire photovoltaïque dont la production d'électricité est en totalité injectée sur le réseau électrique.

En cela, les installations solaires thermiques sont dimensionnées pour répondre à des besoins d'eau chaude sanitaire, de chauffage d'une habitation ou de l'eau d'une piscine. L'énergie solaire produite permettant la substitution d'énergies « classiques », fossiles ou nucléaire, qui, en plus d'être fortement polluantes en termes de rejets atmosphériques ou de déchets produits, présentent des ressources limitées. L'énergie solaire, quant à elle, est non seulement gratuite et inépuisable, mais elle ne génère aucune pollution.

### Capteur solaire thermique

Un capteur solaire est un dispositif destiné à absorber le rayonnement solaire et à transmettre la chaleur ainsi produite à un fluide caloporteur.



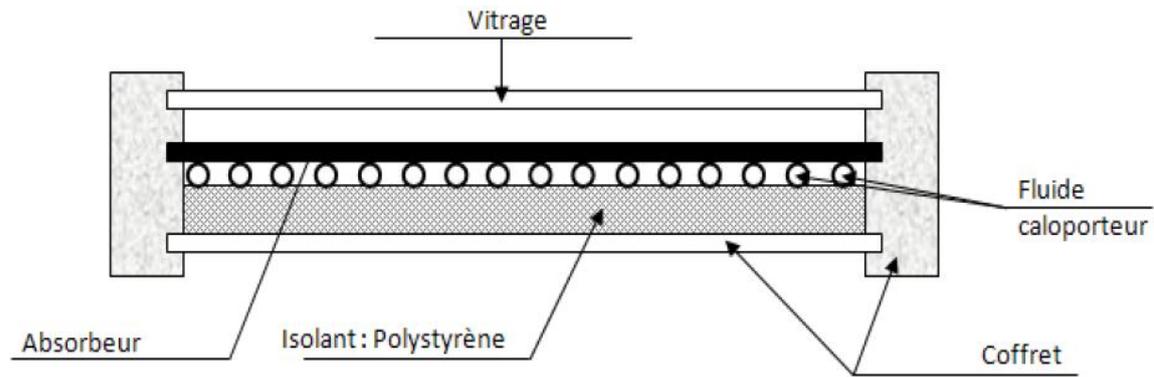
**Figure 1:** Schéma d'un panneau solaire thermique

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considéré, la nature de l'élément caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre.

Le type d'application peut aller donc du chauffage d'une piscine avec un capteur léger, à une centrale solaire thermodynamique produisant de l'électricité. Le fluide caloporteur peut être de l'air, de l'eau, un mélange antigel, un fluide à changement de phase, ou encore une huile possédant une température de vaporisation élevée pour les applications nécessitant de hautes températures.

### **Les capteurs plans :**

Ils comprennent un caisson isolant au-dessus duquel est fixée une vitre en verre ou en plastique. À l'intérieur, une feuille métallique noire absorbe la chaleur du soleil emprisonnée dans le caisson. Cette chaleur est transmise à de l'air, de l'eau ou tout autre fluide caloporteur qui ne gèle pas. Le fluide circule librement ou dans des tuyaux vers le point d'utilisation. L'élévation de température par rapport à l'air ambiant peut atteindre +70 °C. C'est l'idéal pour produire de l'eau chaude domestique ou chauffer des bâtiments, la figure ci-dessous montre les composants.



**Figure2:** Coupe d'un capteur solaire plan à eau.

### **-Vitrage:**

La vitre solaire avec une grande transmission lumineuse, optimise les rendements solaires et résiste aux intempéries.

### **-L'absorbeur :**

Feuille métallique noire qui capte la chaleur du rayonnement solaire, il assure deux fonction: absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible, transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de pertes. L'absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes : un bon coefficient d'absorption, une bonne conductivité thermique et une bonne résistance à la corrosion. Le choix du matériau et le mode de construction à une grande influence sur la qualité du capteur.

Du fait de leurs conductivités élevées, les absorbeurs son généralement **en cuivre, en acier ou en aluminium.**

### **-Entrée du caloporteur.**

Le caloporteur froid s'écoule dans les tubes de circulation pour absorber l'énergie solaire piégée dans le capteur.

### **Sortie du caloporteur.**

Le caloporteur qui sort du capteur à une température élevée (pouvant atteindre 80 °C environ), est stocké ou utilisé immédiatement.

### **-L' isolation thermique arrière et latérale**

Les isolants utilisés sont de la laine de verre ou de la mousse polyuréthane de 4 à 8 cm. Les propriétés des isolants les plus utilisés sont : la laine de roche, laine de verre, Polyuréthane, Polystyrène, liège expansé.

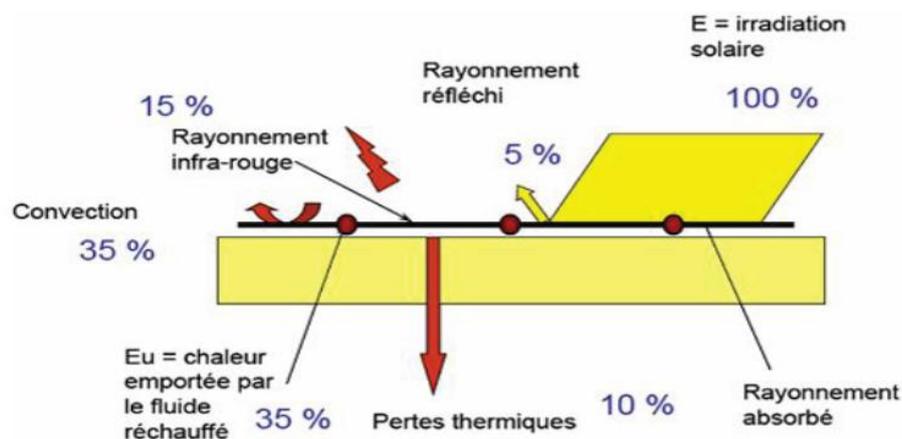
### **Le coffre du capteur:**

C'est une structure sous forme de cadre qui consolide l'ensemble.

### Les types des capteurs solaires plans

**Les capteurs plans non-vitrés:** Dans ces capteurs, l'eau circule dans un absorbeur, généralement noir, ouvert à l'air. Ces capteurs ne sont pas isothermes, ils conviennent mieux à des applications à basse température, où la température désirée est inférieure à 30°C.

Les capteurs plans sans vitrage sont habituellement fabriqués par un plastique noir qui a été stabilisé afin de résister aux rayons ultraviolets, comme ces capteurs ne possèdent pas de vitrage, une grande partie de l'énergie solaire est absorbée. Cependant, parce qu'ils ne sont pas isothermes, une grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a du vent et lorsque la température extérieure n'est pas assez chaude.

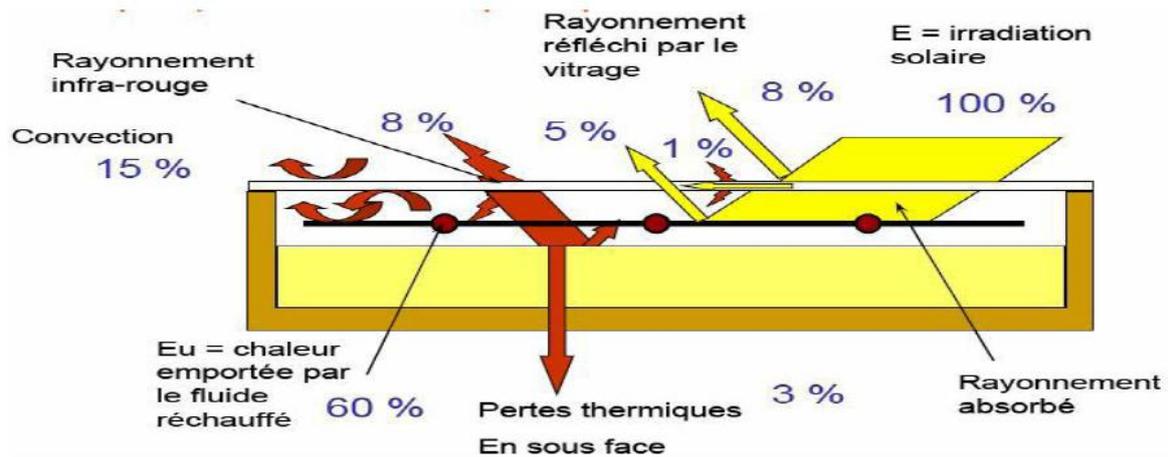


**Figure 3:** Principe de fonctionnement des capteurs plans sans vitrage

### Les capteurs plans vitrés:

Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où la température désirée se situe entre 30 et 70 °C.

Dans ce type de capteur, l'absorbeur plan transforme les rayons solaires en chaleur. Afin de réduire au minimum la perte de chaleur, l'absorbeur est situé entre vitrage (vitre plane ou matériau transparent) et un panneau isolant.



**Figure 4 :** Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.

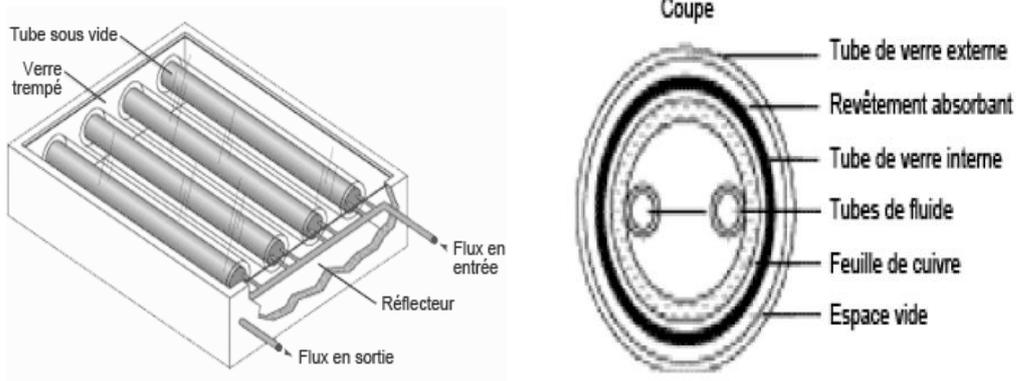
#### Les collecteurs à tubes sous vide:

Ils se présentent sous la forme d'un panneau où sont alignés des tubes de verre transparents sous vide, un des meilleurs isolants thermiques. Dans chaque tube, un absorbeur capte la chaleur solaire et un échangeur la transmet à un fluide caloporteur. Comme avec les autres capteurs, le fluide va alors circuler vers les points d'utilisation. Grâce à des déperditions de chaleur très faibles, la température peut s'élever jusqu'à 100-140 °C. Ces capteurs sont adaptés aux applications industrielles nécessitant de hautes températures (nettoyage d'abattoirs, pasteurisation de conserves, etc.).

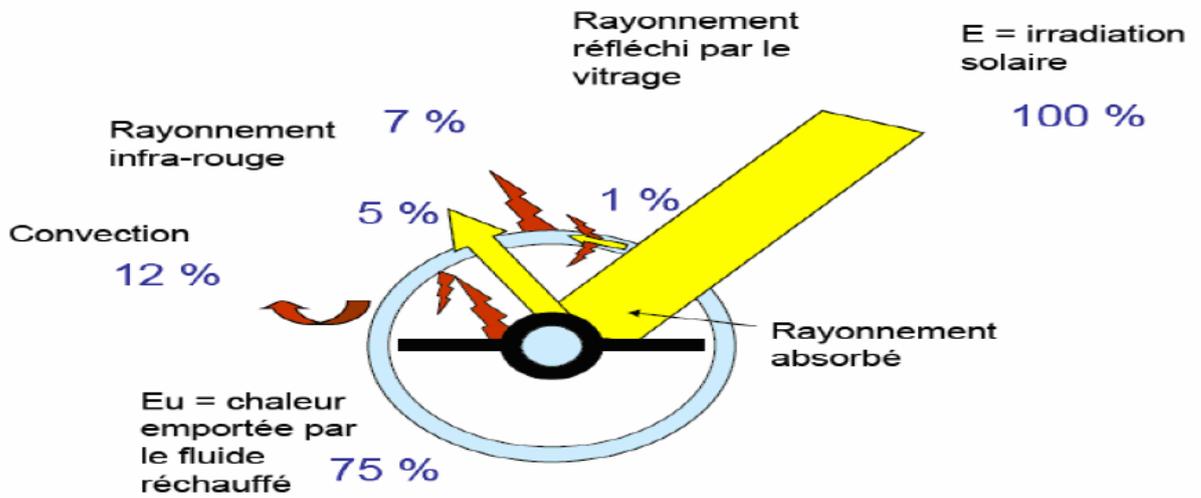
Un capteur solaire thermique sous vide est composé: d'une série des tubes de verre sous vide, d'un absorbeur à l'intérieur de tube de verre et d'un tube en cuivre à l'intérieur de tube de verre. Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur. Ce dernier se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes, la figure ci-dessous montre le fonctionnement d'un capteur sous vide.

#### Remarque :

Un fluide caloporteur circule dans plusieurs tubes à double paroi sous vide, qui leur garantissent une très bonne isolation thermique. Le vide étant le meilleur isolant connu.

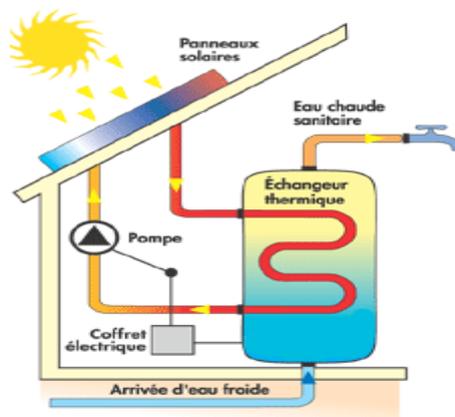


**Figure 5 :** Capteur solaire thermique sous vide



**Figure 6 :** Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide.

**Application sur le chauffe-eau solaire :** C'est l'application la plus courante du solaire thermique.



**Figure 7:** Chauffe-eau solaire

### Principe de fonctionnement

Un panneau solaire thermique a pour but de transmettre la chaleur émise par le soleil à notre système de chauffage solaire les rayons du soleil traversent la vitre, à l'intérieur une plaque absorbante qui a pour but de capter les rayons solaires. Puis, la chaleur ainsi générée est transmise à un circuit d'eau qui alimente un circuit secondaire qui, à son tour, alimente une habitation en eau sanitaire.

### Bilan thermique d'un capteur

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit :

$$\varphi_{sa} = \varphi_p + \varphi_u + \varphi_{st} \quad (\text{en W})$$

Où :

$\varphi_{sa}$  : Flux solaire absorbé

$\varphi_p$  : Flux perdu par la paroi absorbante

$\varphi_u$  : Flux utile transmis au fluide caloporteur

$\varphi_{st}$  : Flux stocké dans le capteur qui s'écrit :

$$\varphi_{st} = M_e c_{eau} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{en W})$$

Où  $M_e$  : Masse en eau du capteur définie par :  $\sum m_i c_i = M_e c_{eau}$  ;  $i$  représente les différents éléments constitutifs du capteur

$T$  : Température moyenne du capteur

$t$  : Temps

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$\varphi_{sa} = \tau_{cs} \alpha_{ps} G^* S \quad (\text{en W})$$

Où :

$\varphi_{sa}$  : Flux solaire absorbé par la surface exposée (W)

$G^*$  : densité de flux solaire incident sur le capteur ( $\text{W.m}^{-2}$ )

$\alpha_{ps}$  : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire

$\tau_{cs}$  : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire

S : Surface de la paroi absorbante.

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit :

$$\varphi_u = \dot{m}c(T_{fs} - T_{fe}) \text{ (en W)}$$

Où :

$\dot{m}$  : Débit massique du fluide caloporteur

$c$  : Capacité calorifique du fluide caloporteur

$T_{fs}$  : Température d'entrée du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur

$T_{fe}$  : Température de sortie du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$\varphi_p = h_p(T_{pm} - T_a)S \text{ (en W)}$$

Où :

$h_p$  : Coefficient global de pertes du capteur

$T_{pm}$  : Température moyenne de la paroi absorbante

$T_a$  : Température de l'air extérieur

Dans le cas d'un capteur plan, la température moyenne  $T_{pm}$  peut en première approximation être calculée par :

$$T_{pm} = \frac{3T_{fs} - T_{fe}}{4} + \Delta T \text{ (en } ^\circ\text{C)}$$

Pour tenir compte de la non-linéarité de l'évolution de la température du fluide dans le capteur et de l'écart de température  $\Delta T$  existant entre le fluide et la paroi absorbante.

### Rendements d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur sont définis par rapport au flux solaire incident de la manière suivante :

- Le rendement global :

$$\eta = \frac{\varphi_u}{G^*S}$$

- Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{\varphi_u}{\varphi_{sa}}$$

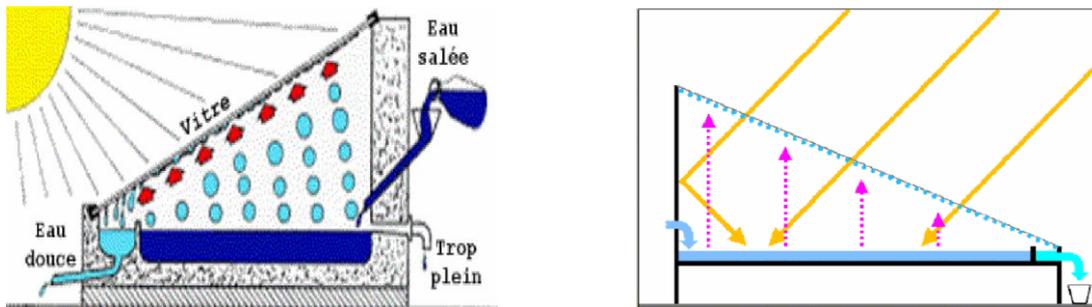
- Le rendement optique :

$$\eta_o = \frac{\varphi_{sa}}{G^*S}$$

## II. Distillateur solaire

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente.

Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel, voir la figure ci-dessous (Figure 8).



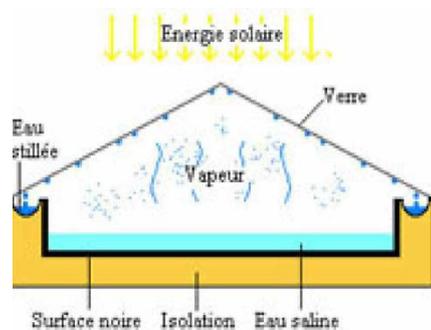
**Figure 8:** Principe de construction et de fonctionnement d'un distillateur solaire simple

### Types de distillations solaires

Les procédés de dessalement par distillation utilisant l'énergie solaire sous forme thermique sont : distillation solaire à effet de serre et distillation solaire à multiples effets.

#### Distillation solaire à effet de serre

Soit une serre fermée et exposée au soleil à l'intérieur de laquelle se trouve une lame d'eau de mer ou d'eau saumâtre de quelques centimètres d'épaisseur. L'air à l'intérieur de la serre est surchauffé et saturé de vapeur d'eau (douce) qui se condense au contact de la paroi en verre relativement froide. Les gouttes d'eau douce peuvent être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière par exemple (Figure 9).



**Figure 9:** présentent le principe et l'exemple d'un distillateur solaire à effet de serre

## Distillation solaire à multiples effets

Ce procédé consiste à un ensemble d'effets successives où la vapeur produite dans un effet est utilisée pour chauffer l'eau de l'effet suivant en s'y condensant, l'apport thermique initial est fourni à l'effet de tête (bouilleur). De part sa simplicité et sa souplesse de fonctionnement, ce procédé est le mieux disposé à s'adapter à l'énergie solaire. Cette adaptation peut se faire :

- soit avec des capteurs solaires plans pour les petites unités allant jusqu'à plusieurs m<sup>3</sup>/jour.
- soit avec des capteurs à concentration pour des capacités plus importantes.

Un stockage thermique est souvent utilisé, sous forme de réserve d'eau chaude, pour permettre d'avoir une certaine autonomie de fonctionnement en régime permanent ou intermittent.

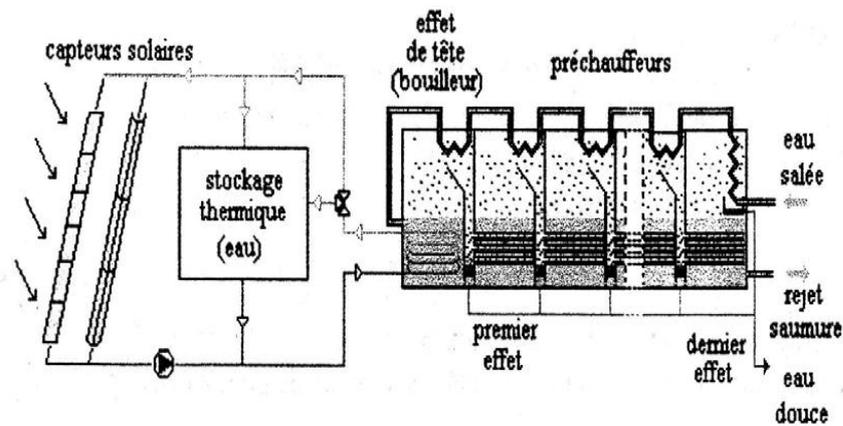


Schéma d'une installation de dessalement par

Multiples effets accouplés à des capteurs solaires

## Bilans énergétiques dans un distillateur simple

### Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur

#### Echange de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation

- L'eau reçoit de l'absorbeur un flux solaire ou de chaleur par convection naturelle et conduction.
- L'eau cède un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle aux surfaces de condensation. Puisque il existe une évaporation, l'eau perd un flux de chaleur.

#### Echange de chaleur entre la vitre et la surface d'eau

- Les flux solaires incidents cédés par la nappe d'eau ne sont pas reçus intégralement par la surface de condensation à cet égard au cours du transfert une partie est absorbée par l'atmosphère interne et les parois latérales.

- Les vitres reçoivent les flux incidents par convection naturelle, par rayonnement et par condensation de la vapeur d'eau.

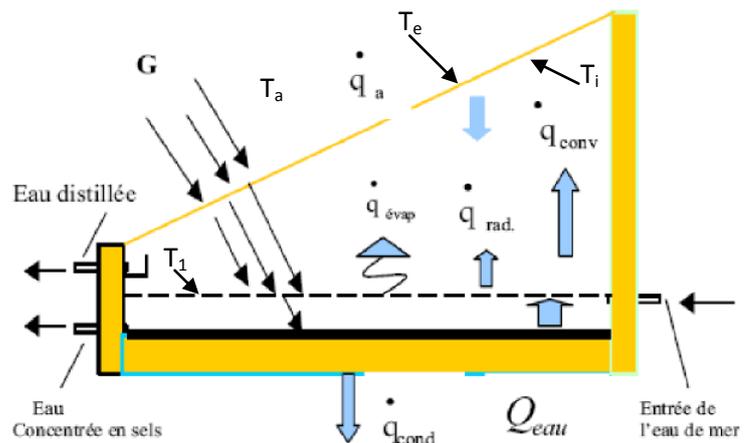
**Echange de chaleur entre la vitre et l'ambient**

- Le milieu extérieur fournit un flux de chaleur par rayonnement solaire à la vitre, dont une partie est réfléchiée.
- La vitre cède au milieu extérieur un flux de chaleur par rayonnement est par convection naturelle.

**Modélisation mathématique**

La figure illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire. Pour un régime permanent, la chaleur absorbée par les parois est négligeable par rapport à celle reçue par la masse d'eau.

Les équations régissant le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur, s'écrivent comme suit :



**Bilan thermique de la masse d'eau**

$$\dot{q}_r + \dot{q}_c + \dot{q}_e + \dot{m}_d C_e (T_1 - T_a) = \alpha_t S G^* \quad (*)$$

$\dot{q}_r + \dot{q}_c + \dot{q}_e$  : Quantités de chaleur perdues, par rayonnement, convection, évaporation, par la masse d'eau par unité de temps.

$\dot{m}_d C_e (T_1 - T_a)$  : Chaleur perdue par addition d'eau d'appoint supposée à température  $T_a$  et de chaleur massique  $C_e$ .

La quantité de chaleur perdue évaporation est donnée par :  $\dot{q}_e = \dot{m}_d L(T_1)$

L : Chaleur latente

Ce qui montre que :  $\dot{q}_r + \dot{q}_c + \dot{q}_e = \varphi(T_1, T_i, \dot{m}_d)$

Donc l'équation (\*) devient :  $\varphi(T_1, T_i, \dot{m}_d) + \dot{m}_d C_e (T_1 - T_a) = \alpha_t S G^*$

**Bilan thermique de la vitre**

La quantité de chaleur reçue par la vitre est évacuée par conduction à travers celle-ci, la chaleur traversant la vitre est transmise ensuite au milieu extérieur soit :

$$\dot{q}_r + \dot{q}_c + \dot{q}_e = \frac{\lambda_v}{e}(T_i - T_e)S = h_c(T_e - T_a)S + h_r(T_e - T_a)S$$

$\lambda_v$  : conductivité thermique de la vitre ;

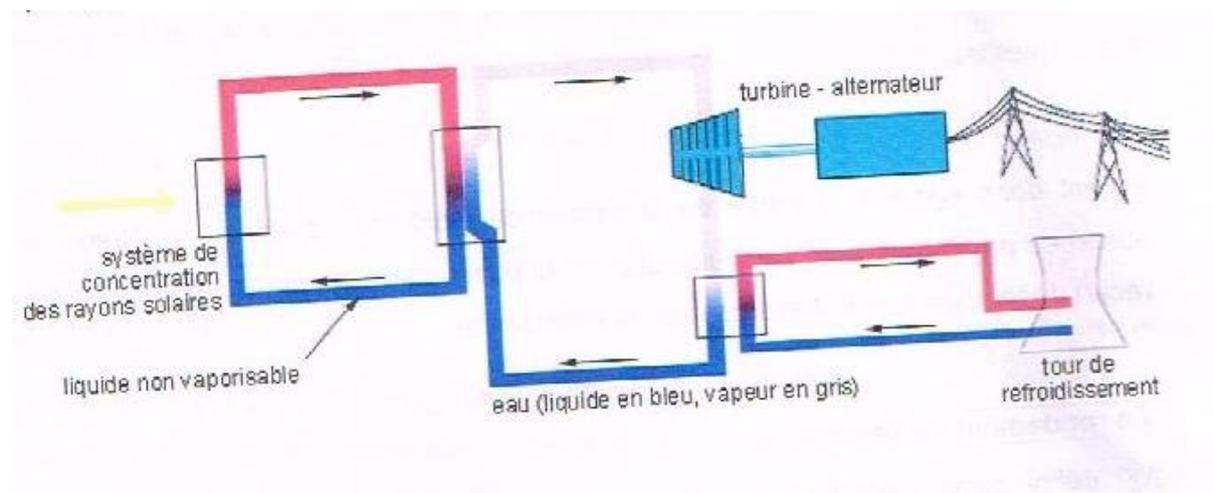
$e$  : épaisseur de la vitre ;

$h_c, h_r$  : coefficients d'échange par convection et rayonnement entre la vitre et l'extérieur.

### III. Les capteurs solaires thermodynamiques:

On définit par 'solaire thermodynamique' l'ensemble des techniques qui visent à convertir le rayonnement soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique puis électrique à travers un cycle thermodynamique dans une centrale solaire.

Il existe différents types de centrales solaires mais toutes sont basées sur le même principe. Elles concentrent les rayons du soleil pour chauffer à très haute température un liquide particulier non vaporisable. Ce liquide chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité. La vapeur d'eau est alors condensée (retourne à l'état liquide) grâce à une tour de refroidissement.

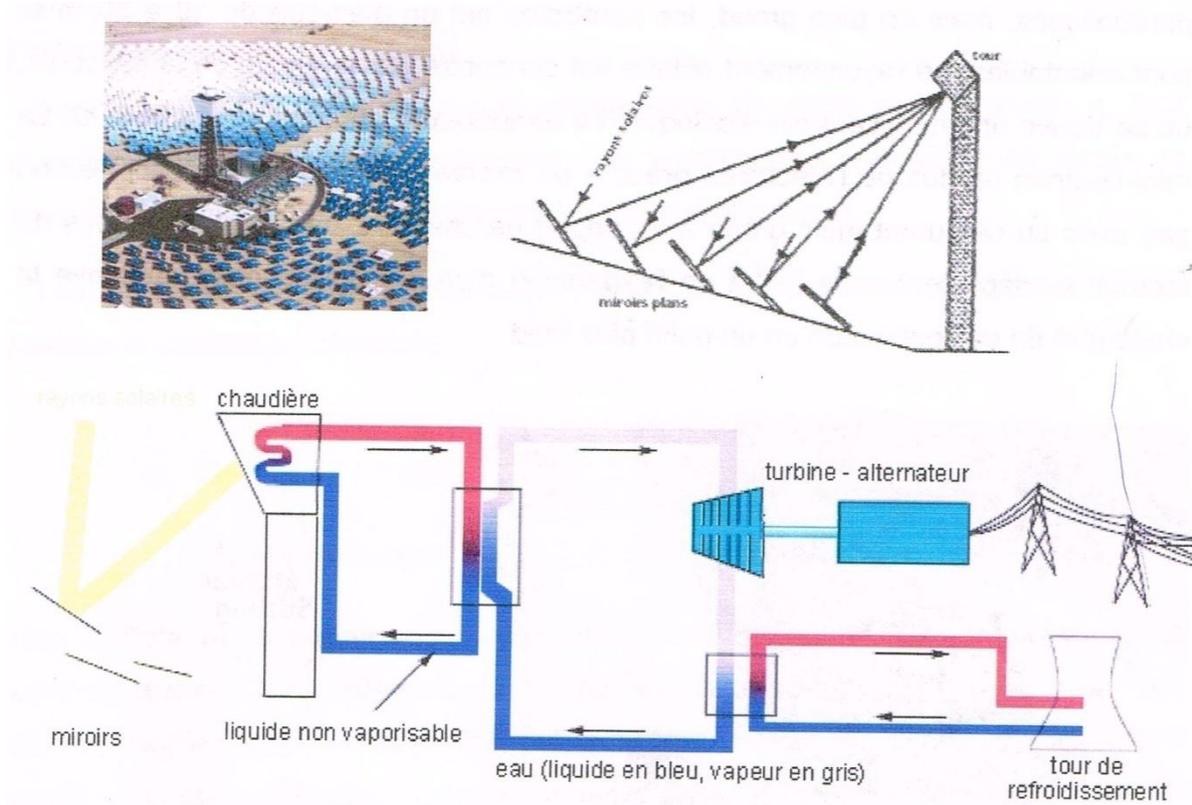


On distingue trois types de centrales solaires, en fonction de la méthode de focalisation des rayons solaires :

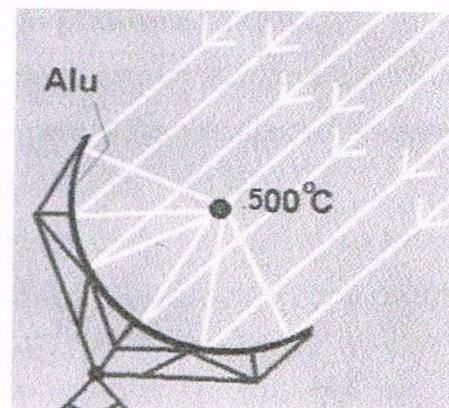
1. Centrale à tour
2. Centrales à collecteurs cylindro-paraboliques
3. Les centrales à collecteurs paraboliques

**Centrale à tour** : Une centrale à tour est constituée d'un champ de capteurs solaires spéciaux appelés héliostats orientables qui concentrent tous le rayonnement solaire avec précision sur un même point. La température obtenue ainsi est de 600°C. Un liquide caloporteur envoyé

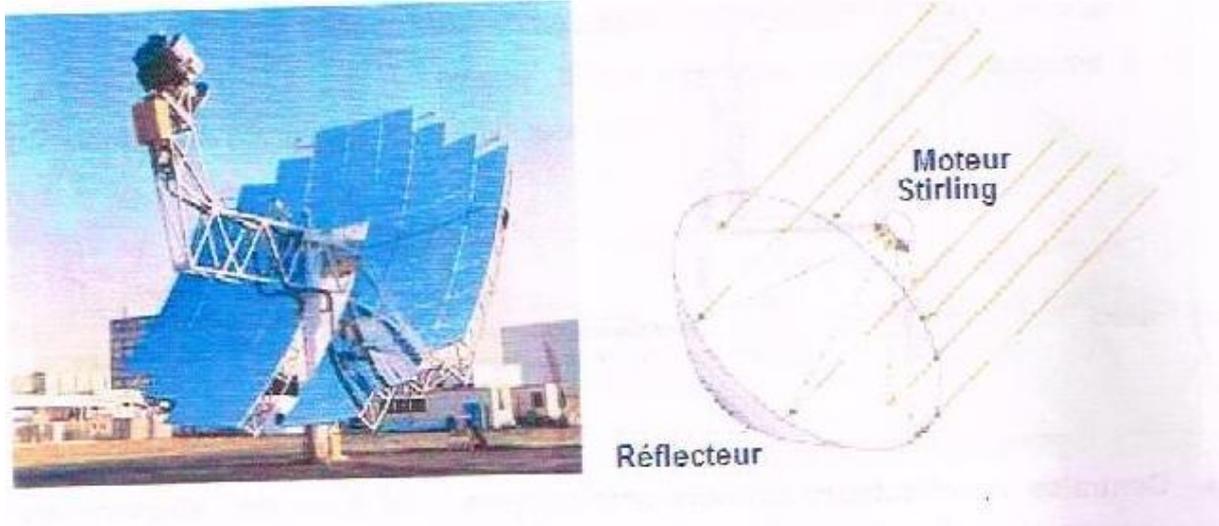
dans une chaudière située en haut de la tour transforme le liquide en vapeur. La vapeur fait tourner des turbines qui entraînent des alternateurs produisant de l'électricité,



**Centrales à collecteurs cylindro-paraboliques :** ce sont des 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, où circule le fluide caloporteur qui servira à transporter la chaleur vers la centrale elle-même. La température du fluide peut monter jusqu'à 500°C. Ce type de centrale est le plus fréquent.



**Les centrales à collecteurs paraboliques :** La même forme que nos antennes paraboliques, mais en plus grand, les paraboles ont un diamètre de 10 à 20m et sont orientables. Le rayonnement solaire est concentré sur la focale de la parabole, où se trouve une mini-centrale électrique. La température obtenue atteint 800°C. La mini-centrale produit de l'électricité grâce à un moteur Stirling, qui fonctionne non pas avec du carburant mais grâce à un apport de chaleur extérieure. Les pistons du moteur se déplacent sous l'effet de l'expansion d'un gaz en un point où arrive la chaleur et de sa contraction en un point plus froid.



### Références

- Cours de Dr .SALMI Mohamed *Support de cours : Gisement solaire*, Université de M'sila
- Cours de Pr. M. Aksas, *Energies Renouvelables*, Université de Batna
- Cours de Pr. B. Agoudjil, *Conversion d'énergie*, Université de Batna