

Chapitre III : Capteurs photothermiques

III. Capteurs photothermiques

Les convertisseurs photothermiques sont des capteurs solaires conçu pour convertir l'énergie du rayonnement solaire capté par une surface que l'appelle surface absorbante en énergie calorifique, cette énergie est transférée à travers la paroi de la surface absorbante vers un fluide caloporteur (liquide ou gaz) pour l'exploiter. On peut diviser les convertisseurs photothermiques (capteur solaire) suivant [1] :

- Leur forme de construction (capteur plan et capteur concentrateur).
- Le niveau de température de fonctionnement qui varier entre 20 et 3000°C.

III.1. Capteurs plans (non concentrateur):

Les capteurs solaires plans 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 [9]. Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150° C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil [10].

➤ Principe de fonctionnement :

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air,). Le schéma de Principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure III.1.

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température ($T_{fs} - T_{fe}$) à la traversée du capteur [11].

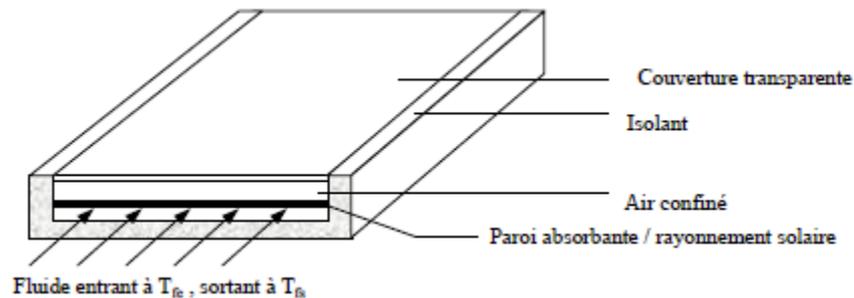


Figure III.1 : Principe d'un capteur solaire plan

➤ **Composantes d'un capteur plan :**

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre.

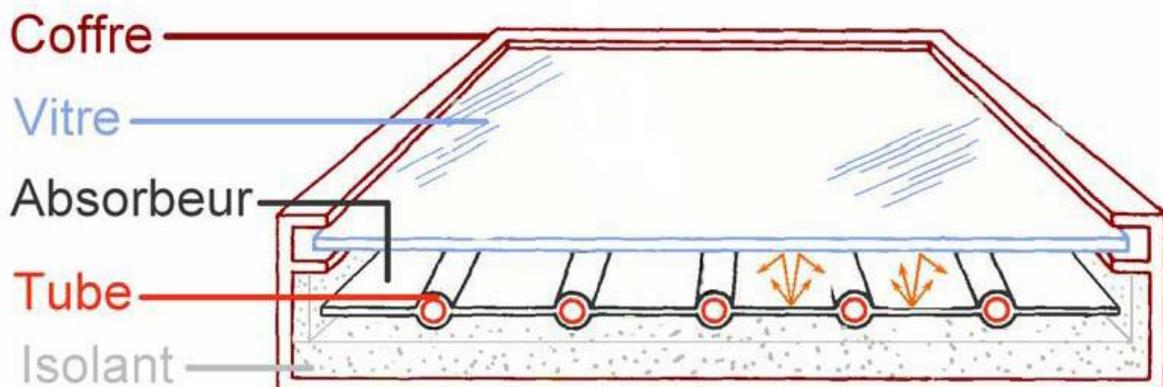


Figure III.2 : Composants d'un capteur solaire plan.

✓ **Vitrage:**

La vitre solaire avec une grande transmission lumineuse, optimise les rendements solaires et résiste aux intempéries [12, 13].

• **Pertes par rayonnement**

Les vitres utilisées dans les capteurs plans laissent passer le rayonnement solaire incident (fonction 1) avec un facteur de transmission τ très élevé (0.85), mais ils sont opaques au rayonnement infrarouge émis par l'absorbeur porté à la température de 35 à 100°C (longueur d'onde $>20 \mu\text{m}$).

C'est ce qu'on appelle **l'effet de serre**. La face interne de la couverture absorbe le rayonnement infrarouge, subit une augmentation de température et rayonne à son tour moitié vers l'extérieur, moitié vers l'absorbeur.

Au bilan thermique, les pertes par rayonnement sont diminuées de moitié. Il serait possible de réduire encore ces pertes en mettant plusieurs vitrages, mais en pratique on ne dépasse pas le double vitrage et cela pour deux raisons:

- a) Atténuation du facteur de transmission de l'énergie (pour le double vitrage, $\tau = 0.65$);
- b) Coût trop élevé.

- **Pertes par convection**

La couverture transparente limite également les pertes par convection. L'air est l'un des meilleurs isolants; on piège de l'air dans le polystyrène, sous réserve que la lame d'air n'ait pas une épaisseur supérieure à 3 cm, au-delà, des phénomènes convectifs interviennent. Dans la pratique, on adopte 3 cm entre l'absorbeur et la couverture, de façon à garder l'échange par conduction en considérant l'air immobile.

Pour limiter les pertes de couverture, on peut recouvrir la face interne de celle-ci d'une couche réfléchissante qui renvoie l'infrarouge venant de l'absorbeur.

- ✓ **L'absorbeur :**

Feuille métallique noire qui capte la chaleur du rayonnement solaire, il assure deux fonctions: 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 sont généralement en cuivre, en acier ou en aluminium.

✓ **Fluide caloporteur**

- **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

➤ **Paramètres et caractéristiques d'un capteur**

Les différents paramètres et caractéristiques à considérer pour le fonctionnement des capteurs solaires suivants sont [14]:

✓ **Paramètres externes** : On ne citera que les paramètres d'ensoleillement les plus importants qui sont le flux global et la durée d'insolation obtenus par des relevés météorologiques à travers tout le territoire.

✓ **Paramètres internes** : Parmi ces paramètres, on peut citer : paramètres géométriques, paramètre de position (inclinaison et orientation du capteur).

Paramètres de fonctionnement Ces paramètres sont : la température d'entrée du fluide caloporteur dans le capteur, le débit du fluide caloporteur et la température des différentes parties du capteur.

➤ **Les caractéristiques de fonctionnement** : Ces caractéristiques nous permettent d'effectuer un choix parmi les différents types des capteurs à savoir :

- La température du fluide soutiré du réservoir (destiné à l'utilisation).
- Le rendement du capteur.
- La puissance thermique du capteur

III.1.1. 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 [11].

par exemple les capteurs moquette, d'une structure très simple réseau de tubes plastiques noirs, utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines, en été, ou les capteurs non-vitrés à revêtement sélectif, à irrigation totale, en acier inoxydable, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, le chauffage basse température plancher chauffant et le chauffage des piscines.

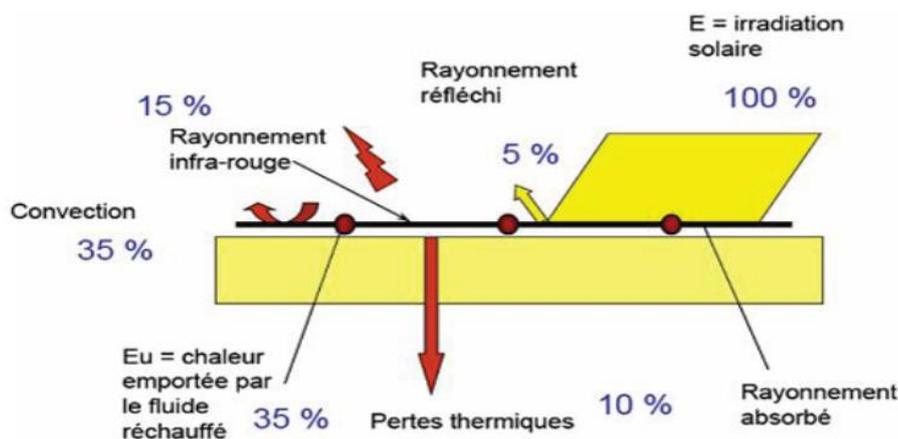


Figure III.3: Principe de fonctionnement des capteurs plans sans vitrage

➤ 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 [15].

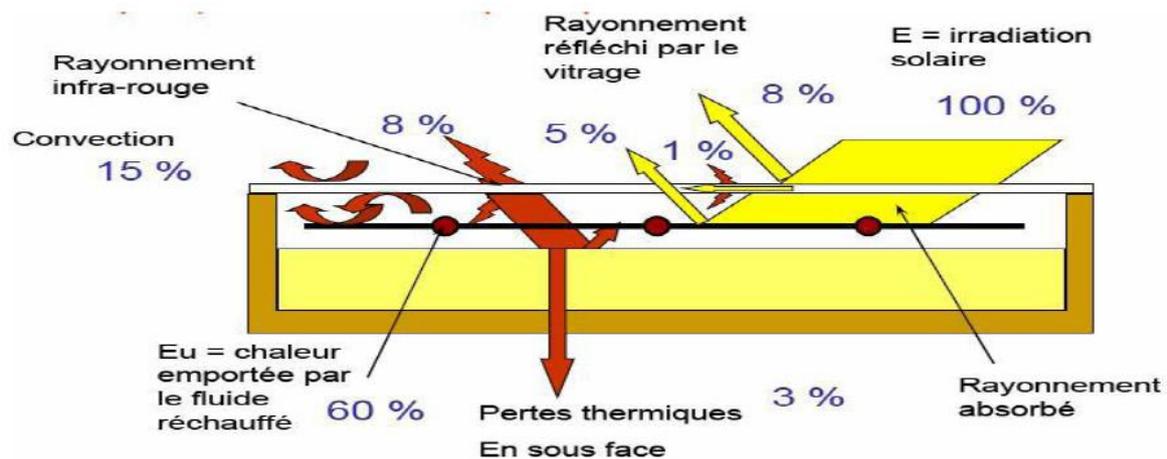


Figure III.4: Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.

Le capteur solaire à plan vitré est le type de capteur solaire thermique le plus répandu. Il utilise **l'effet de serre** pour capter l'énergie thermique du soleil. Ils sont composés généralement d'un châssis sous forme de coffre, d'un isolant en fond, d'un absorbeur de couleur noire en tubes de cuivre munis d'ailettes dans lequel circule le fluide caloporteur et d'une vitre.

III.2. 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.) [16].

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 (type caloduc).

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.

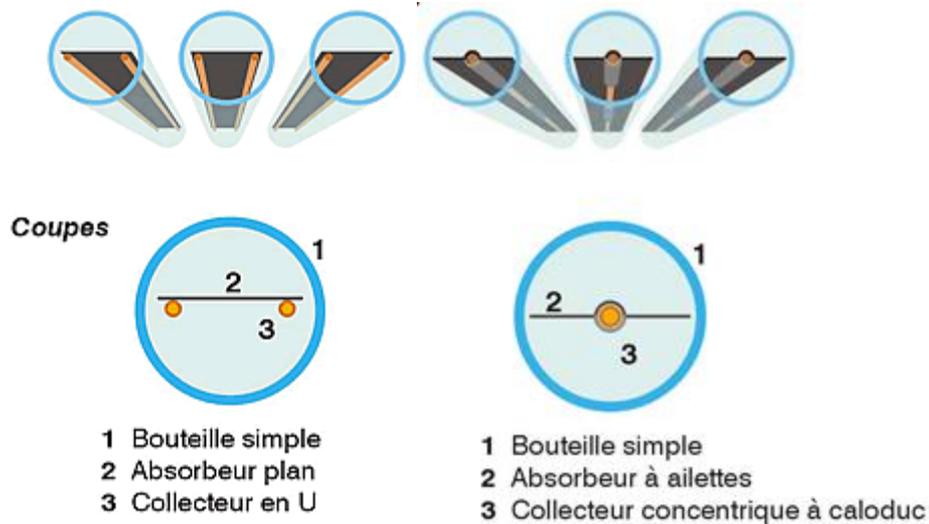


Figure III.5 : Capteur solaire thermique sous vide

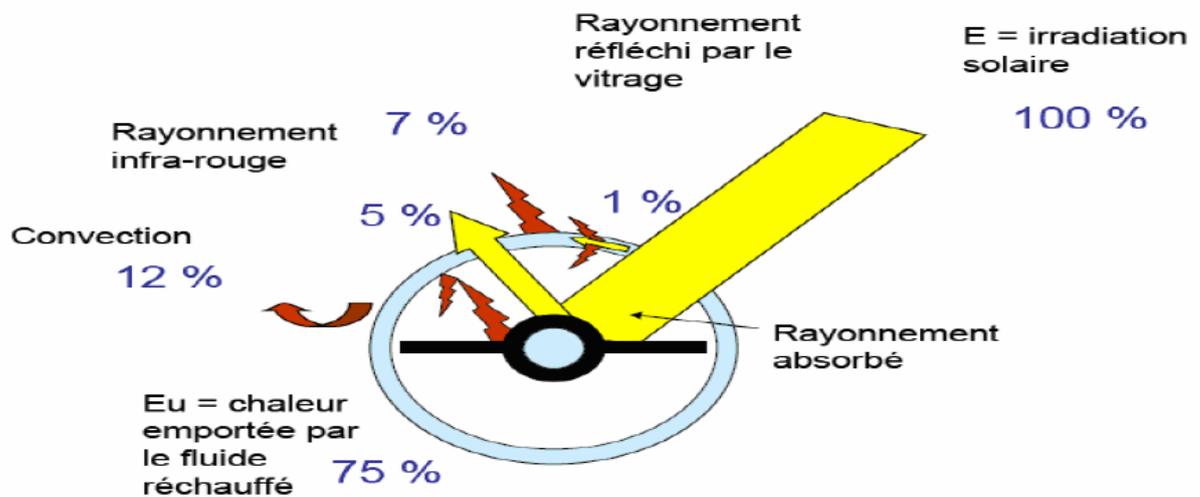


Figure III.6 : Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide caloduc.

III.3. Les capteurs concentrateurs :

Le capteur solaire concentrateur réfléchit et focalise le rayonnement solaire reçu directement sur l'absorbeur de manière à accroître l'intensité des rayons solaires. Par conséquent, l'usage de ce type de capteur permet d'obtenir des températures supérieures à celles que peut réaliser le capteur plan. On distingue deux types de concentration [17] :

- 1) Les systèmes qui peuvent concentrer le rayonnement autour d'une ligne appelés concentration linéaire ou concentrateurs à deux dimensions.
- 2) Les systèmes pouvant concentrer la lumière autour d'un point, appelés concentrateurs ponctuels ou concentrateurs à trois dimensions. Ces systèmes présentent une symétrie de révolution autour d'un axe.

Les systèmes à concentration présentent un certain nombre d'inconvénients :

- Les pertes optiques peuvent être importantes; elles sont dues aux phénomènes de réflexion et de réfraction et aux caractéristiques géométriques du système ;
- Le rayonnement diffus est très mal utilisé dans les systèmes à forte concentration, seul le rayonnement direct est concentré ;
- Les systèmes à forte concentration nécessitent des montages optiques précis et par conséquent relativement chers ;
- Il faut aussi maintenir les qualités optiques du système (contre l'oxydation,) ;

- Dans la plupart des cas, le flux n'est pas distribué de façon uniforme sur l'absorbeur ;
- L'absorbeur est soumis à de grandes variations de température lors des passages nuageux ;
- Les systèmes à forte concentration ont un champ étroit. Il est donc nécessaire de pointer pour capter le rayonnement direct et ceci demande des mécanismes d'orientation.

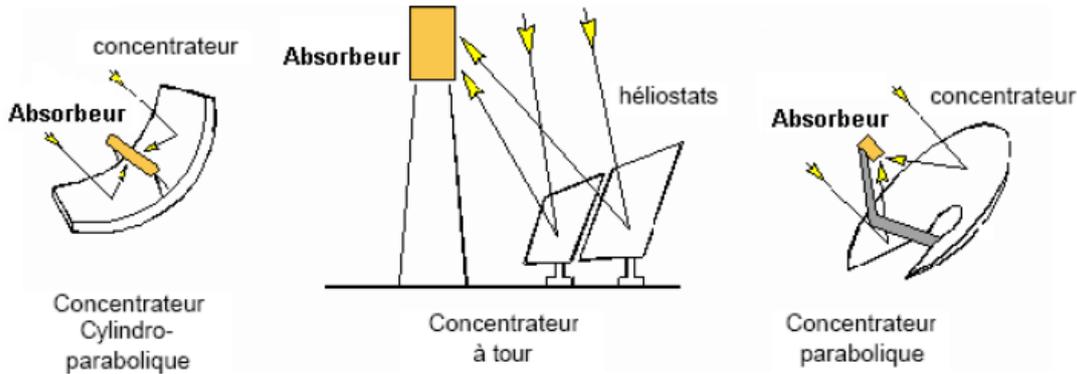


Figure III.7: Exemples des capteurs solaires concentrateurs

III.4. Bilan thermique d'un capteur solaire plan

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit [13, 18, 19]:

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

Où :

φ_{sa} : Flux solaire absorbé

φ_p : Flux perdu par la paroi absorbante

φ_u : Flux utile transmis au fluide caloporteur (ou P_u)

φ_{st} (P_{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 :

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

Où :

φ_{sa} : Flux solaire absorbé par la surface exposée (W)

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

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

τ_{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 :

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

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 :

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

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 :

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

Pour tenir compte de la non-linéarité de l'évolution de la température du fluide dans le capteur et de l'écart de température ΔT existant entre le fluide et la paroi absorbante.

III.5. 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 :

$$\eta = \frac{\varphi_u}{E^* \times S}$$

- Le rendement interne :

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

- Le rendement optique :

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