

Chapitre 3: Les Capteurs A Basse Température

Introduction : L'énergie solaire est directement convertie en chaleur grâce à des capteurs solaires thermiques. Elle est constituée d'une surface absorbante de couleur foncée (l'absorbeur), généralement placée derrière une vitre. Un matériau résistant à la chaleur et thermiquement isolant est placé derrière l'absorbeur pour limiter les pertes calorifiques. La chaleur absorbée par la surface noire est transmise à un fluide caloporteur (eau, air,..). Sa température peut atteindre 60 à 80°C, voire 100°C.

Les collectionneurs capteurs solaires thermiques sont classés comme faible, moyenne et haute température en fonction de la façon dont vous travaillez.

- Capteurs basse température, fournissent de la chaleur utile à des températures en dessous de 65°C.
- Capteurs moyenne température, sont des dispositifs qui concentrent le rayonnement solaire pour fournir de la chaleur utile à une température plus élevée, généralement entre 100 et 300 °C.
- Capteurs haute température, ils travaillent à des températures supérieures à 500 °C. Ils sont utilisés pour la production d'énergie.

Capteur solaire basse température

Le capteur reçoit le rayonnement solaire, dans une bande de longueurs d'ondes $0,15 \mu\text{m} < \lambda < 0,30 \mu\text{m}$, le spectre visible allant de 0,40 à 0,75 μm . Le capteur comporte un absorbeur, qui est une surface noircie pour accroître sa capacité d'absorption de l'énergie solaire. Si c'est une surface sélective, son absorptivité $\alpha > 0,9$ et son émissivité $\varepsilon < 0,1$. L'absorbeur chauffé émet de l'infrarouge. Une isolation est utilisée pour limiter les pertes thermiques du capteur. On utilise des matériaux dont la conductivité thermique est très faible. Un vitrage est utilisé pour créer l'effet de serre, ce qui a pour effet d'augmenter la température de l'absorbeur. ...). Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure 1.

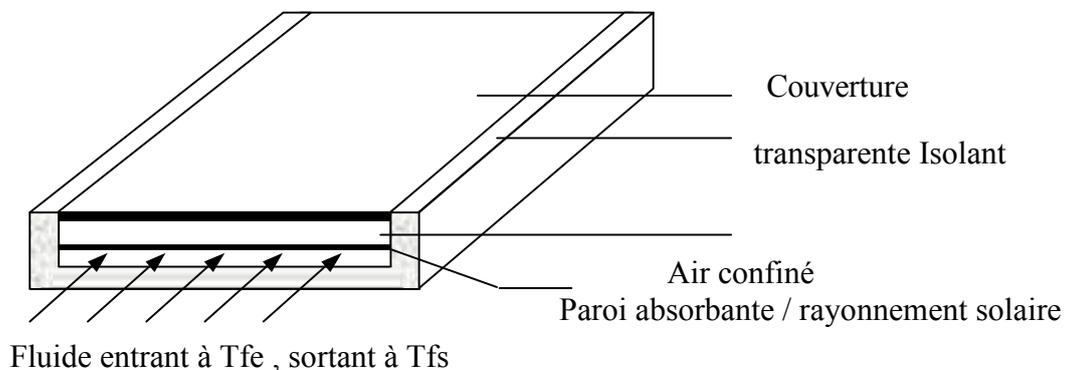


Figure: Schéma de principe d'un capteur solaire plan.

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.

Bilan thermique global

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit :

$$\varphi_{sa} = \varphi_{p \rightarrow} + \varphi_u + \varphi_{st} \quad (1)$$

Où : φ_{sa} Flux solaire absorbé
 $\varphi_{p \rightarrow}$ Flux perdu par la paroi absorbante
 φ_u Flux utile transmis au fluide caloporteur
 φ_{st} Flux stocké dans le capteur qui s'écrit :

$$\varphi_{st} = M_e c_{eau} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

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

T Température moyenne du capteur
 t Temps

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$\varphi_{s \rightarrow p} = \tau_{cs} \alpha_{ps} G^*(i, \gamma) \quad (3)$$

Où : $\varphi_{s \rightarrow p}$ Flux solaire absorbé par la surface exposée (W)
 $G^*(i, \gamma)$ Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur ($W \cdot m^{-2}$)
 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 :

$$\varphi_u = q_{cf} (T_{fs} - T_{fe}) \quad (4)$$

Où : q_{cf} Débit calorifique du fluide caloporteur ($W \cdot ^\circ C^{-1}$) = débit massique x capacité calorifique .

T_{fe} Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur.

T_{fs} Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$q_{p \rightarrow} = h_p (T_{pm} - T_a) S \quad (5)$$

- Où : h_p Coefficient global de pertes du capteur
 T_{pm} Température moyenne de la paroi absorbante
 T_a Température de l'air extérieur

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 :

$$\eta = \frac{\varphi_u}{G^*(i,\gamma)S} \quad (6)$$

- Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{\varphi_u}{\varphi_{s \rightarrow p}} \quad (7)$$

- Le rendement optique :

$$\eta_o = \frac{\varphi_{s \rightarrow p}}{G^*(i,\lambda)} \quad (8)$$

2.4. Les différents types de capteurs solaires thermiques

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type de fluide, le niveau de température que les panneaux solaires permettent d'atteindre. On distingue 3 familles de capteurs solaires thermiques.

2.4.1. Les capteurs plans non vitrés ou souples

C'est le modèle le plus rustique et également le plus économique. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) dans laquelle circule le liquide à réchauffer

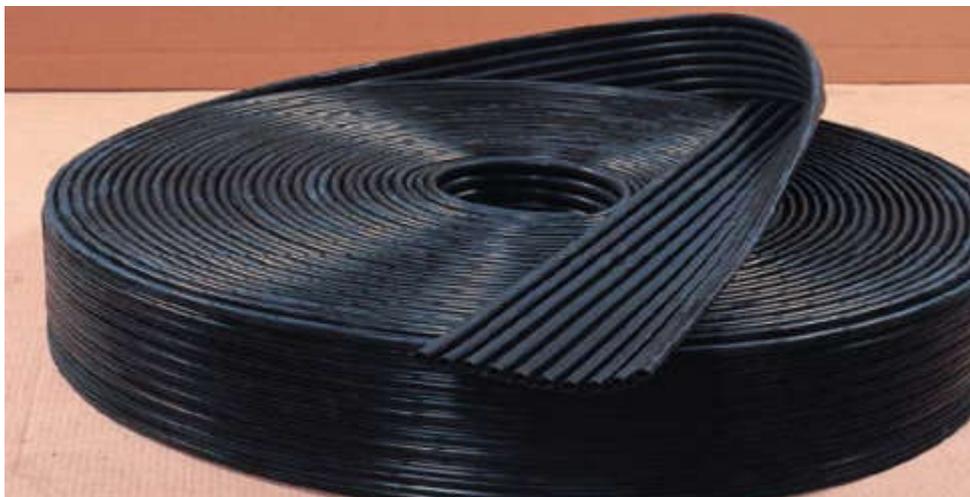


Figure : Capteur plan non vitré.

Le principal domaine d'utilisation de ce capteur est le chauffage des piscines de plein air. Celles-ci sont le plus souvent utilisées en été, lorsque la température ambiante et le rayonnement solaire sont élevés. Le niveau de température de l'eau des bassins est quant à lui inférieur à 30 °C. Dans ces conditions, l'efficacité des capteurs est très bonne, et l'utilisation de capteurs vitrés ne permettrait pas une meilleure collecte de l'énergie solaire.

L'absence de gel pendant la période autorise la circulation directe de l'eau de la piscine dans les capteurs. Afin d'éviter des problèmes de corrosion et également pour des raisons économiques, les constructeurs de matériels utilisent souvent des matières plastiques (figure 3).



Figure : Piscine publique utilisant des capteurs souples.

Les capteurs sans vitrage peuvent également être utilisés pour des installations de production d'eau chaude sanitaire. C'est en particulier le cas dans des régions chaudes et fortement ensoleillées. La parfaite intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surfaces plus importantes, pour compenser la différence d'efficacité avec des capteurs vitrés, en particulier l'hiver .



Figure : Installation de production d'eau chaude sanitaire.

Les capteurs plans vitrés : Les capteurs munis d'une couverture transparente, souvent appelés « capteurs vitrés », sont les plus utilisés, car ils correspondent au domaine d'application le plus courant : le chauffage de l'eau sanitaire. La température d'utilisation est en général inférieure à 70 °C. Plus rarement, certains d'entre eux, munis d'une couverture transparente de type « double vitrage », permettent d'atteindre des températures de fonctionnement de l'ordre de 100 °C (figure 5).

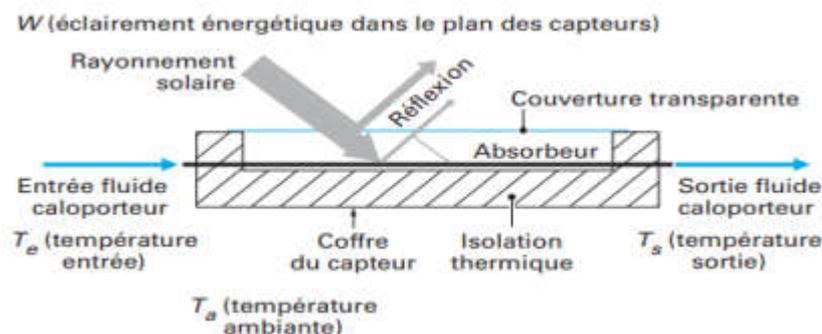


Figure : Coupe d'un capteur vitré.

Le capteur vitré est constitué de différents composants :

- ✓ le coffre ;
- ✓ l'isolation thermique ;
- ✓ l'absorbeur ;
- ✓ la couverture transparente.

. Les capteurs sous vides : Lorsque la température de fonctionnement du capteur est très élevée (> 100 °C) ou lorsque la température ambiante est faible (région de montagne), il est intéressant d'utiliser un capteur solaire dit « sous vide », qui se présente sous la forme de tubes de faible diamètre (jusqu'à une quinzaine de centimètres) dans lesquels sont disposés les absorbeurs, de conception identique à celle d'un capteur plan. L'intérieur du tube est vidé de l'air qu'il contient et des pertes par convection entre l'absorbeur et la paroi vitrée du tube sont ainsi supprimées. Le capteur sous vide voit ainsi ses déperditions limitées au rayonnement infrarouge. Pour limiter les effets de celui-ci, la surface de l'absorbeur possède un revêtement « sélectif » (figures 6 et 7).



Figure : Détail d'un capteur solaire sous vide.

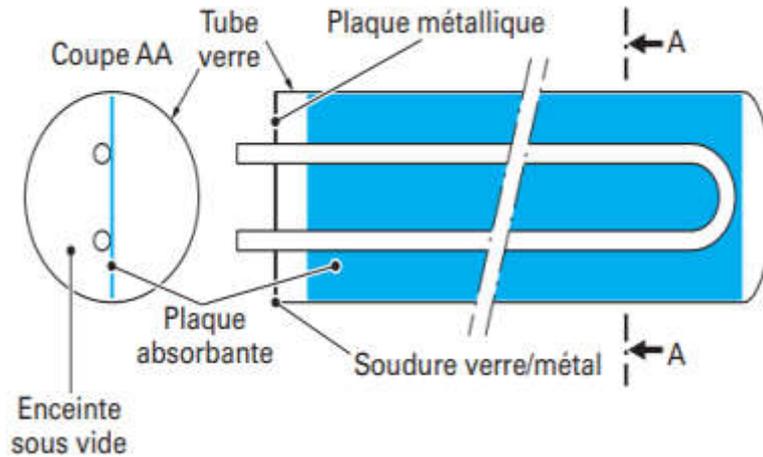


Figure : Coupe d'un capteur sous vide.

. Applications

Les applications du solaire thermique à basse température sont nombreuses. On peut citer entre autres:

- Le distillateur solaire
- Le chauffe-eau solaire
- Froid et climatisation solaire
- Le séchoir solaire

Les distillateurs solaires :

La disponibilité de l'eau potable est aujourd'hui une préoccupation majeure de l'humanité. La terre est recouverte d'eau à 71%, mais 98% de ce volume à une concentration en sel trop élevée. Cette eau n'est donc pas potable. Elle ne peut pas non plus être utilisée dans l'irrigation ou dans l'industrie.

- **Distillation a un étage**

C'est le plus simple et le plus répandu, on en trouvera une schématisation sur la figure.. L'eau placée dans un bac noirci disposé au fond d'un capteur solaire s'échauffe par absorption du rayonnement solaire traversant la vitre. Cet échauffement provoque une évaporation superficielle, la vapeur d'eau produite venant ensuite se condenser sur la vitre plus froide. Il suffit alors de récupérer l'eau distillée ruisselant sur la face interne de la vitre à l'aide d'un système de gouttières placées de chaque côté de la vitre.

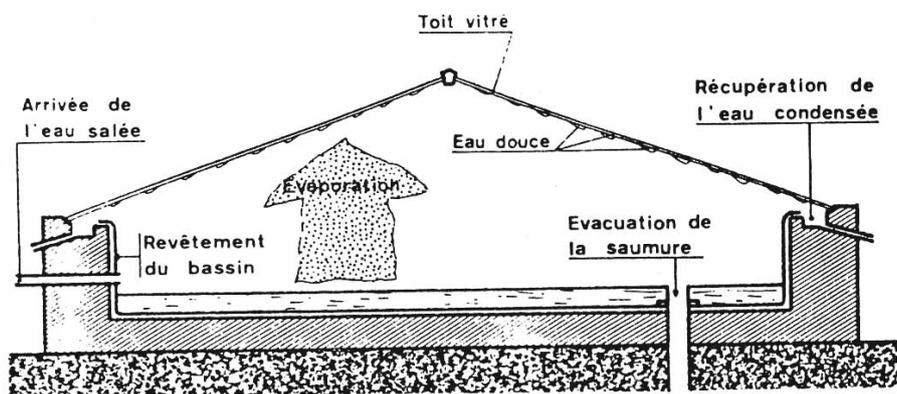


Figure: Schéma de principe d'un distillateur solaire à un étage.

- **Distillateur a plusieurs étages**

Pour augmenter le rendement des distillateurs solaires, le Pr. Le Goff a imaginé un distillateur à plusieurs étages où la chaleur libérée par la condensation est récupérée dans un 2ème étage pour servir à évaporer une masse d'eau supplémentaire suivant le schéma de la figure.

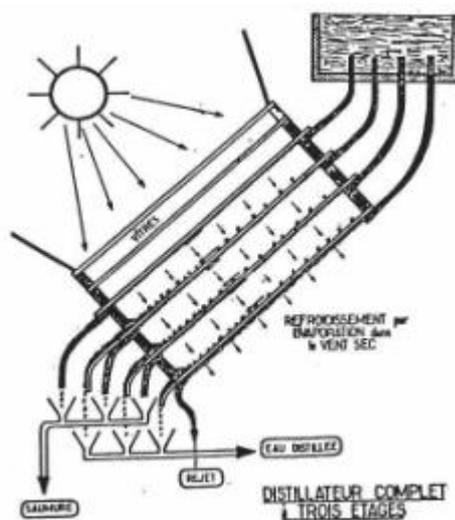


Figure: Schéma du distillateur solaire DIFICAP du Pr. Le Goff.

La production distillée peut théoriquement atteindre 10 à 15 l.m⁻² par jour. Les problèmes liés à sa réalisation n'ont pas jusqu'à présent permis sa vulgarisation.

Production d'eau chaude : La production d'eau chaude sanitaire est à l'heure actuelle l'application la plus développée de l'énergie solaire thermique. Sous un climat tropical sec, un chauffe-eau solaire performant et bien dimensionné peut permettre de satisfaire les besoins en eau chaude d'une famille toute l'année. Sous un climat tropical humide, il sera nécessaire à certaines périodes d'utiliser une énergie d'appoint. Le chauffe-eau solaire permettra quand même de réaliser d'importantes économies. Il existe plusieurs types de chauffe-eau solaire que nous allons détailler.

- **Chauffe-eau solaire capteur-stockeur**

Ce sont des appareils qui se présentent comme des capteurs solaires à eau classiques avec coffre, vitrage, isolant et absorbeur. La contenance de l'absorbeur, de l'ordre de 75 l.m^{-2} permet d'assurer dans le même appareil les fonctions de captage et de stockage de l'énergie.

Ces appareils sont peu encombrants, peu coûteux et faciles à installer. Ils présentent un bon rendement lors des journées ensoleillées (résistance thermique négligeable entre l'absorbeur et l'eau : contact sur toute la surface de l'absorbeur). Cependant les pertes de chaleur sont importantes la nuit et la température de l'eau le matin en période fraîche (décembre, janvier en climat tropical sec) est souvent trop bas. Des modèles de fabrication locale bien isolés ont été testés et donnent des résultats satisfaisants. Le problème principal à résoudre est la réalisation d'un capteur plat d'une épaisseur de l'ordre de 5 mm résistant à la pression d'eau du réseau.

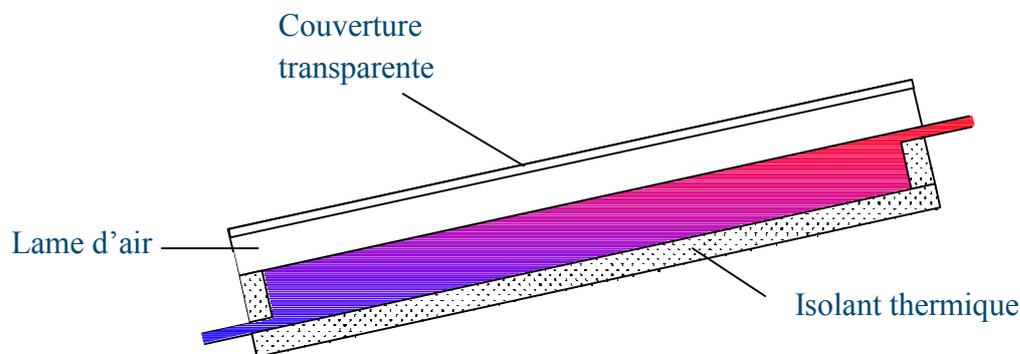


Figure : Schéma d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur

- **Chauffe-eau solaire monobloc**

Il s'agit d'appareils dont le ballon de stockage d'eau chaude est solidaire du capteur solaire comme représenté sur la figure.2, la circulation d'eau entre les deux éléments s'effectuant par thermosiphon. La figure.3 représente une vue éclatée d'un chauffe-eau solaire monobloc commercialisé.

Pour un bon fonctionnement de ces appareils, les règles suivantes doivent être respectées :

- Eviter les possibilités d'accumulation d'air en un point haut du circuit
- Placer les tubes en parallèle pour éviter les pertes de charge
- Le bas du réservoir doit être situé au-dessus du capteur
- Respecter une inclinaison minimale ($>10^\circ$, on choisit souvent 30°) pour un fonctionnement correct du thermosiphon

La figure.11 illustre quelques-unes de ces règles d'installation.

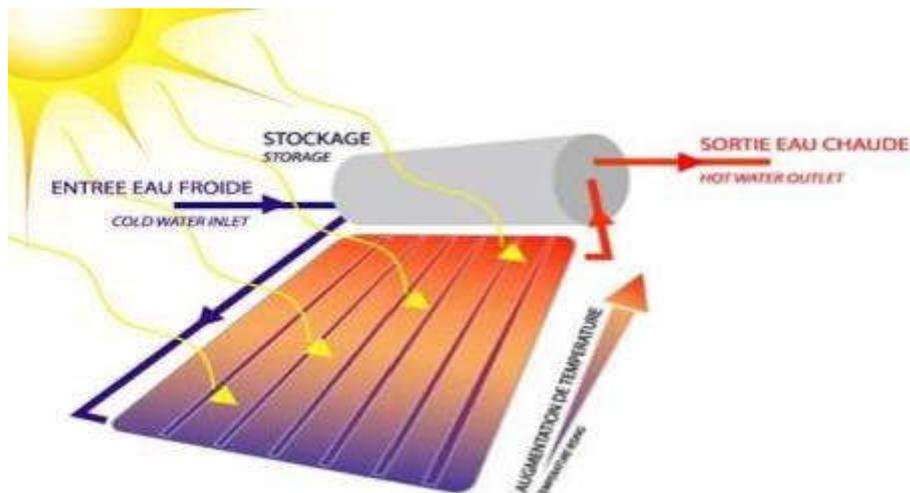


Figure : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire monobloc.

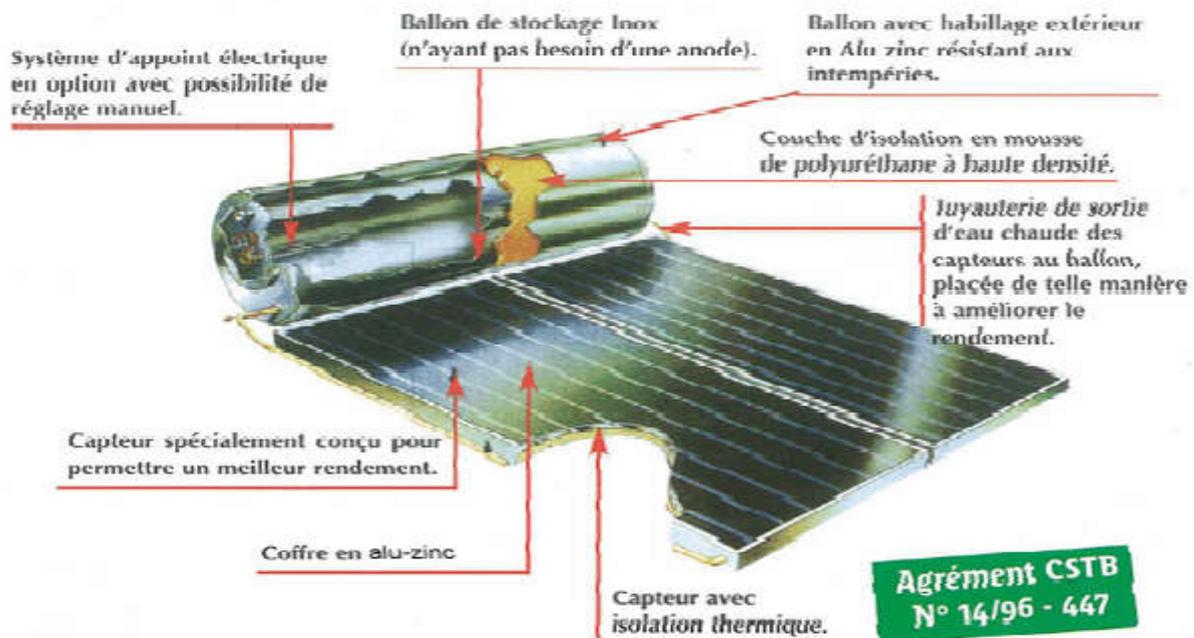


Figure : Vue éclatée chauffe-eau solaire BP Solar (<http://www.apex-bpsolar.com/solaire/chauffeEau>)

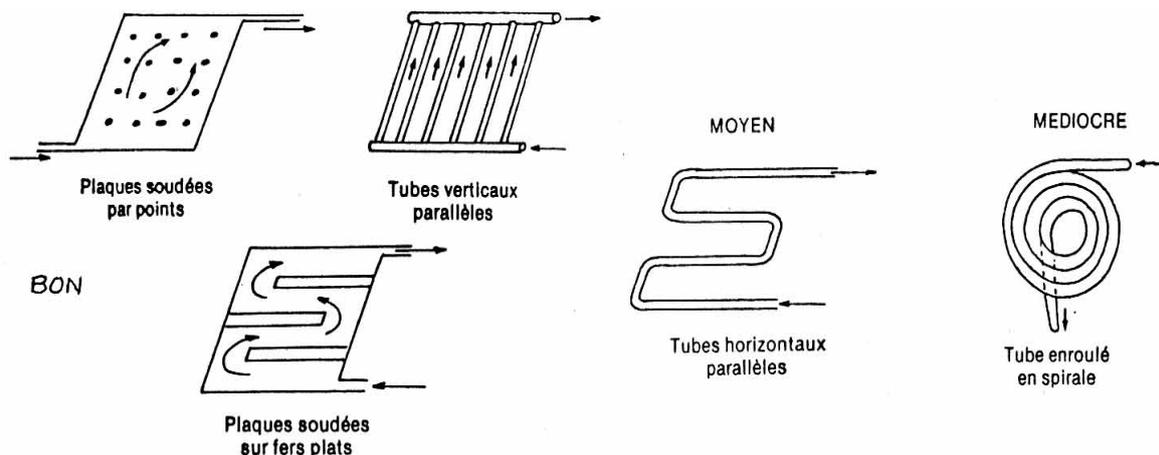


Figure : Règles d'installation des chauffe-eau solaires monoblocs

- **Chauffe-eau solaire à éléments séparés**

Ces appareils sont constitués d'un ballon relié à un ou plusieurs capteurs par des tuyauteries de longueur variable. Le ballon non solidaire du capteur peut être installé à l'intérieur du logement. Ils fonctionnent le plus souvent en convection forcée (circulation de l'eau assurée par une pompe) ce qui nécessite le raccordement au réseau électrique. D'une plus grande souplesse d'utilisation, leur bon fonctionnement est davantage tributaire du soin apporté à leur installation. On trouvera sur la figure 14 le schéma de principe d'une installation type et sur la figure 15 le détail des différents éléments constitutifs.

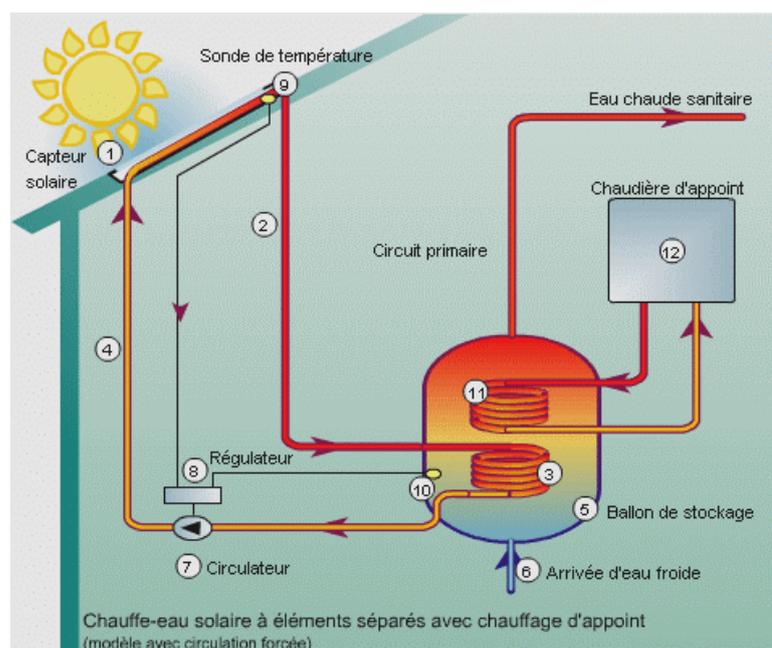
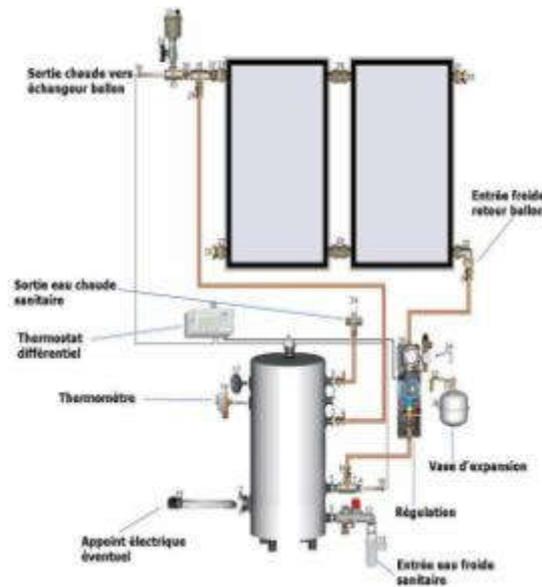


Figure : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés

La différence de masse volumique entre l'eau chaude et l'eau froide conduit à l'établissement d'un gradient de température dans un ballon de stockage d'eau chaude : la température de l'eau est plus élevée en haut qu'en bas du ballon ainsi que le schématise la figure 16 Le rendement d'un capteur solaire étant d'autant plus élevé que la température d'entrée du fluide est faible, on a intérêt :

- A choisir un rapport hauteur/diamètre du ballon suffisant (>2) pour obtenir une stratification suffisante,
- A éviter le brassage de l'eau dans le ballon qui « casserait » la stratification,
- A envoyer vers le capteur de l'eau provenant de la partie basse du ballon.



j **Figure:** Eléments d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés

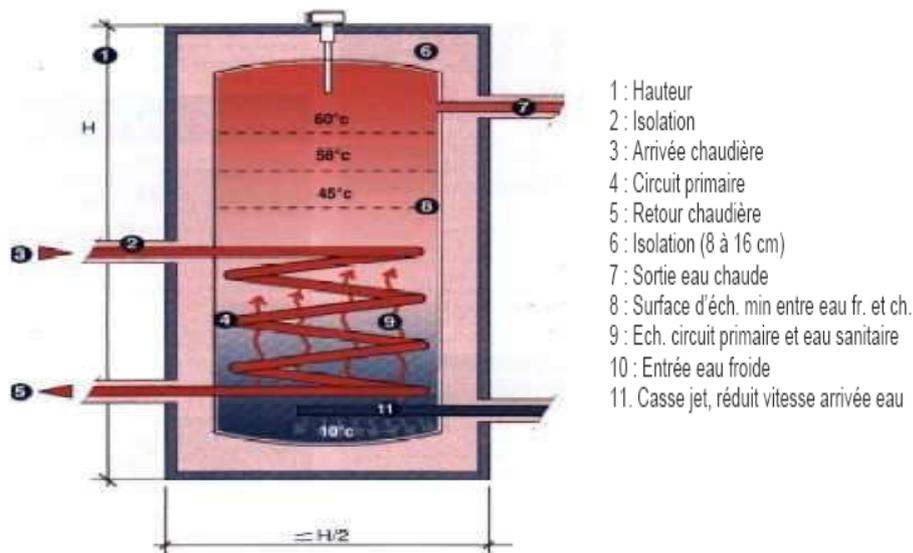


Figure : Schématisation de la stratification dans un ballon d'eau chaude (extrait de Bragard)

Froid et climatisation

- **Réfrigération**

L'énergie solaire peut être utilisée pour produire du froid par deux voies :

- Photoélectrique : on utilise l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques pour alimenter un groupe frigorifique à compression ou des éléments Peltier
- Thermique : on utilise la chaleur récupérée dans un capteur solaire pour produire du froid par sorption.

Des réfrigérateurs fonctionnant sur ce principe sont opérationnels comme celui de Flechon et Godmel dont on trouvera le schéma sur la figure 17.

Son fonctionnement repose sur l'utilisation d'un couple absorbant/fluide frigorigène. La substance absorbante reste dans le capteur solaire. Dans la journée, l'élévation de sa température dans le capteur provoque l'évaporation du fluide frigorigène qui se condense dans un condenseur placé dans l'air ambiant à l'extérieur de l'enceinte à réfrigérer. Il est ensuite stocké dans un réservoir.

Pendant la phase nocturne le composé absorbant se refroidit et devient « avide » de fluide frigorigène. Celui-ci s'évapore donc dans l'évaporateur placé à l'intérieur du caisson isolé à refroidir pour être réabsorbé par le composé absorbant.

Le cycle peut alors se répéter le jour suivant. La production de froid s'effectuant la nuit, il faut prévoir un stockage du froid produit pour limiter l'élévation de température de l'enceinte réfrigérée dans la journée. Ce stockage s'effectue généralement par un volume d'eau glycolée placée dans l'enceinte.

Le facteur limitant la diffusion de ces réfrigérateurs reste un coût élevé.

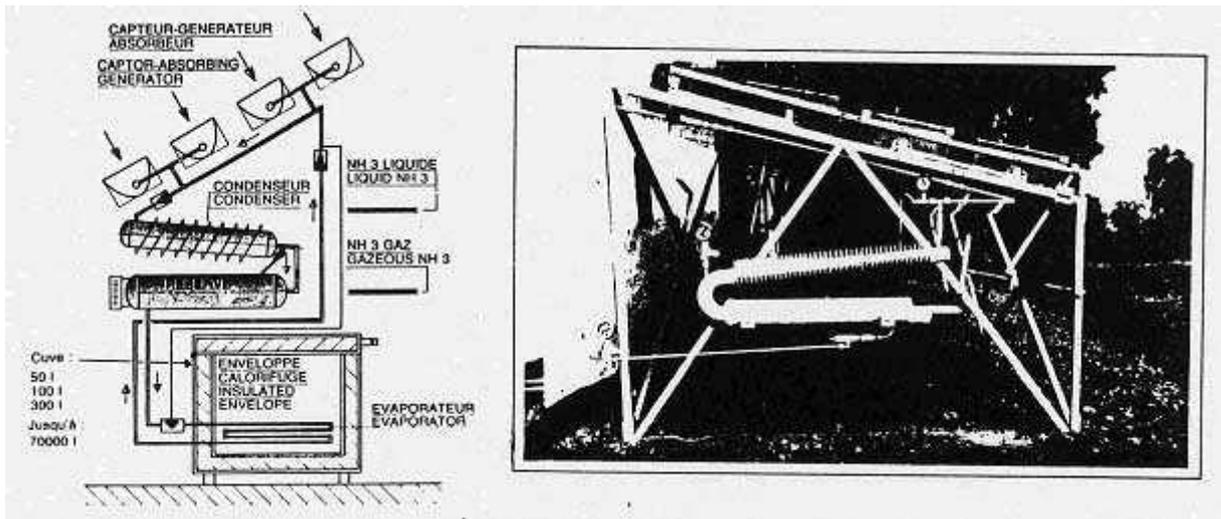


Figure : Schéma du réfrigérateur photothermique des Prs Flechon et Godmel

- **Climatisation**

Nous présenterons ici, le principe de deux systèmes reposant sur des cycles intermittents d'absorption/désorption d'eau dans un solide hygroscopique (gel de silice) :

Le système conçu par Dannies (figure 18) ne comporte aucun mécanisme et ne fait appel qu'aux mouvements de l'air par convection naturelle. Les murs Est et Ouest du bâtiment contiennent les éléments absorbants au travers desquels l'air circule selon le processus suivant :

- Le matin le soleil chauffe le mur Est : le mélange d'air et de vapeur d'eau réchauffé et plus léger monte dans le mur Est et en sort à sa partie supérieure. Il en résulte une aspiration correspondante d'air par les orifices supérieurs du mur Ouest dans lequel l'air passe sur l'absorbant régénéré la veille et s'y dessèche. Un dispositif d'évaporation d'eau placé au pied du mur permet alors de le refroidir avant son introduction dans la pièce. Durant cette phase, l'échauffement du mur Est provoque la déshydratation de l'absorbant qu'il renferme.
- L'après-midi, le soleil chauffe le mur Ouest et la circulation d'air s'inverse.

Ce système expérimenté au Libéria et en Lybie a permis de maintenir les locaux à une température de 5 à 15°C au-dessous de l'ambiance extérieure, avec une humidité relative comprise entre 65 et 75%.

Un autre système destiné à la déshumidification de l'air en zone humide a été mis au point par Lof aux Etats- Unis (figure (19)). L'air à déshumidifier passe à travers une pluie de solution de glycol concentrée et s'y dessèche. La chaleur latente de condensation et la

chaleur d'absorption sont éliminées dans un échangeur à eau : à la sortie l'air déshumidifié est à la même température qu'à l'entrée.

Le glycol dilué par son échange avec l'air humide est envoyé dans un régénérateur où il tombe en gouttelettes à travers un courant ascendant d'air sec réchauffé dans un capteur solaire à air. Ces systèmes restent toutefois au stade de faible diffusion et semblent difficilement adaptables à l'habitat individuel. Leur avenir se situe plutôt dans une intégration à une centrale de climatisation en vue de réduire la consommation énergétique.

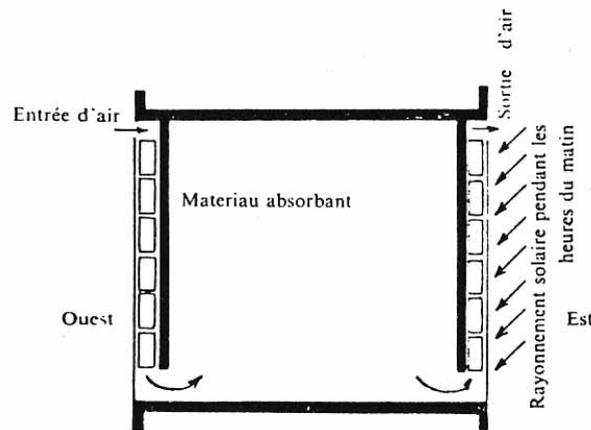


Figure: Schéma du procédé Dannies (d'après IIF)

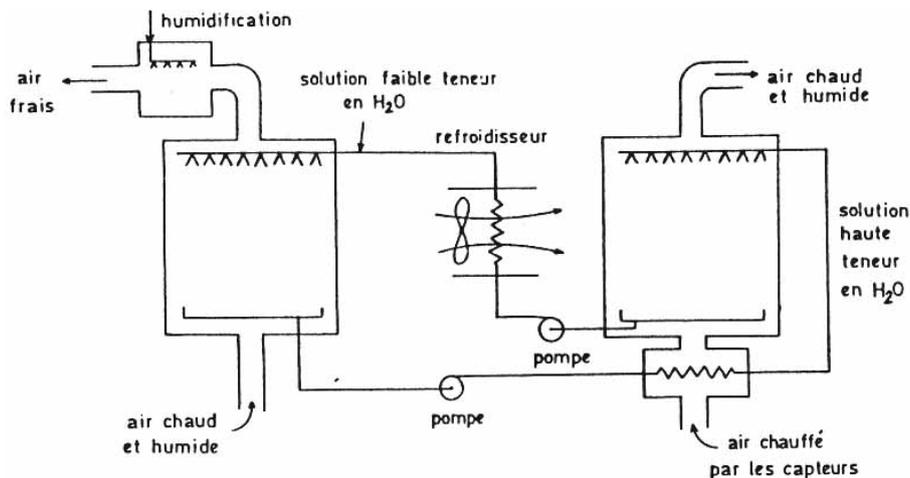


Figure: Schéma du procédé Lof

Le séchoir solaire

Le séchage naturel connu et pratiqué par nos ancêtres consiste à exposer le produit à sécher directement au soleil, en l'étalant au sol sur des nattes ou des claies. Ce type de séchage, bien qu'il soit simple et gratuit, a l'inconvénient de nécessiter de longues durées de séchage, d'exposer le produit à la poussière, à la pluie et aux insectes. D'où altération de la qualité et risque de pourrissement et de moisissures qui peuvent atteindre jusqu'à 50% des récoltes.

Le séchage solaire a pour avantage de conserver les aliments tout en gardant une majorité des éléments nutritifs, seules les vitamines B et C sont majoritairement perdues. Correctement stockés, les aliments se conservent entre 6 et 12 mois sans baisse de la qualité

Ce n'est qu'au 20^{ème} siècle avec l'apparition du concept de l'activité de l'eau (*water activity* Aw) et la connaissance des mécanismes de transfert de l'humidité dans les produits que furent développés les premiers séchoirs artificiels conçus selon des règles scientifiques.

Le séchoir solaire apparaît alors comme une solution non polluante. Souvent artisanaux, le séchoir peut se décliner sous différentes formes

Types de séchoirs solaires

- 1) **Les séchoirs-Tunnel** : Ce sont des séchoirs industriels destinés au séchage des grandes récoltes et dans les processus de conservation de certains aliments. Ils se composent d'un champ de capteurs solaires et d'un circuit aéraulique, le tout constituant le générateur d'air chaud. Le produit à sécher est disposé dans des chariots montés sur des rails, qui traversent un tunnel de quelques mètres de façon continue (Figure20).



Figure: Les séchoirs-Tunnel

- 2) **Les séchoirs-stock** Appelés aussi séchoirs étuves, ce sont des séchoirs immobiles, où le produit à sécher est entreposé sur des claies ou étagères. Les séchoirs stocks peuvent être directs ou indirects.
- **Les séchoirs solaires directs (séchoirs-serre)** Dans ce type de séchoirs, l'insolateur (capteur solaire) et le stock (chambre de séchage) forment un seul bloc. Le séchoir est constitué d'un caisson isolé à sa base et recouvert d'une vitre ou d'un plastique clair. Les aliments à sécher reçoivent directement les rayons du soleil à travers la couverture transparente (Figure 21). Ce type de séchoir est adapté au séchage des fruits et légumes dont la teneur en eau initiale est importante et qui nécessitent de longues durées de séchage (Figure 22).

**Figure :** Séchoir solaire direct portatif**Figure:** Séchoir solaire serre

- **Les séchoirs solaires indirects :** Ils sont composés d'isolateurs couplés à une chambre de séchage. L'isolateur sert à chauffer l'air et à l'envoyer dans cette dernière (Figure 23). En

convection naturelle, ceci ne suffit pas à réchauffer l'air à la température désirée, ce qui explique l'ajout d'une cheminée. L'énergie supplémentaire qui se trouve à la base de la cheminée améliore considérablement le fonctionnement du séchoir en augmentant le débit de l'air dans la masse du produit à sécher.



Figure: Deux types de séchoirs solaires indirects

Les applications de la solaire thermique basse température sont assez nombreuses et concourent à la satisfaction de très nombreux besoins dans le domaine de l'agriculture, de la santé et de l'amélioration de la qualité de la vie. La cuisson solaire, qui sort du cadre des basses températures, n'est pas abordée ici. Signalons cependant que c'est un domaine important, contribue à la qualité de la vie et également à la préservation de l'environnement.