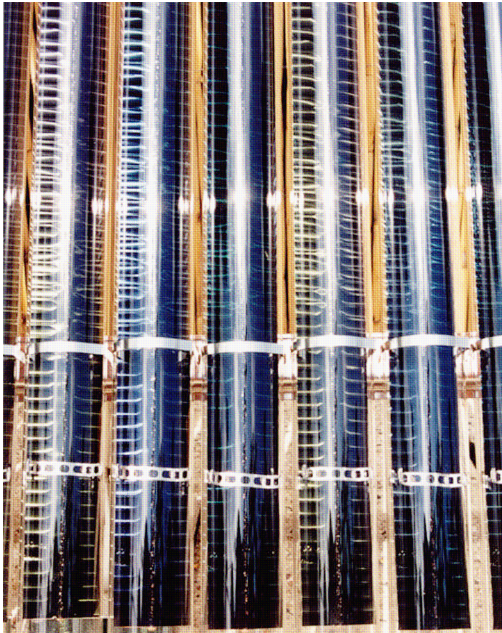




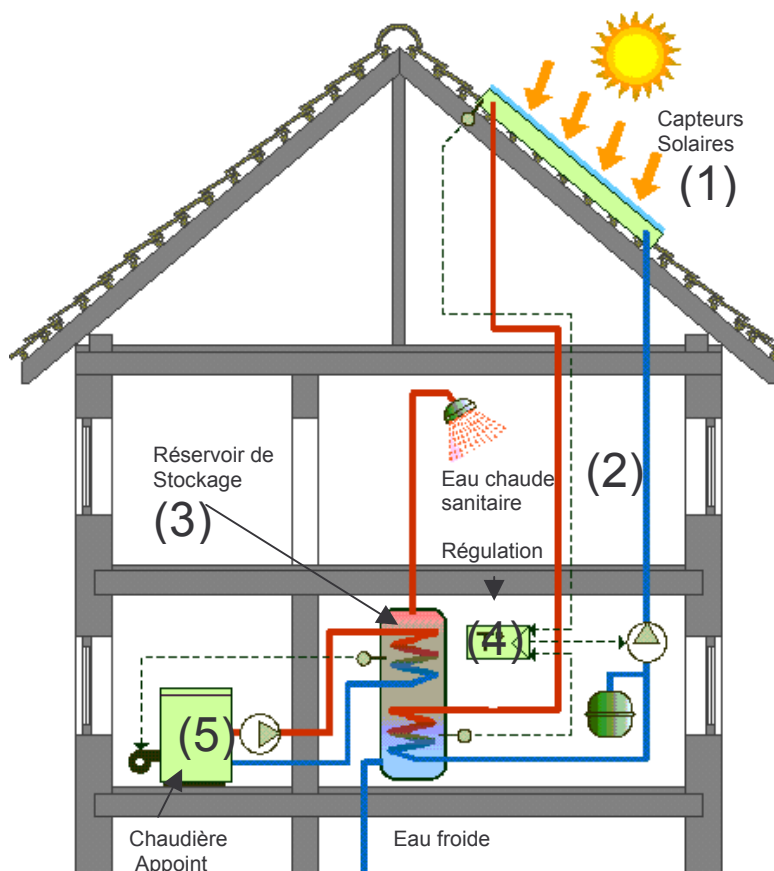
Le Chauffe Eau Solaire



LE CHAUFFE EAU SOLAIRE THERMIQUE (CES)

Une installation de production d'eau chaude sanitaire par l'énergie solaire est généralement constituée de capteurs solaires (1) à circulation de liquide qui effectuent la conversion du rayonnement électromagnétique émis par le soleil, en chaleur et permettent le transfert de cette énergie calorifique en la cédant à un fluide caloporteur (2). L'installation domestique est aussi constituée d'un réservoir de stockage (3) permettant d'accumuler l'énergie reçue du soleil et d'une régulation (4).

Dans toute installation solaire, du moins en Belgique, une installation de production d'eau chaude sanitaire est aussi obligatoirement constituée d'un système d'appoint (5).

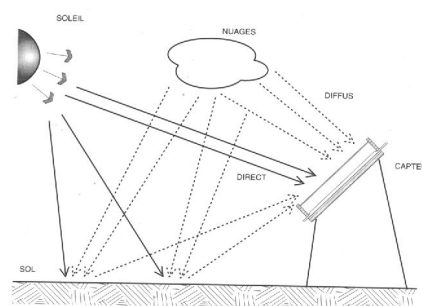


Les différents constituants des installations solaires et les différents types de matériaux utilisés ainsi que leurs performances seront présentés dans cette brochure technique.

1 Rappels théoriques

1.1 Le rayonnement du soleil

Le rayonnement solaire est l'apport énergétique dispensé quotidiennement de façon inépuisable, mais dont l'intensité est variable en fonction de la géographie et des rythmes journaliers et saisonniers. Même dans des zones à faible ensoleillement comme en Europe du Nord, l'énergie solaire constitue un apport énergétique non négligeable. **En Belgique, une surface horizontale d'un mètre carré reçoit, sur une année d'ensoleillement, une quantité d'énergie de 800 à 1100 kWh/m² par an (soit, à titre de comparaison, l'équivalent de 100 litres de fuel par m² par an).**



Cette énergie est la somme de l'énergie solaire directe et du rayonnement diffus.

1.2 La conversion thermique

Dès que l'énergie lumineuse du soleil rencontre de la matière, celle-ci transforme une partie en chaleur. C'est ce qu'on appelle la conversion thermique, et c'est sur ce principe que sont basés les principaux procédés de chauffage solaire.

2 Le capteur solaire

Le capteur solaire est l'élément de base pour la transformation de l'énergie solaire en chaleur. Il existe deux grandes familles de capteurs solaires thermiques :

- les capteurs solaires plan
- les capteurs solaires sous vide et capteurs solaires à tubes à bouteille thermos.

D'autres systèmes un peu particuliers existent aussi sur le marché, notamment les capteurs autostockeurs qui ne seront pas présentés étant donné leur utilisation particulière ne convenant pas sous nos climats.

L'absorbeur est l'élément essentiel du capteur solaire c'est pourquoi nous allons présenter ses caractéristiques avant de passer aux deux grandes familles de capteurs composées toutes deux d'un absorbeur.

2.1 L'absorbeur

Deux fonctions incombent à l'absorbeur :

1. absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible
2. transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de pertes.

De plus, il devra être le plus léger possible afin de limiter l'inertie de mise en régime et construit avec un bon matériau conducteur.

2.1.1 Le support

Les absorbeurs sont généralement réalisés avec des feuilles minces de métaux présentant une bonne conductibilité et une bonne tenue mécanique. C'est pourquoi, la plupart du temps, les absorbeurs sont réalisés au moyen d'un support en cuivre de 0,2 mm et sont recouverts par un traitement de surface.

2.1.2 La sélectivité : le traitement de surface

Le rôle de l'absorbeur est de capter au maximum le rayonnement et d'en réémettre le moins possible. Ces types de surfaces absorbant au maximum et réémettant au minimum ont été nommées surfaces « sélectives ».

La sélectivité de l'absorbeur est très importante; elle est améliorée au moyen de traitements de surface qui ajoutent au support des caractéristiques telles que le rayonnement solaire est très bien absorbé et que le rayonnement infrarouge émis (dû à l'échauffement) est limité.

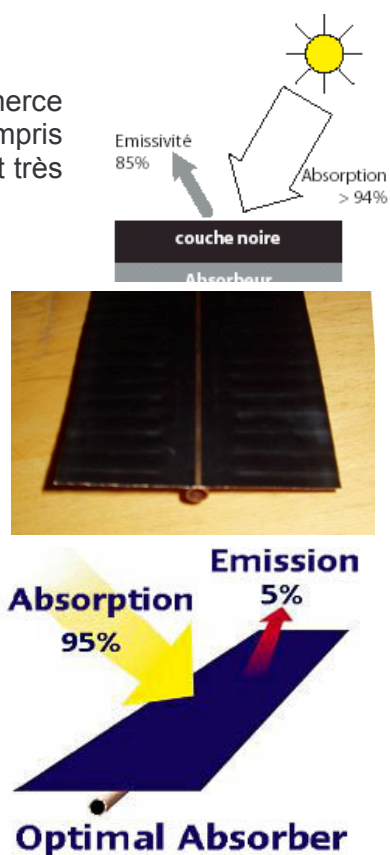
Deux coefficients déterminent les caractéristiques de ces absorbeurs :

- α : coefficient d'absorption (0 à 1, optimum : 1)
- ε : coefficient d'émission (0 à 1, optimum : 0)

Un tel traitement de surface peut être obtenu par des procédés électrochimiques ou électrophysiques. De nombreux progrès ont été réalisés dans ce domaine. Les plus importants, classés par ordre d'apparition, seront présentés et comparés par rapport à la peinture noire.

Les différents revêtements possibles :

- a. **la peinture noire** : la peinture mate noire du commerce permet d'obtenir un coefficient d'absorption compris entre 0,9 et 0,95. Mais le degré d'émission ε lui est très élevé (0,85).
- b. **Oxyde de chrome** : le revêtement en "black chrome" (couleur noire) est composé d'oxyde de chrome déposé sur une sous-couche de nickel, le tout formant une couche extrêmement fine sur un support métallique. Son coefficient d'absorption α est de 0,95 et son coefficient d'émission ε de 0,12 à 0,18.
- c. **Traitement sous vide** : ce revêtement sélectif a été mis au point en 1995 et est facilement reconnaissable de par sa couleur bleu marine. Ce procédé consiste à déposer différents métaux (titane, ...) sur la surface absorbante en présence du vide. Le coefficient d'absorption α obtenu est supérieur à 0,95 et le coefficient d'émission ε , inférieur à 0,05.



Résumé des différents traitements de surface :

Revêtement	Absorption : α	Emission : ε
Peinture noire	0,9 – 0,95	> 0,85
Black chrome	0,95	0,12 à 0,18
Dépôt sous vide	> 0,95	< 0,05

Actuellement le procédé de revêtement sous vide a pris une grande place sur le marché grâce :

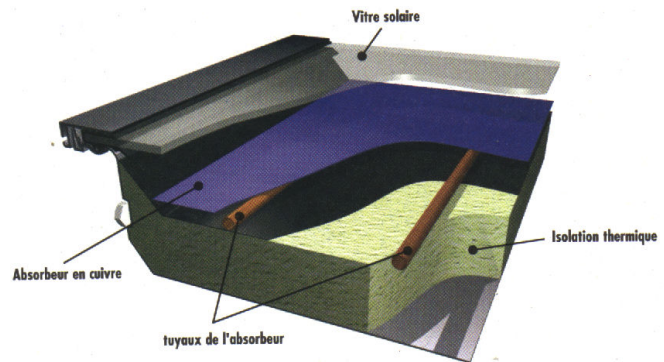
- à ses performances

- à sa faible consommation en énergie lors de la fabrication ($\pm 1\text{kWh}$ par m^2 d'absorbeur, c'est-à-dire moins de 10% de l'énergie nécessaire pour les autres revêtements)
- à son respect au niveau écologique (pas de dégagements de gaz ou solides, pas de pollution de l'eau)

2.2 Le capteur plan

Un capteur solaire plan est composé des éléments suivants que nous détaillerons par la suite :

- un **corps opaque** qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant (l'absorbeur);
- un **système de transfert de chaleur** par le fluide « caloporteur »;
- une **isolation thermique** arrière et latérale;
- une **couverture transparente** qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en le protégeant du vent.



2.2.1 Le coffre ou le cadre

Le coffre du capteur renferme les différents éléments actifs. Il devra donc assurer une protection efficace contre les agents atmosphériques à long terme.

Les coffres des capteurs sont réalisés la plupart du temps en **acier inoxydable** ou en **aluminium anodisé**. L'anodisation offre à l'aluminium une résistance élevée aux agressions du milieu extérieur et a un prix inférieur à l'acier inoxydable.

2.2.2 La couverture transparente

La couverture a une fonction de protection de l'absorbeur, mais elle joue aussi un rôle important dans le bilan thermique en réduisant les pertes de chaleur. Habituellement, on utilisera le **verre** comme couverture transparente.

La propriété physique intéressante du verre est qu'il permet de laisser passer le rayonnement solaire et d'arrêter le rayonnement infrarouge d'un émetteur tel que celui de l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est **l'effet de serre**.

La couverture doit présenter une bonne résistance aux chocs, aux brusques variations de températures ainsi qu'aux températures élevées.

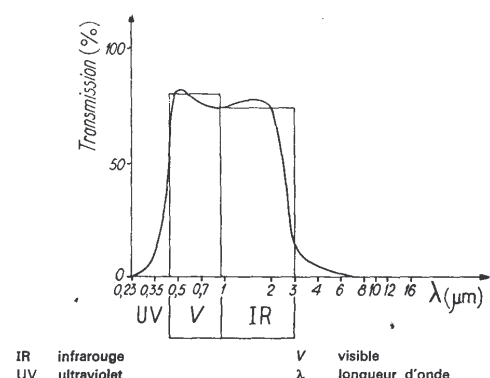


Figure 1 : Transparence du verre

Une appellation « verre solaire » existe et fait l'objet d'exigences toutes particulières :

- le verre doit être trempé pour résister sans risques aux charges thermiques et mécaniques.
- il doit présenter un haut degré de transmission solaire caractérisé par une faible teneur en fer.
- il doit être doté d'une surface structurée permettant de réduire les reflets directs.

La qualité du verre est caractérisée par son rendement optique ou taux de transmission ζ qui dépend de la nature et de l'épaisseur du vitrage ainsi que de l'angle d'incidence i et de la nature du rayonnement (direct ou diffus) (valeur habituelle de ζ : 0,91).

Actuellement, un niveau verre, dit « antireflet », équipe certains capteurs. Ce verre a un taux de transmission de l'ordre de 96% et son effet se marque davantage pour le placement de capteurs à la verticale.

2.2.3 L'isolation de l'arrière et des côtés

Limiter les pertes de transmission vers l'extérieur est primordial pour optimiser les performances du capteur.

Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation des capteurs, mais il faut veiller à la tenue de la température, car une coupure de circulation du fluide caloporteur peut faire monter la température intérieure du capteur à plus de 150°C. Les isolants généralement utilisés sont la laine de verre et les mousses polyuréthanes. Leur épaisseur varie de 4 à 8 cm.

La figure 2 présente de manière schématique les différentes pertes générées par les constituants du capteur solaire plan. On remarque aisément que sur une base de 100 % à la surface du vitrage du capteur, seulement 60 % du rayonnement arrivent directement à l'absorbeur. Quant aux 40 % restants ils ne sont pas complètement perdus mais ils vont jouer un rôle par l'intermédiaire de l'effet de serre, ...

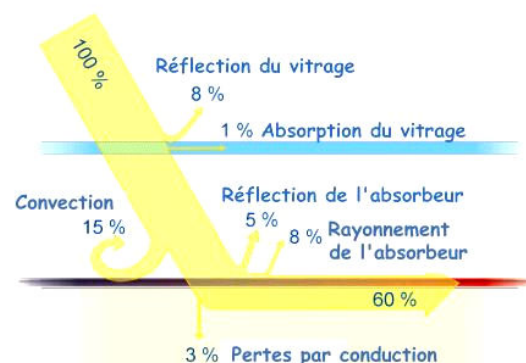


Figure 2 : Schéma des différentes pertes

2.3 Le capteur sous vide

A l'intérieur des capteurs plans règne la pression de l'air ambiant, grâce souvent à de petites ouvertures pratiquées dans l'enveloppe du capteur. La circulation de l'air entre l'absorbeur et la plaque de couverture joue un rôle important dans le cadre des pertes énergétiques au niveau de la plaque absorbante. Il est toutefois possible de remédier à cette déperdition par convection en éliminant l'air du capteur, c'est-à-dire en utilisant des capteurs sous vide.

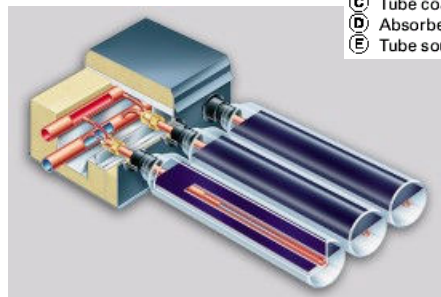
Deux types de capteurs sous vide sont présents sur le marché et vont être décrits ci-après :

- a. le capteur avec absorbeur et système de transfert de chaleur sous vide
- b. le capteur à bouteilles à tubes thermos (appelés aussi tubes Sydney ou CPC).

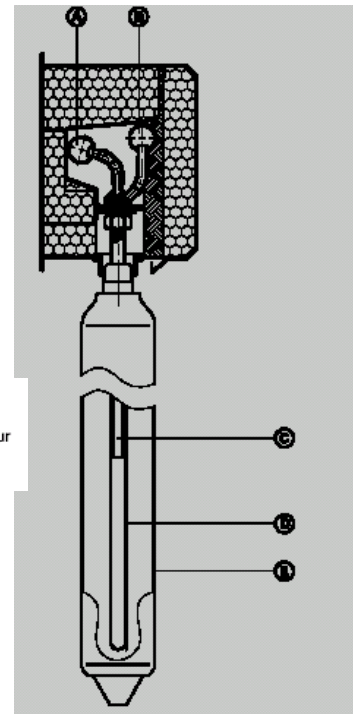
- a. **Capteur à absorbeur sous vide** : dans ce cas, l'absorbeur est inséré dans un tube en verre sous vide (de longueur de ± 2 m et de ± 10 cm de diamètre). Les différents tubes arrivent en leur sommet dans un collecteur qui les rassemble. Chaque tube est mis sous vide, avec la même méthode utilisée pour les tubes cathodiques des téléviseurs, assurant un très bas niveau de vide (10^{-5} Torr). Cette méthode de mise sous vide n'est possible que s'il y a étanchéité parfaite réalisée au moyen d'une soudure verre-métal.

Deux modes de réalisation existent :

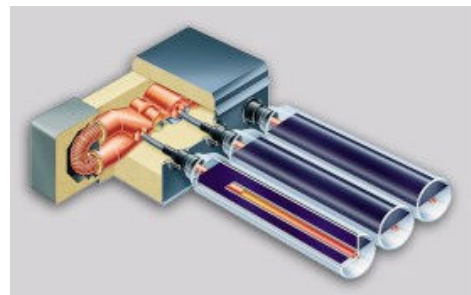
- a.1 : **L'absorbeur comporte deux tubes de cuivre** dans lesquels s'écoule le fluide caloporteur (parfois ces deux tubes en cuivre sont disposés de manière concentrique). Les différents tubes sont raccordés aux conduites du circuit primaire. Le mode de fonctionnement de ce capteur ne diffère donc fondamentalement pas de celui d'un capteur plan : le fluide caloporteur du circuit primaire continue à circuler dans le circuit de refroidissement de l'absorbeur.



- (A) Tube retour (entrée)
- (B) Tube départ (sortie)
- (C) Tube coaxial de l'échangeur de chaleur
- (D) Absorbeur
- (E) Tube sous vide en verre spécial



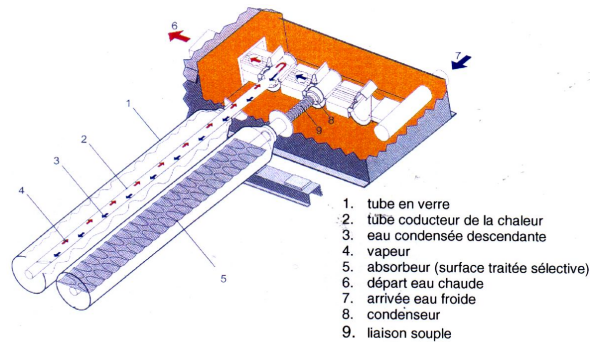
- a.2 : Dans la deuxième variante, nommée **Heat-pipe**, l'absorbeur oblong est fixé à un caloduc dont les deux extrémités sont fermées après y avoir fait le vide. Ce tube est partiellement rempli d'un fluide présentant une courbe d'ébullition intéressante pour l'application visée (souvent 2 gr d'eau). L'extrémité fermée en dehors du tube est insérée dans un échangeur de chaleur spécialement conçu à cet effet, dans lequel circule le fluide caloporteur transférant la chaleur vers le ballon de stockage. L'échauffement de l'absorbeur provoque l'évaporation (ébullition) du fluide présent dans le tube fermé, ce qui refroidit l'absorbeur. Les vapeurs formées s'élèvent dans la partie supérieure du tube où se situe l'échangeur de chaleur et s'y refroidissent. Le refroidissement dans cet échangeur a pour effet de condenser la vapeur, qui revient alors dans la partie



inférieure du tube et refroidit la bande absorbante. L'échangeur fait donc office ici de condenseur.

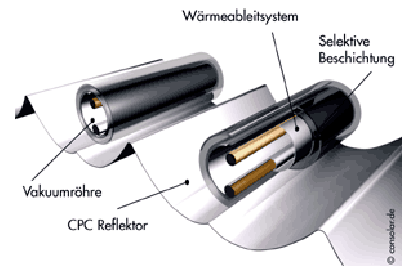
Le principe de refroidissement de l'absorbeur diffère donc fondamentalement de celui des capteurs plans classiques. Ce système présente l'avantage important de permettre l'installation, dans la section de condensation du caloduc, d'un clapet à fermeture automatique empêchant, à partir de 85°C

(ou 130°C), les vapeurs d'atteindre le condenseur, interdisant ainsi toute récupération de chaleur ultérieure. On peut de la sorte éviter un échauffement trop élevé du système ou une température trop élevée de l'eau pour le sanitaire.

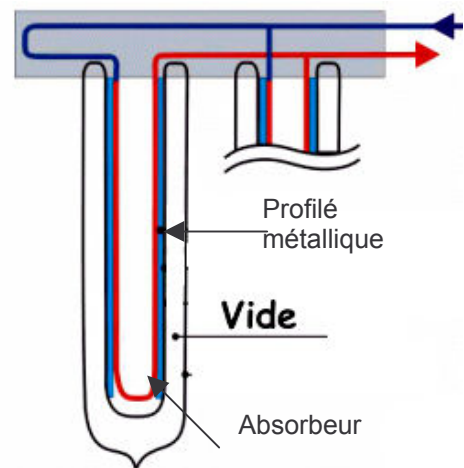


b. Capteurs solaires à tubes bouteille thermos :

ces capteurs utilisent une bouteille de verre à double paroi (d'une longueur de ± 2 m et d'un diamètre de ± 10 cm). Les deux parois sont reliées de manière étanche à l'air au niveau du goulot. L'intérieur de la bouteille est soumis à l'air atmosphérique, tandis que l'espace compris entre les deux parois est sous vide.



La paroi extérieure de la bouteille est transparente tandis que la paroi intérieure est pour sa part pourvue, du côté sous vide, d'un revêtement à absorption sélective; de l'autre elle est en contact avec deux profilés semi-circulaires métalliques, eux-mêmes en contact avec les branches de l'absorbeur en U. La chaleur se créant dans le revêtement absorbant par suite du rayonnement solaire se transmet via les bandes semi-circulaires aux tubes métalliques, d'où elle est évacuée par le fluide caloporteur.



Les deux branches du tube en U sortent du côté du goulot de la bouteille et sont reliées au circuit primaire, cette connexion étant assurée dans un boîtier bien isolé.

Plusieurs tubes sont juxtaposés et raccordés au boîtier.

Un réflecteur est parfois installé sous l'ensemble, afin que les rayons solaires puissent se réfléchir sur la partie de l'absorbeur qui n'est pas orientée vers le soleil. De cette manière, on tire un parti optimal de la capacité d'absorption des bouteilles.

Dans ce genre de capteur, le revêtement absorbant se trouve dans la partie sous vide, tandis que le système de refroidissement de l'absorbeur se trouve dans la bouteille thermos, ce qui permet de réduire les déperditions calorifiques.

2.4 Grandes différences entre les capteurs plans et les capteurs sous vide

Le capteur sous vide, de par le vide qui est présent autour de l'absorbeur, sera moins influencé par la température extérieure par rapport au capteur plan qui, lui, sera en contact au travers de la vitre et du caisson avec la température extérieure.

Les capteurs sous vide ont habituellement un rendement optique, η_0 , inférieur aux capteurs plans mais des coefficients de pertes a_1 et a_2 inférieurs à ceux des capteurs plans (voir équation de rendement du capteur pt 8.1).

Un autre avantage des capteurs plans du type « heat-pipe » est qu'il permet un arrêt de l'installation quand la température devient trop élevée grâce au système caloduc expliqué au point 2.3 a2. Cela permet d'éviter de monter trop haut en température dans l'installation solaire et de limiter ainsi l'usure des différents composants et du fluide caloporteur.

Néanmoins, leur coût est nettement plus élevé par rapport à celui des capteurs plans et ce type de capteur sera souvent conseillé :

- quand on dispose d'une faible surface pour installer les capteurs,
- quand il n'est pas possible de placer les capteurs en direction du sud (les bouteilles peuvent être légèrement inclinées afin de diriger les absorbeurs vers le Sud),
- et quand les capteurs sont installés sur toits plats ou en façade (possibilité d'inclinaison des bouteilles permettant d'orienter les absorbeurs)

2.5 Le montage

Les capteurs peuvent être installés de différentes manières. Ces trois possibilités sont représentées sur la figure 3 :

- **montage en superposition de toiture (cas A) :** dans ce cas, des pattes sont fixées directement sur la charpente du toit sur lesquels viennent se poser des guides et finalement les capteurs. Ce type de pose présente le gros avantage de ne pas toucher à l'étanchéité de la toiture : il faut juste enlever quelques tuiles le temps de fixer les pattes de support à la charpente et les remettre par après. Deux guides par capteur, attachés à ces supports (deux par guide), vont retenir le capteur.

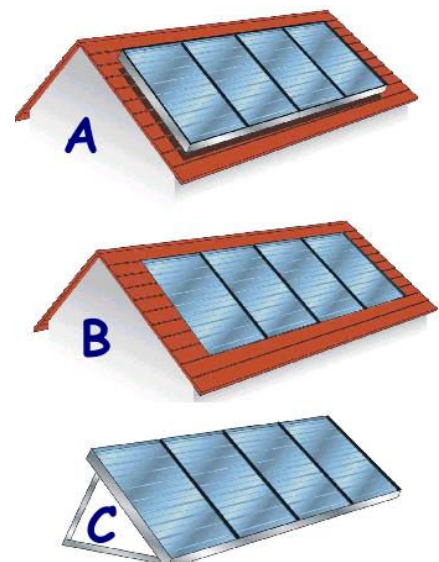


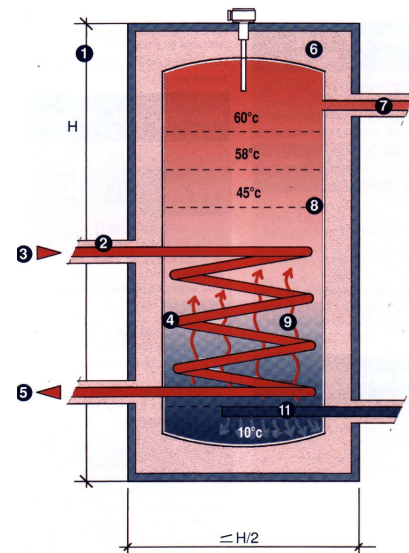
Figure 3 : Montage des capteurs

- **montage intégré en toiture (cas B)** : dans ce cas, les capteurs sont directement posés sur la charpente de la toiture et remplacent les tuiles. Différents accessoires permettent de garantir une étanchéité parfaite de la toiture.
- **montage sur toiture plate ou en terrasse (cas C)** : quand aucune toiture n'est bien orientée ou quand la toiture est plate, des kits de montage permettent de disposer les capteurs sur la toiture plate ou en terrasse. Des profilés en aluminium permettent d'incliner facilement les capteurs à 45°. Les profilés sont fixés sur la toiture ou maintenus à l'aide de blocs en béton.

3 Le stockage

Le stockage de l'énergie permet de pallier le caractère discontinu de l'énergie solaire. L'accumulation de l'énergie dans le stockage se traduit par une élévation de sa température.

Il est important de respecter une stratification thermique dans le réservoir de stockage (figure 4). A cet effet, celui-ci devrait être de forme verticale, le plus étroit et le plus haut possible. Un rapport hauteur/diamètre de 2 à 2,5 est recommandé. La stratification est réalisée dans un boiler lors du puisage. L'eau chaude ayant une densité plus faible que l'eau froide a tendance à occuper l'espace supérieur du boiler lors de l'échauffement de celui-ci. Lors du puisage, la quantité d'eau chaude puisée sera remplacée dans le réservoir par de l'eau froide de la conduite. Cette eau froide arrivant par le bas, on observera une superposition de couches d'eau à des températures différentes. C'est la **stratification**. On obtient dans un bon réservoir de stockage différentes couches d'eau avec des températures d'eau les plus froides en bas et de plus en plus chaudes plus on monte dans le boiler. L'important est donc d'éviter tout brassage de l'eau.



- 1 : Hauteur
- 2 : Isolation
- 3 : Arrivée chaudière
- 4 : Circuit primaire
- 5 : Retour chaudière
- 6 : Isolation (8 à 16 cm)
- 7 : Sortie eau chaude
- 8 : Surface d'éch. min entre eau fr. et ch.
- 9 : Ech. circuit primaire et eau sanitaire
- 10 : Entrée eau froide
- 11 : Casse jet, réduit vitesse arrivée eau

Figure 4 : Stratification ds boiler

Les boilers solaires (figure 5) surnommés « tri-énergies » sont particuliers par le fait qu'ils comportent habituellement une ouverture au 3/5 de leur hauteur afin de permettre l'insertion d'une résistance électrique pour réaliser l'appoint et deux échangeurs de chaleur :

- un dans la partie inférieure pour le circuit solaire où le fluide caloporteur viendra échanger sa chaleur reçue par les capteurs
- un dans la partie supérieure destiné à l'appoint (voir § II.6, p.15)

3.1 Le revêtement

Différents types de revêtements peuvent être utilisés pour les réservoirs de stockage, le critère essentiel étant la résistance à la corrosion. Le boiler en acier inoxydable est

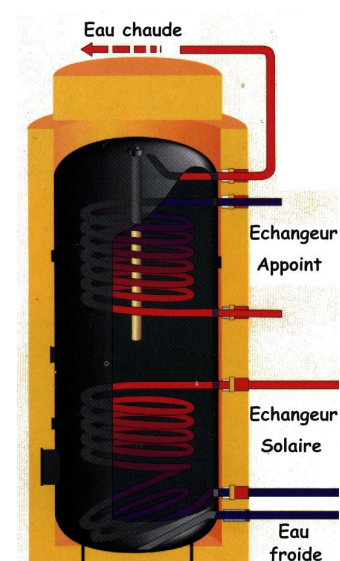


Figure 5 : Boiler solaire

donc le préféré, mais toutefois les réservoirs de stockage en cuivre et en acier émaillé avec anode de protection conviennent également et sont à un coût inférieur. Deux grand types d'anodes de protection existent :

1. l'anode sacrificielle au magnésium : l'anode au magnésium se corrode à la place du réservoir de stockage. Mais cette anode se consomme et il faut donc contrôler son efficacité tous les deux ans et la remplacer si nécessaire.
2. anode à courant imposé : dans ce cas, l'anode est inattaquable, il est donc inutile de vérifier son efficacité. Ce procédé néanmoins nécessite d'être alimenté de manière permanente, mais sa consommation est inférieure à 25 kWh par an.



3.2 L'isolation

La qualité de l'isolation du ballon de stockage revêt une grande importance. On parle de matériau isolant lorsque le coefficient de **conductivité thermique** (k) est inférieur à 0,065 W/(m.K). Plus cette valeur k est faible, moins la chaleur traversera le matériau et donc plus grand sera son pouvoir isolant.

Une autre manière plus facile de comparer les déperditions thermiques de différents boilers est de comparer leur déperdition propre exprimée en kWh/24h ou en °C/24h pour une température de stockage donnée. Dans ces cas, le matériau et l'épaisseur d'isolation sont déjà pris en compte ; ce qui rend la comparaison plus facile.

Remarque : à partir de janvier 2003 les mousses isolantes utilisées pour les boilers ne peuvent plus contenir de CFC.

3.3 La capacité

Le dimensionnement du volume du boiler ne se fait pas sur base de la consommation d'une journée. Il faut prévoir un volume de stockage de 1,3 à 1,7 fois la consommation journalière en eau chaude sanitaire afin de pouvoir stocker de l'eau chaude pour deux jours, ce qui permet de prendre en compte partiellement les effets climatiques. Il est habituellement conseillé aussi de prévoir un stockage de 50 à 80 l par mètre carré de capteurs plans.

3.4 La légionellose

Les légionelles (germe bactérien) ont tendance à proliférer dans des eaux stagnantes à des températures de 25 à 45°C, **ce qui n'est habituellement pas le cas pour l'utilisation normale d'un chauffe-eau solaire chez les particuliers**. Si un puisage journalier n'est pas effectué, des mesures sont recommandées pour éviter l'apparition de légionelles dans l'eau chaude sanitaire :

- le contenu utile du chauffe-eau doit être hebdomadairement porté à une température de 60°C au moins pendant une heure.

- la température mesurée à la prise d'eau chaude doit atteindre au moins 50°C.

4 Les autres composants d'un chauffe-eau solaire

4.1 Les conduites du circuit primaire

Habituellement, les matériaux utilisés pour les tuyauteries sont des tubes en cuivre ou des tubes en acier simple.

Des systèmes complets comprenant les tuyauteries aller et retour ainsi que le câble pour la sonde de température du capteur et l'isolation existent. Ce système de tuyauterie permet un gain de temps à l'installation.

Les tuyauteries du circuit primaire ont intérêt à être isolées de manière à limiter les pertes de chaleur entre les collecteurs et le ballon de stockage.

L'isolation de ces tuyauteries ne peut en aucun cas être réalisée au moyen d'isolant pour les tuyauteries sanitaires habituelles, car il est indispensable de tenir compte des températures auxquelles celles-ci seront exposées. L'isolant habituellement utilisé peut résister à une température continue de 150 à 180°C.

4.2 Vase d'expansion

Le vase d'expansion doit permettre l'expansion du fluide caloporteur et permettre d'absorber le volume de ce dernier expulsé du capteur solaire lorsqu'un phénomène d'ébullition survient, et cela sans hausse excessive de la pression.



4.3 La station solaire

Dans la plupart des systèmes solaires, un module station solaire, comprenant le circulateur, les clapets anti-retour et les vannes, est présent. La plupart du temps, la régulation est aussi insérée dans ce module.

Le clapet anti-retour a pour fonction d'empêcher, dans les systèmes sans vidange, qu'un effet de thermosiphon n'entraîne une inversion de la circulation du fluide caloporteur dans le circuit primaire en cas d'arrêt de la pompe.

Le rôle du circulateur est d'assurer la circulation du fluide caloporteur dans la boucle solaire. Les circulateurs utilisés dans les installations de chauffage central avec radiateurs (résistant à des températures pouvant atteindre 120°C) conviennent normalement aussi pour les installations avec chauffe-eau solaire.



La soupape de sécurité sert à limiter la pression maximale dans le circuit primaire. Les soupapes de sécurité sont constituées d'un boîtier en laiton et peuvent être associées à un manomètre. Habituellement les soupapes de sécurité ont des pressions d'ouverture de 4 à 6 bars.

Remarque : Un réservoir étanche doit être prévu afin de récolter les effluents de la soupape.



4.4 Les robinets de vidange

Des robinets de vidange et de remplissage devront être placés au point le plus bas du circuit solaire et sur l'arrivée d'eau froide du boiler afin de pouvoir effectuer la vidange complète de l'installation.

Remarque : Un réservoir étanche doit être prévu afin de recueillir le fluide caloporteur.

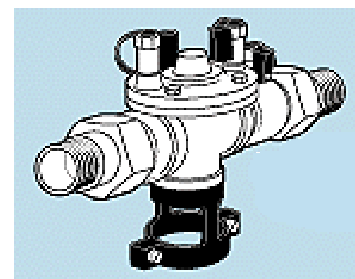
4.5 Les purgeurs

Les purgeurs permettent à l'air de s'échapper des tuyauteries, ce qui se produit lors du remplissage et, le cas échéant, ultérieurement en cours de fonctionnement de l'installation. Les purgeurs doivent être disposés aux points les plus élevés de l'installation. Le purgeur est uniquement prévu pour les installations sans vidange. On utilise exclusivement des purgeurs à commande manuelle ou des purgeurs automatiques « verrouillables » lors du fonctionnement normal de l'installation.



4.6 Le disconnecteur

Un disconnecteur est un dispositif agréé qui permet de protéger le réseau public et le réseau intérieur d'eau potable contre tout risque de retour d'eau polluée. Le disconnecteur sera placé sur l'arrivée d'eau froide du boiler et est nécessaire pour éviter, en cas de fuite de l'échangeur primaire dans le ballon de stockage, le retour d'eau glycolée dans le réseau d'eau potable.



5 Le fluide caloporteur

5.1 Rôle et caractéristiques

Le fluide caloporteur est utilisé dans le circuit primaire de l'installation c'est-à-dire dans le circuit reliant le boiler aux capteurs. Différents fluides peuvent être utilisés (eau,

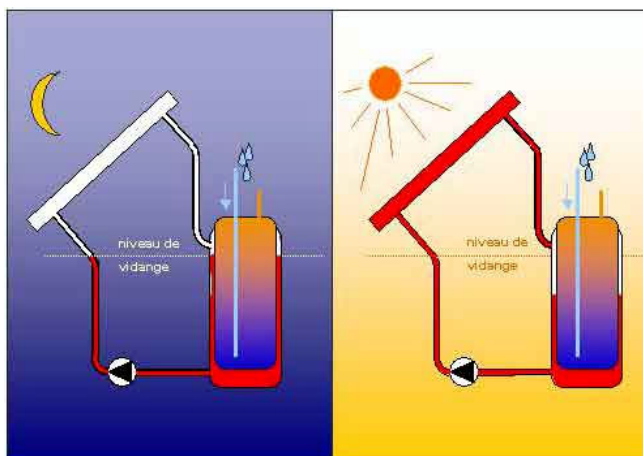
glycol, ...), mais il faut veiller au risque de gel de l'installation dû à la présence des capteurs à l'extérieur en hiver. On choisira donc habituellement de travailler avec un fluide résistant à des températures de -20°C pour nos régions ou simplement de l'eau en veillant bien à la vidange complète des parties de l'installation présentant un risque de gel.

5.2 Deux grandes catégories de systèmes solaires

La conception du circuit hydraulique de l'installation solaire peut varier. Voici une brève présentation des deux grandes familles :

5.2.1 Chauffe-eau solaire à vidange

Dans ce type d'installation, le circuit solaire n'est pas complètement rempli d'eau. Tant que le circulateur n'est pas en marche, l'eau stagne dans la cuve de vidange et les capteurs ne sont pas remplis d'eau. A ce moment, il n'y a pas non plus de danger de gel ou de surchauffe.



5.2.2 Chauffe-eau solaires à circulation forcée

Contrairement aux chauffe-eau à vidange, l'installation ici est tout le temps sous pression et donc complètement remplie de fluide caloporteur. L'installation étant toujours sous pression, le fluide caloporteur doit pouvoir résister au gel en hiver et on utilise donc habituellement comme fluide caloporteur un antigel.

Ce système s'apparente fortement à un circuit de chauffage central au niveau de ses composants.

5.3 Débit

Deux possibilités se présentent pour la circulation du fluide caloporteur en fonction de la vitesse d'écoulement de celui-ci dans le circuit primaire : le low-flow et le high-flow.

Dans un **système low-flow**, la circulation du fluide caloporteur dans la boucle primaire de l'installation est réalisée à faible débit. Cela permet de travailler avec des faibles diamètres de tuyauteries et des Δt (différences de température entre l'entrée et la sortie de l'absorbeur) assez élevés. On favorise donc la production d'une petite quantité d'eau avec une grande augmentation de température (20 à 40°C).

Ce système est rarement utilisé, excepté dans le cas où l'eau chauffée par les capteurs est directement utilisée sans passer dans un échangeur.

Dans un **système high-flow**, la circulation du fluide caloporteur dans la boucle primaire est réalisée à haut débit. Cela nécessite un diamètre de tuyauteries plus important et entraîne un échange avec de faibles Δt . Les débits sont habituellement de 40 à 50 litres

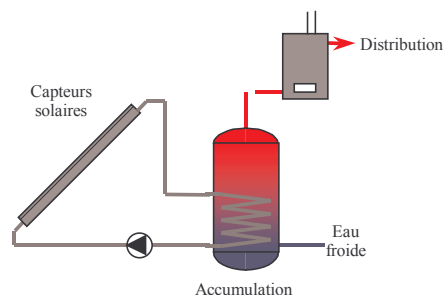
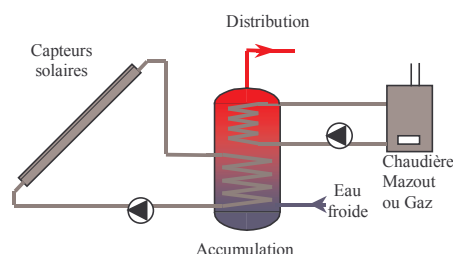
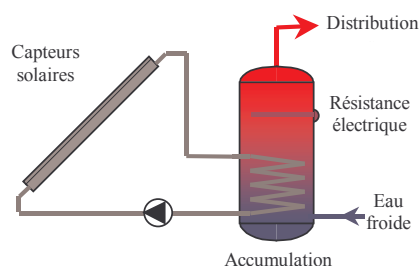
par heure et par m² de capteurs. On favorise ainsi la production d'une plus grande quantité d'eau avec une faible augmentation de température (10°C).

6 L'énergie d'appoint

L'énergie solaire dépendant essentiellement du rayonnement solaire et l'eau du robinet devant être maintenue à une température constante, un système d'appoint est nécessaire. La philosophie solaire est de se passer totalement de l'appoint en période de non chauffage de l'habitation. Le principe du système d'appoint est de réchauffer le tiers supérieur du boiler. C'est pourquoi ce système devra se situer dans la partie supérieure du boiler. L'eau, réchauffée au moyen de l'échangeur (via la chaudière mazout ou gaz) ou d'une résistance électrique, aura une densité plus élevée que l'eau située dans la partie basse du boiler et restera donc dans la partie haute de celui-ci.

Il existe trois systèmes d'appoint possibles :

- Appoint électrique : système d'appoint intégré, car on insère une résistance électrique à mi-hauteur du réservoir de stockage de l'eau sanitaire. Quand la température est inférieure à une température de consigne fixée, la résistance se mettra en marche. Il est également possible de définir une plage horaire pour la mise en marche de cette résistance afin de profiter du courant de nuit (en cas de présence d'un compteur bi-horaire au domicile).
- Appoint au moyen d'une chaudière au gaz ou au mazout : un deuxième échangeur situé dans la partie supérieure du ballon de stockage d'eau chaude sanitaire permet de réchauffer le boiler par la circulation forcée au moyen d'un circulateur entre les deux dispositifs.
- Appoint instantané au moyen d'une chaudière murale au gaz : dans ce cas l'appoint se trouve à l'extérieur du réservoir de stockage. L'eau chauffée par le système solaire arrive à l'entrée de la chaudière modulante au gaz qui la porte à la température souhaitée. Il faut bien veiller à utiliser un chauffe-eau au gaz détectant la température d'arrivée de l'eau « froide » et non un chauffe-eau réglé d'office pour augmenter la température de l'eau d'entrée de x degrés.



7 La régulation électronique et le monitoring

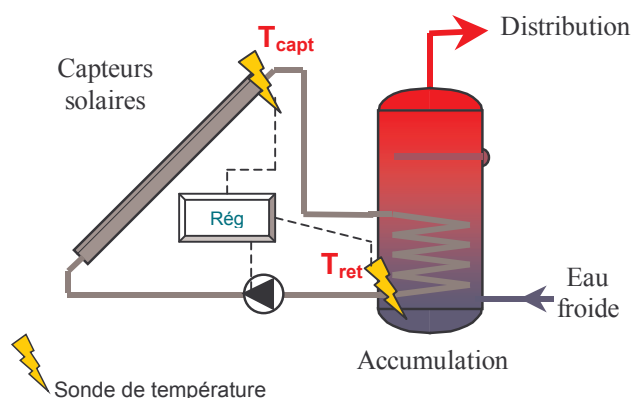
Dans une installation solaire thermique, une régulation minimale est nécessaire (excepté pour les systèmes à thermosiphon) afin de réguler le processus d'échange de chaleur entre le capteur et le réservoir de stockage. C'est pourquoi, dans tous les cas, une régulation différentielle est utilisée (voir plus bas).

7.1 La régulation différentielle

Le principe de base de la régulation d'une installation de production d'eau chaude sanitaire solaire est simple. Deux sondes sont nécessaires : une première sonde située dans les capteurs solaires, une autre sur le retour vers les capteurs à la sortie du ballon de stockage de l'eau sanitaire. Cette régulation est basée sur le principe d'un circuit intégré comparateur.

Pour être plus clair, définissons :

- T_{capt} = T° du capteur
- T_{ret} = température de retour du fluide vers les capteurs à la sortie du ballon de stockage.
- ΔT_1 : différence de température entre T_{capt} et T_{ret} pour la mise en marche de la pompe (de 5 à 10 °C)
- ΔT_2 : différence de température entre T_{capt} et T_{ret} pour l'arrêt de la pompe (de 1 à 3 °C)



Dès que : $T_{\text{capt}} > T_{\text{ret}} + \Delta T_1$: mise en marche de la pompe

$T_{\text{capt}} < T_{\text{ret}} + \Delta T_2$: arrêt de la pompe

D'autres appareils de mesure, facultatifs, peuvent être néanmoins intéressants afin de surveiller et analyser les performances du chauffe-eau solaire.

7.2 Les thermomètres à l'aller et au retour des capteurs

Très simples et peu coûteux, ces deux thermomètres placés sur les conduites aller et retour entre le capteur et le réservoir de stockage permettent de vérifier le bon fonctionnement du système. En effet, une lecture rapide et aisée de la valeur des deux thermomètres permettra de vérifier le bon fonctionnement de l'installation.



Si $T_{\text{capt}} > T_{\text{ret}}$: fonctionnement normal de l'installation

Si $T_{\text{capt}} < T_{\text{ret}}$: fonctionnement anormal de l'installation

Si $T_{\text{capt}} \gg T_{\text{ret}}$: vitesse du circulateur mal réglée car différence de température entre T_{capt} et T_{ret} trop importante.

7.3 Le débitmètre manuel

Un simple débitmètre par gravimétrie dans la boucle solaire permet de connaître avec une précision de 10 % le débit (l/min). Certaines régulations permettent de donner l'énergie récupérée par la boucle solaire (Wh) grâce à l'introduction de manière manuelle dans la régulation du débit relevé. On obtient donc un ordre de grandeur de l'énergie récupérée par l'installation solaire. Deux modèles, dont le principe de fonctionnement varie peu, existent.



Modèle a



Modèle b

7.4 Le compteur d'énergie

Composé de deux sondes de température (une pour le chaud et une pour le froid) et d'un débitmètre volumétrique, le compteur d'énergie permet de donner instantanément la puissance débitée (W) et de comptabiliser l'énergie récupérée (Wh).

Cet appareil se place sur la boucle solaire afin de déterminer l'énergie récupérée grâce au système.



Différents types de calorimètres existent sur le marché et leur grande différence concerne la précision de l'affichage des données. Un calorimètre permettant d'obtenir une qualité de précision coûte environ 300 €.

8 Le rendement global du capteur

Le rendement d'un capteur solaire dont le symbole est η est le rapport de la chaleur emmagasinée par le fluide caloporteur sur la puissance incidente reçue par le rayonnement solaire G . Le rendement d'un capteur chute au cours de la journée car ses pertes sont fonction de la différence de température entre l'air ambiant et l'absorbeur. Plus cette différence de température augmente, plus le rendement du capteur chute.

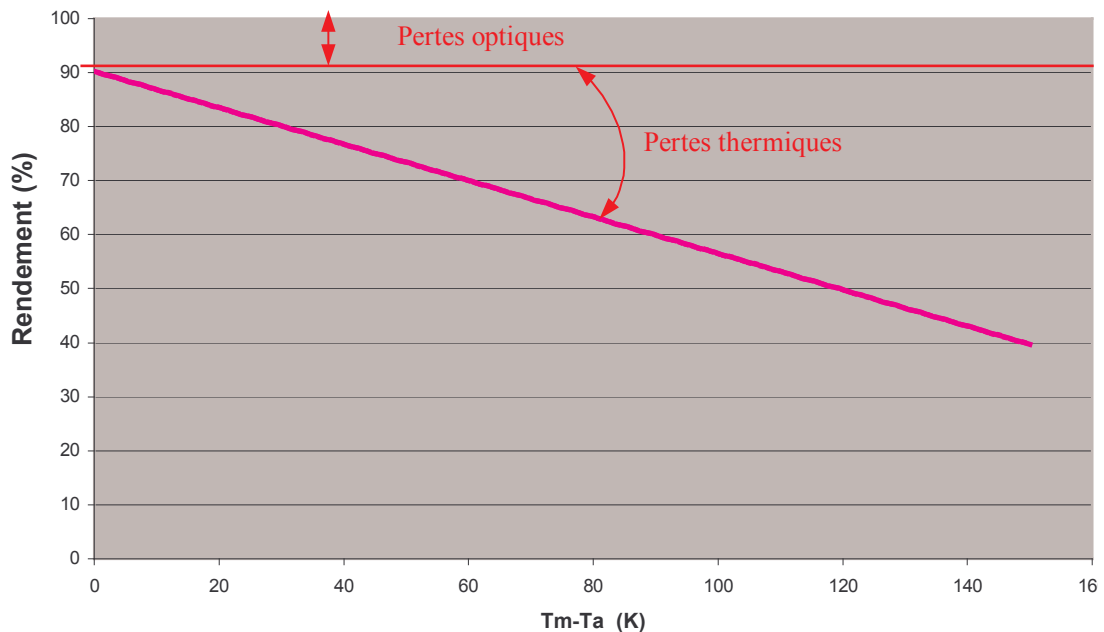
8.1 Rendement du capteur

Cette équation de rendement tient compte de l'influence des caractéristiques de l'absorbeur et du débit de fluide caloporteur.

L'équation de rendement du capteur se présente sous la forme :

$$\eta = \eta_0 - \frac{U_m}{G}(t_m - t_a) \quad (II.35)$$

- $\eta_0 = F' \cdot \alpha \cdot \zeta$, où η_0 est appelé rendement optique du capteur solaire.
 - F' : fonction de la qualité du transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide
 - α : coefficient d'absorption de l'absorbeur
 - ζ : coefficient de transmission du vitrage
- U_m : coefficient global des pertes du capteur (W/m^2K)
- t_a : température de l'air ambiant (K)
- t_m : température moyenne du fluide caloporteur (K)
- G : rayonnement solaire global (W/m^2)



Rendement du capteur en régime STATIQUE pour $G=1000 \text{ W/m}^2$

Une autre formule de rendement du capteur, selon la norme européenne, est utilisée par les centres de tests. Cette équation équivaut plus ou moins à la première et est obtenue en remplaçant U_m par deux coefficients a_1 et a_2 . En première approximation, remplacer U_m par a_1 et négliger a_2 n'est pas source d'erreurs pour une application au domicile.

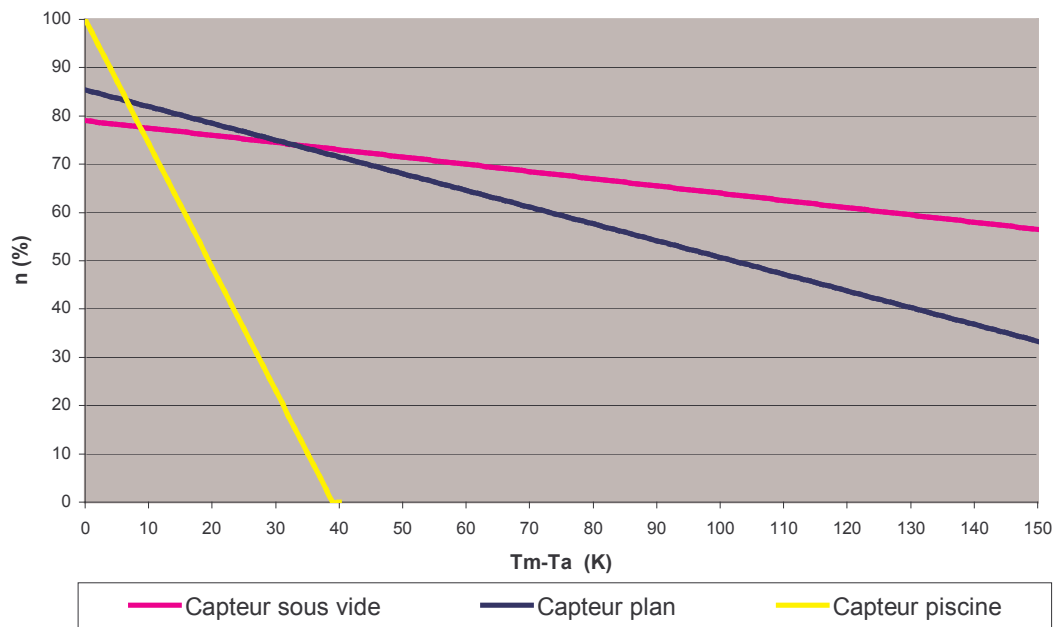
8.2 Rendement des différents capteurs usuels

Sur la figure ci-dessous sont présentés les rendements en régime établi des 3 grandes catégories de capteurs rencontrés :

- capteurs plans
- capteurs sous vide : leur coefficient de déperditions U_m sont inférieurs à ceux des capteurs plans. La pente de la droite de rendement est donc plus faible. Par contre, leur η_0 est inférieur.
- capteurs pour piscines : ces capteurs sont habituellement réalisés en matière synthétique et ne possèdent pas de couverture transparente. Leur rendement au départ est élevé, mais la chute est vertigineuse suite aux pertes à l'ambiance qui, dès

que $t_m - t_a$ augmente, croissent rapidement. Dans ce type d'applications, cela ne pose pas de problème.

On obtient les différentes droites de rendement avec, selon l'axe vertical, le rendement du capteur et selon l'axe horizontal, l'évolution de la différence de température $T_m - T_a$ correspondant à la différence de température entre la température de l'absorbeur et la température ambiante.



8.3 Le facteur d'angle K_θ

Le facteur d'angle décrit l'influence de l'incidence du rayonnement solaire sur le rendement d'un capteur (d'après l'inclinaison du capteur et la position du soleil).

K_θ est un paramètre caractéristique de chaque capteur et dépend de la qualité du vitrage employé. Il sera fourni par le constructeur pour différents angles d'inclinaison θ . Dans la pratique, on constate que ce facteur varie peu pour des angles d'incidence inférieurs à 60° .

9 Dimensionnement d'une installation solaire

Pour connaître la surface de capteurs et le volume du ballon de stockage à installer, il est nécessaire de procéder au dimensionnement de l'installation. Ce dimensionnement peut se réaliser manuellement, au moyen d'abaques ou grâce à de nombreux logiciels informatiques. Mais tout d'abord il est fondamental de parler de l'évolution de l'apport solaire.

8.1 Evolution de l'apport solaire

Les besoins en eau chaude constants tout au long de l'année, sont facilement combinables avec l'énergie solaire fournie (voir figure 6).

La forte insolation estivale peut conduire à des excédents de chaleur inutilisables. Ces excédents dépendent de la surface relative de captage, c'est-à-dire de la surface de capteurs comparée aux besoins en eau chaude sanitaire.

Une installation solaire de production d'eau chaude sanitaire rentable et économique atteint un taux de couverture annuel de l'ordre de 50 à 60%. En d'autres mots, l'apport énergétique solaire couvre de 50 à 60 % des besoins annuels pour la production d'eau chaude. Dans ce cas, l'installation solaire réduit donc de 50 à 60% la consommation d'énergies conventionnelles non renouvelables. Pendant les mois d'été, pratiquement 100 % des besoins sont couverts par le solaire, alors qu'en hiver, le taux de couverture se situe aux alentours des 30 %.

La première étape du dimensionnement d'une installation consiste à déterminer les besoins en eau chaude sanitaire du ménage.

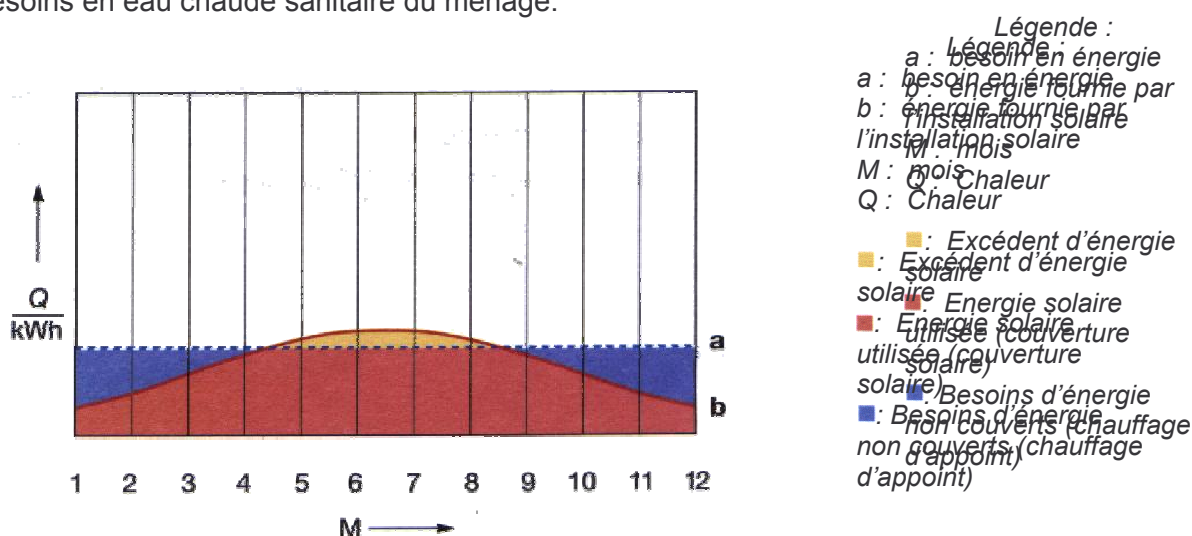


Figure 6 : Energie fournie par une installation à capteur solaire par rapport aux besoins annuels d'énergie pour la production d'eau chaude sanitaire

8.2 Détermination de la consommation d'eau chaude

8.2.1 Consommation en eau chaude sanitaire

La consommation d'eau chaude varie fortement d'un ménage à l'autre suivant le nombre de personnes et la fréquence des douches et bains. L'expérience montre que les consommations journalières peuvent varier d'une trentaine de litres à plus de quatre cents litres par ménage et sont donc essentiellement fonction du standing du consommateur et des habitudes de vie.

Les boilers sont choisis en fonction du volume utilisé et de la température maximale requise. Une température de 45°C convient habituellement pour le sanitaire, tandis que pour les besoins d'entretien ménager (vaisselle, nettoyage) la température nécessaire est plutôt de 50 à 60°C. Les boilers solaires sont configurés pour délivrer des températures maximales de 80 à 90°C.

Il y a avantage à utiliser l'eau à la température la plus basse possible de manière à valoriser au maximum la part préchauffée par le solaire.

La consommation en eau chaude sanitaire du ménage est nécessaire pour déterminer les besoins journaliers. Voici deux méthodes permettant de déterminer celle-ci :

- a. A la grosse louche : à l'aide de moyennes obtenues en tenant compte du profil du consommateur :

	Faible consommateur	Consommateur moyen	Consommateur important
Quantité (l) par personne par jour à 45°C	20-35	35-60	60-85

- b. De manière sûre : en plaçant un compteur d'eau (appelé compteur volumétrique) à l'entrée ou à la sortie du boiler de manière à déterminer de façon exacte la consommation d'eau chaude en effectuant des relevés sur une certaine période.

Il n'y a nul doute que la deuxième méthode est la plus sûre mais nécessite un peu de travail (insérer le compteur d'eau volumétrique au travers de la conduite) et coûte environ 30 €.

8.3 Détermination de l'inclinaison et de l'orientation du capteur

Pour une exploitation optimale du rayonnement solaire, la surface de captage devrait toujours être orientée autant que possible perpendiculairement au rayonnement. Toutefois comme la position du soleil par rapport à la terre varie continuellement au cours d'une journée et d'une année, l'angle d'incidence du rayonnement sur le capteur fixe varie également.

8.3.1 Influence de l'inclinaison et l'orientation

L'inclinaison de référence est l'horizontale et l'orientation de référence, le Sud. La figure 7 présente pour un capteur l'évolution, sur nos latitudes, de la constante solaire en fonction de l'orientation et de l'inclinaison de la surface.

Les écart de rayonnement solaire annuel incident sont de l'ordre de 30 % entre une surface la mieux et la moins bien placée.

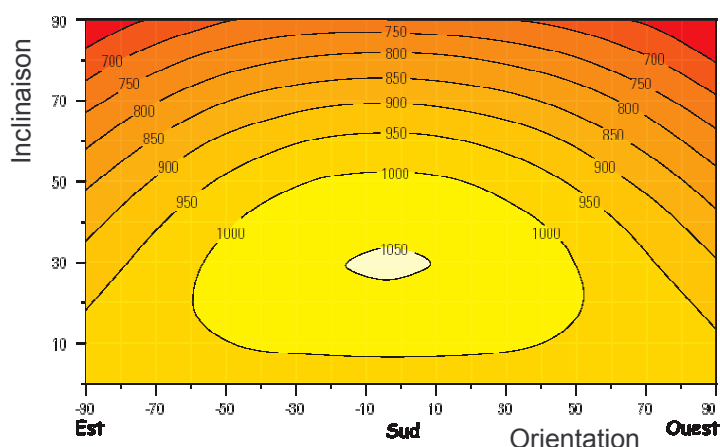


Figure 7 : Influence de l'inclinaison et l'orientation

L'inclinaison optimale est de 45° mais, il est à noter qu'il n'est peut être pas toujours intéressant de choisir cette inclinaison optimale de 45° car on sait qu'en été on aura souvent trop de production solaire et trop peu en hiver. Si l'on surdimensionne l'installation, il serait peut-être intéressant de privilégier une inclinaison plus forte (50-60°) de manière à augmenter la production solaire en hiver sans pour autant pénaliser la production estivale habituellement excédentaire.

8.3.2 Influence de l'ombre

Bien des éléments (bâtiments, arbres, ligne d'horizon, montagnes, etc.) peuvent porter de l'ombre sur la surface des capteurs. Avant d'en définir l'emplacement il faut donc prêter attention aux éventuelles ombres portées, qui pourraient influencer le gain solaire.

8.4 Détermination de la surface des capteurs solaires

Avant de déterminer la surface de collecteur nécessaire à installer pour produire l'eau chaude sanitaire, il est indispensable de parler du taux de couverture solaire.

8.4.1 La couverture solaire

La couverture solaire, exprimée en pourcentage, représente la part d'eau chaude sanitaire qui sera effectivement produite grâce à l'énergie solaire en moyenne sur l'année :

$$\text{Couverture_Solaire_(\%)} = \frac{\text{énergie_effective_produite_par_les_capteurs_}(kWh/an)}{\text{énergie_nécessaire_pour_l'eau_chaude_}(kWh/an)} \cdot 100$$

L'énergie effective produite par les capteurs est égale à l'énergie théorique nécessaire pour chauffer l'eau chaude du ménage moins l'énergie d'appoint apportée pour chauffer cette eau.

Exemple : Si les besoins annuels en eau chaude d'un ménage représentent 2000 kWh et que l'énergie fournie annuellement par l'appoint est de 1000 kWh, on dira que la couverture solaire est de $(2000-1000)/2000 = 0,5 \rightarrow 50\%$

Bien évidemment, il y a une couverture solaire optimale pour une installation, car plus on va vouloir un taux de couverture important, plus la surface de capteurs nécessaire sera grande, plus le prix de l'installation sera important. Habituellement, cette couverture optimale est de l'ordre de 50 à 60 % tout en veillant à couvrir 100% des besoins en eau chaude sanitaire avec le soleil pendant les périodes où la chaudière n'est pas en fonctionnement pour chauffer la maison.

8.4.2 Surface de capteurs nécessaire

On part de l'apport énergétique journalier (kWh par jour) nécessaire pour chauffer l'eau chaude obtenu par :

$$Q_j = C_j \cdot 0,00116 \cdot (t_c - t_f) \quad (II.1)$$

Avec :

- Q_j : apport énergétique journalier nécessaire (kWh par jour)
- C_j : consommation en eau chaude sanitaire par jour (l/jour)
- 0,00116 : coefficient d'équivalence de la chaleur spécifique de l'eau (kWh/(kg.K))
- t_c : température de l'eau chaude (K)
- t_f : température de l'eau froide (K)

Exemple : Soit un ménage consommant 160 litres d'eau à 45°C (318 K) par jour, réalisant actuellement son eau chaude sanitaire via une chaudière au mazout. La température de l'eau froide est de 10°C (283 K) et le rendement de la chaudière de 60%. En installant un chauffe-eau solaire, ils souhaitent obtenir une couverture solaire de 55% en considérant un rendement de l'installation de 30%. L'orientation de la toiture (32° vers l'est) nécessite un coefficient correcteur de 1,09 et l'inclinaison (32°) un coefficient correcteur de 1,04. On considérera également une perte des tuyauteries de 5%

$$Q_j = 160 \cdot 0,00116 \cdot (318 - 283) = 6,5 \text{ kWh par jour}$$

On obtient facilement l'apport énergétique annuel nécessaire pour chauffer l'eau sanitaire Q_a (kWh par an) en multipliant Q_j par 365 :

$$Q_a = Q_j \cdot 365 \quad (II.2)$$

Exemple : $Q_a = 6,5 \cdot 365 = 2371,04 \text{ kWh par an}$

En multipliant ce facteur par un coefficient de pertes de l'installation, fonction de la longueur, de la nature et de l'isolation des tuyauteries (de 1 : pas de pertes, à 1,3 : beaucoup de pertes), on obtient l'apport annuel effectif Q_{eff} (kWh par an) pour chauffer l'eau sanitaire.

$$Q_{eff} = Q_a \cdot (\text{coeff}_{pertes}) \quad (II.3)$$

Exemple : $Q_{eff} = 2371,04 \cdot 1,05 = 2489,59 \text{ kWh par an}$

En sachant que l'on veut une couverture solaire de C_s %, on obtient l'énergie à fournir par le chauffe-eau solaire Q_{coll} (kWh par an) :

$$Q_{coll} = Q_{eff} \cdot C_s / 100 \quad (II.4)$$

Exemple : $Q_{coll} = 2489,59 \cdot \frac{55}{100} = 1369,28 \text{ kWh par an}$

Or on sait que sur les 1000 kWh annuels de rayonnement solaire dans nos régions, les meilleurs capteurs arrivent maintenant à en convertir environ 500 kWh par an en chaleur (cette valeur est souvent donnée par les fournisseurs de panneaux solaires), on obtient donc un rendement des capteurs solaires de 50%. En tenant compte encore du rendement de l'échangeur de chaleur au niveau du boiler et des pertes dues aux conduites, on obtient un rendement global de l'installation de 30 à 40% (η_{inst}). En divisant Q_{coll} par le rendement de l'installation, on obtient Q_{tot} (kWh par an) représentant l'énergie solaire totale à capter par an.

$$Q_{tot} = Q_{coll} / \eta_{inst} \quad (11.51)$$

Exemple : $Q_{tot} = \frac{1369,28}{30} = 4564,25 \text{ kWh par an}$

En tenant compte de l'énergie surfacique disponible $E_{solaire}$ sous nos latitudes, qui est approximativement de 1000 kWh/m² par an, on obtient la superficie de capteurs théorique $S_{théo}$ (m²) à installer afin de satisfaire les besoins :

$$S_{théo} = \frac{Q_{tot}}{E_{solaire}} \quad (11.5)$$

Exemple : $S_{théo} = \frac{4564,25}{1000} = 4,6 \text{ m}^2$

Cette surface théorique étant définie pour des capteurs installés plein Sud et inclinés à 45°, il faut tenir compte de l'orientation et de l'inclinaison des capteurs en multipliant $S_{théo}$ par les coefficients de correction, fonctions de l'orientation (k_{or}) et de l'inclinaison (k_{incl}). On obtient donc la surface effective S_{eff} de capteurs solaires à installer (m²) :

$$S_{eff} = S_{théo} \cdot k_{or} \cdot k_{incl} \quad (11.6)$$

Exemple : Avec $k_{or}=1,09$ et $k_{incl}=1,04$: $S_{eff} = 4,6 * 1,09 * 1,04 = 5,2 \text{ m}^2$

En ayant la surface effective, il n'y a plus qu'à se renseigner auprès des fournisseurs afin de connaître la dimension des capteurs commercialisés et en fonction de la surface d'un capteur, déterminer le nombre de capteurs à installer.

8.5 Détermination du volume de stockage

Il n'est pas toujours avantageux d'augmenter la surface de capteurs si le réservoir de stockage est trop petit. A l'inverse, un réservoir trop volumineux perd plus de chaleur et est très long à réchauffer.

En pratique sous nos climats, on admet un volume de stockage de 50 à 80 litres par m² de surface de capteurs et de 1,3 à 1,7 fois la consommation en eau chaude sanitaire journalière du ménage.

8.6 Le dimensionnement 'optimum'

Le dimensionnement de la surface de capteurs et du volume du boiler à installer est très difficile du fait du nombre élevé de paramètres. Néanmoins, certains critères sont importants à prendre en compte lors du dimensionnement :

- obtenir une couverture solaire de l'ordre de 50% annuellement, mais de 100% du mois de mai-juin à septembre-octobre afin qu'il ne soit pas nécessaire de faire d'appoint durant ces périodes et donc éviter de démarrer une chaudière à l'arrêt pour le chauffage de la maison.
- tenir compte des équipements « standards » existant sur le marché belge.

Dans le dimensionnement d'une installation solaire, il est aussi important de tenir compte de la possible évolution du ménage (nombre d'enfants au domicile,...) et de la possibilité de raccorder le lave-vaisselle et la machine à lessiver au boiler. Ces deux appareils fonctionneront à coût réduit car la principale source de consommation énergétique est due à la résistante électrique présente pour chauffer l'eau nécessaire au lavage.

8.7 Bilan écologique

L'économie réalisée grâce à l'installation de panneaux solaires est présente sous forme d'une économie financière annuelle après la période d'investissement (habituellement de 10 à 20 ans), mais tout aussi importante au niveau de l'environnement en terme d'économie de CO₂, NO_x et SO₂.

En terme d'économie de rejets de CO₂, une installation solaire a domicile permet d'économiser 500 à 600 kg de CO₂ par an.

8.8 Bilan économique :

Cette méthode présentée est basée sur la comparaison du coût du kWh solaire (en fonction du type d'installation et de la superficie de capteurs solaires installée) avec le prix du kWh des autres énergies classiques (gaz naturel, mazout, électricité).

En ne considérant que le montant de l'investissement de l'installation d'un chauffe-eau solaire (CES) et en le divisant par la durée de vie minimum du CES (ici 25 ans), on obtient une valeur exprimée en euros par kWh représentant le « coût du kWh solaire ». Par la suite, il est facile de comparer cette valeur aux prix des énergies classiques.

Le tableau ci-dessous présente cette comparaison pour une installation de 5 m² de capteurs solaires avec un boiler de 300 litres en fonction du degré de primes obtenues :

Hypothèses : Consommation d'eau chaude (45°C) de 45 litres par personne et par jour
Fraction solaire utile de 55 %

	Coût du chauffe-eau solaire (primes déduites) (€)	Economie d'énergie annuelle* (kWh/an)	Coût du solaire (centimes d'€/kWh)	Coût actuel du Gaz Naturel** (centimes d'€/kWh)	Coût actuel du mazout*** (centimes d'€/kWh)	Coût actuel de l'électricité**** (centimes d'€/kWh)
Primes min.	2350	2200	4,27	3,36	3,02	6,28
Primes max.	1110	2200	2,02	3,36	3,02	6,28

- * Rendement d'exploitation annuel du chauffage d'appoint de 75 % inclus
- ** Domestique, Tarif B, (10/06/03)
- *** Livraison min 2000 l, (10/06/03)
- **** Basse tension en heures creuses = 0,0837 €/kWh (10/06/03) mais ici plus question de tenir compte du rendement de l'appoint de 75% → 0,0837*0,75 = 0,0628 €/kWh

9 Résumé des valeurs caractéristiques d'une installation solaire

Ce résumé des différentes caractéristiques se veut comme une aide à la lecture des prospectus distribués par les fournisseurs de panneaux solaires.

Coefficient	Désignation	Valeur	Optimum	Fréquent	Unité
CAPTEUR					
α	Coefficient d'absorption de l'absorbeur	0 à 1	1	0,95	-
ε	Coefficient d'émission de l'absorbeur	0 à 1	0	0,03	-
ζ	Taux de transmission du vitrage	0 à 1	1	0,92	-
k_{θ}	Facteur correctif fonction de l'inclinaison du capteur	0 à 1	1	0,95	
CAPTEUR PLAN					
η	Rendement du capteur	0 à 100	100	50	%
η_0	Rendement optique du capteur solaire	0 à 100	100	80	%
U_m	Coefficient global des pertes thermiques	0 à 10	0	3,5	W/m²K
a_1 (pfs k_1)	Coefficient des pertes thermiques par conduction et convection	0 à 10	0	3,5	W/m²K
a_2 (pfs k_2)	Coefficient des pertes thermiques par rayonnement	0 à 1	0	0,01	W/m²K²
F'	Coefficient de transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide	0 à 1	1	0,92	
	Température de stagnation en laboratoire	0 à 300	300	200	°C
	Rendement annuel du capteur obtenu en laboratoire	0 à 1000	1000	500	kWh/m² sur 1 an
CAPTEUR SOUS-VIDE					
η	Rendement du capteur	0 à 100	100	60	%
η_0	Rendement optique du capteur solaire	0 à 100	100	75	%
U_m	Coefficient global des pertes thermiques	0 à 10	0	1,5	W/m²K
a_1 (pfs k_1)	Coefficient des pertes thermiques par conduction et convection	0 à 10	0	1,5	W/m²K
a_2 (pfs k_2)	Coefficient des pertes thermiques par rayonnement	0 à 1	0	0,005	W/m²K²
F'	Coefficient de transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide	0 à 1	1	0,92	
	Rendement annuel du capteur obtenu en laboratoire	0 à 1000	1000	700	kWh/m² sur 1 an
BOILER					
	Déperditions thermiques fonction de la nature et épaisseur de l'isolant	0 à 10	0	2	°C/24h
		0 à 5	0	2	KWh sur 24h

REGULATION					
	Possibilité de réglage du Δt de démarrage				
COMPTEUR D'ENERGIE					
	Puissance instantanée récupérée				W
	Energie solaire récupérée				Wh
DIVERS					
G	Rayonnement solaire incident			1000	KWh/m ² par an
	Rendement global de l'installation solaire	0 à 100	100	30-40	%