

CHAPITRE II

CONVERSION THERMIQUE DE L'ENERGIE SOLAIRE

1 - Le solaire thermique

L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des turboalternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que le rayonnement lui-même.

La conversion photothermique se fait à l'aide de collecteurs thermiques qui consistent en une transformation directe du rayonnement solaire en chaleur, comme le chauffage domestique, les cuisines solaires, la chaleur pour des processus industriels. Elle se fait selon deux manières une captation avec concentration et sans concentration.

2- Quelques notions sur les centrales à concentration solaire

La technologie des Centrales à Concentration Solaire (CCS) utilise des miroirs pour concentrer le rayonnement solaire pour en faire la conversion en électricité via des processus thermodynamiques. Une centrale thermique solaire se compose généralement d'un champ solaire et d'un bloc de puissance, et optionnellement d'un système de stockage, voir Figure 1. Le bloc de puissance est une installation thermique de production d'électricité qui fonctionne selon des cycles thermodynamiques conventionnels, turbines à gaz, turbine à vapeur, cycle combiné, moteur Stirling, etc. Le champ solaire est un regroupement de plusieurs capteurs solaires. Un capteur solaire se compose d'un miroir collecteur-concentrateur et un receveur ou absorbeur dans lequel circule un fluide caloporteur.

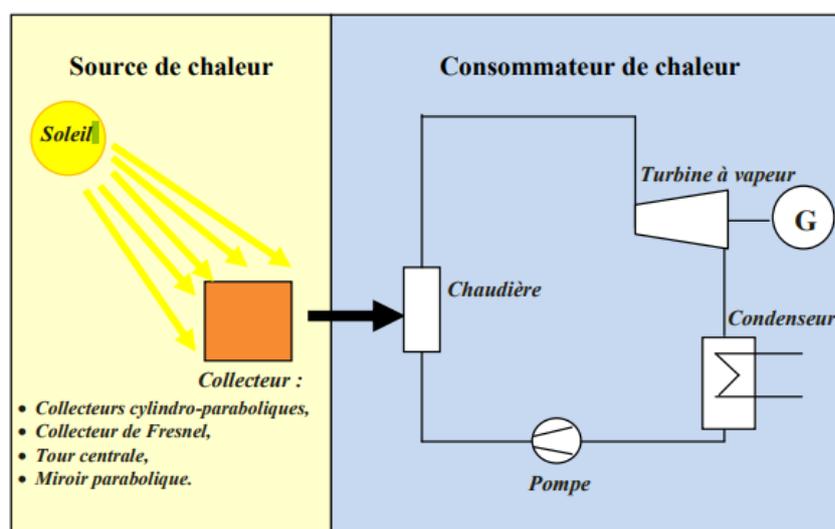


Figure-1: Principe de fonctionnement d'une centrale thermique solaire.

Un atout majeur de l'énergie solaire thermodynamique par rapport au solaire PV est sa capacité de stockage. Le stockage constitue un aspect important des centrales solaires, Figure -2. Il permet de rendre la production d'électricité constante et indépendante de la disponibilité du rayonnement solaire. En effet, lorsque l'ensoleillement est supérieur aux capacités du bloc de puissance, la chaleur en surplus est dirigée vers un stockage thermique, qui se remplit au cours de la journée. La chaleur emmagasinée permet de continuer à produire en cas de passage nuageux ainsi qu'à la tombée de la nuit.

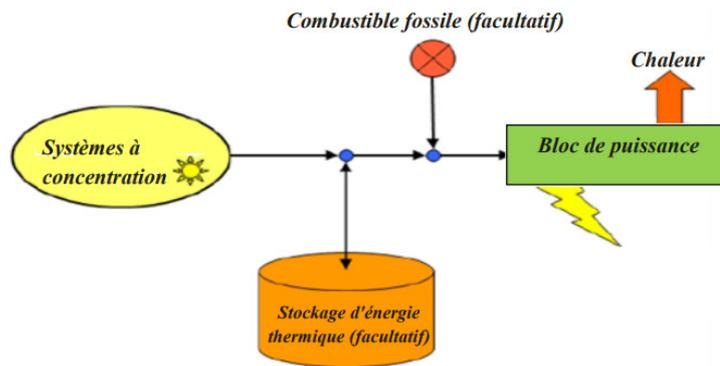


Figure -2 : Concept d'intégration d'un système de stockage thermique dans une centrale solaire.

Les miroirs ne peuvent concentrer que la composante directe du rayonnement solaire, tandis que la composante diffuse ne peut se concentrer. La technologie CCS requiert des ciex clairs, qui sont généralement trouvés dans les régions semi-arides et chaudes. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement est concentré en un point, Figure 3, ou en une ligne (récepteur), Figure 4, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur à haute température.

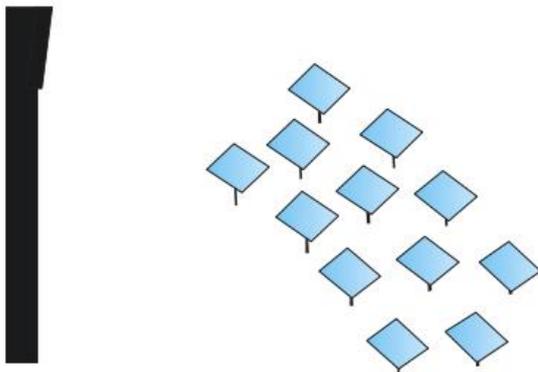


Figure -3 : Concentration solaire ponctuelle.

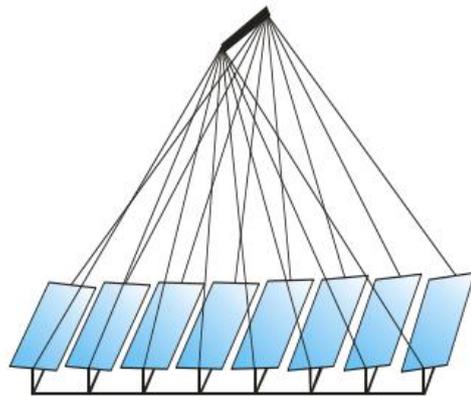


Figure-4: Concentration solaire linéaire.

L'intensité de la concentration est évaluée par le facteur de concentration. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels. Selon Figure 5 ce facteur est défini comme suit :

$$\text{facteur de concentration} = \frac{\text{surface du miroir}}{\text{surface du récepteur}}$$

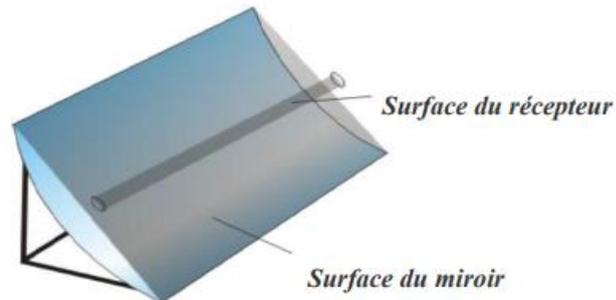


Figure 5 : Facteur de concentration

La conversion d'énergie solaire en électricité se fait comme suit. La liaison entre le champ solaire et le bloc de puissance se fait par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur entre le fluide caloporteur et le fluide thermodynamique. Le fluide caloporteur circule dans le champ solaire et il est chargé de transporter la chaleur entre le champ solaire et le bloc de puissance. Le fluide thermodynamique circule dans le bloc de puissance, il convertit la chaleur cédée par le fluide caloporteur en électricité en actionnant les machines (moteurs, turbines,...). En effet, dans le champ solaire, chaque collecteur capte et concentre le rayonnement solaire dans le receveur. Dans ce dernier le fluide caloporteur absorbe le rayonnement solaire et le convertit en énergie thermique. Ensuite, le fluide caloporteur transporte et cède cette énergie au fluide thermodynamique qui à son tour la transporte vers le bloc de puissance où il la convertit en fin de compte en électricité. Il existe une variété de formes de miroirs et plusieurs types de fluides caloporteurs, il existe des différents schémas et combinaisons thermodynamiques pour convertir l'énergie solaire en électricité.

3 -Fluides caloporteurs

On distingue différents types de fluides utilisés :

- **Sels fondus** : mélanges binaires ou ternaires de nitrate (ou nitrite) de sodium/potassium qui permettent un stockage intermédiaire si la température de sortie du fluide caloporteur se situe au-dessus de 350°C, généralement autour de 500°C. Ils peuvent devenir fluides caloporteurs dans les centrales à tours.
- **Huiles thermiques** (huile synthétique): fluide caloporteur utilisé dans les capteurs cylindro-paraboliques (400°C).
- **Fluides organiques** à basse température d'évaporation (butane, propane,...), utilisés dans les cycles à basse température.
- **Eau et vapeur d'eau** : utilisées soit comme fluide thermodynamique soit comme fluide caloporteur et thermodynamique (génération directe de vapeur).
- **Gaz** (Hydrogène, Hélium) : entraîne un moteur thermique placé au foyer d'une coupole parabolique.

- **Air** : utilisé soit comme caloporteur, soit comme fluide thermodynamique dans une turbine à gaz, le récepteur remplaçant la combustion comme source chaude.

3-1 Température maximale du fluide caloporteur

D'un point de vue thermodynamique, plus la température du fluide caloporteur à la sortie du champ solaire est élevée, plus est grand le rendement de la conversion solaire/électricité. Cependant, il y'a une contrainte qui limite la température de fonctionnement d'un fluide caloporteur, c'est sa stabilité thermique. A haute température, les propriétés thermophysiques du fluide se dégradent et de ce fait il perd ses qualités comme fluide caloporteur. Il reste le fait que les pertes de chaleur par convection, conduction et rayonnement augmentent considérablement avec l'augmentation de la température.

4- Collecteurs solaires

Il existe quatre principales technologies de collecteurs solaires, en occurrence, miroir cylindro-parabolique, miroir de Fresnel, miroir parabolique, et miroirs pour tour solaire.

4.1 Collecteurs cylindro-paraboliques

Le champ solaire se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal, dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température atteint en général 400°C. Ce fluide est ensuite pompé vers le bloc de puissance à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou un générateur électrique. Le facteur de concentration peut aller jusqu'à 100.

Les collecteurs cylindro-paraboliques représentent la technologie la plus mature et ils sont présents dans la plus grande partie des projets en cours. Le rendement moyen annuel de la conversion solaire-électricité peut atteindre 15% , voir Figure 6.

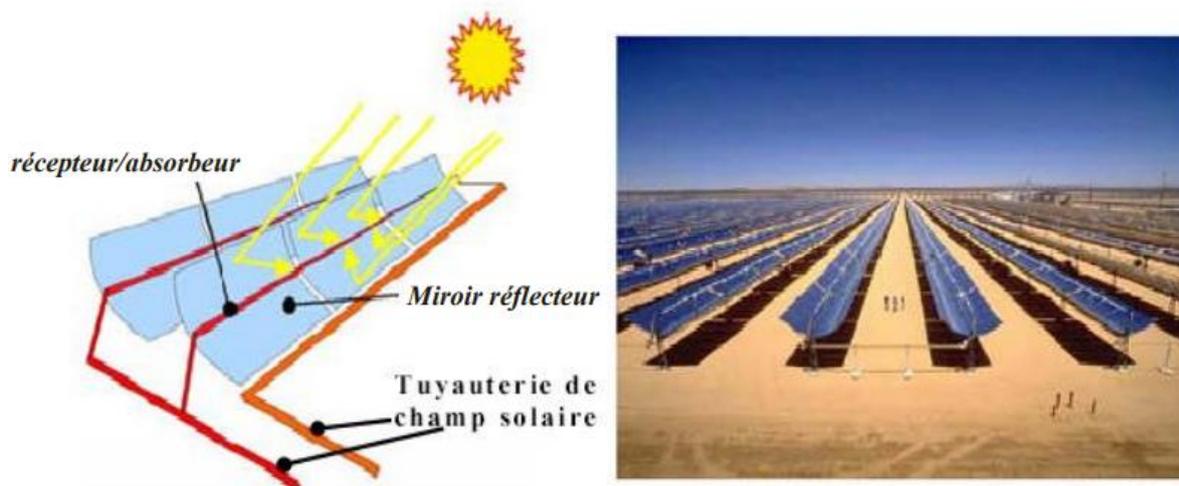


Figure 6 : Collecteur cylindro-parabolique.

4.2 Collecteur de Fresnel

Le principe d'un concentrateur de Fresnel réside dans ses miroirs plans (plats) dits réflecteurs compacts linéaires, Figure 7. Le facteur de concentration peut dépasser 100. Chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube absorbeur. Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes. En circulant dans ce récepteur horizontal, le fluide caloporteur peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500 °C. De ce fait, la vapeur est générée directement dans les tubes récepteurs. La vapeur alors produite est dirigée vers le bloc de puissance pour actionner une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur. En effet, en ce moment ce type de collecteur fait l'objet d'intensive activité de recherche pour permettre la génération directe de la vapeur dans le champ solaire. Ainsi, dans toute la centrale thermique un seul fluide circule, dans le champ solaire et dans le bloc de puissance. Principal avantage de cette technologie, les miroirs plats sont bien meilleur marché que les miroirs paraboliques. Les coûts d'investissement par zone miroir sont plus faibles, mais le rendement annuel reste inférieur à 10%.

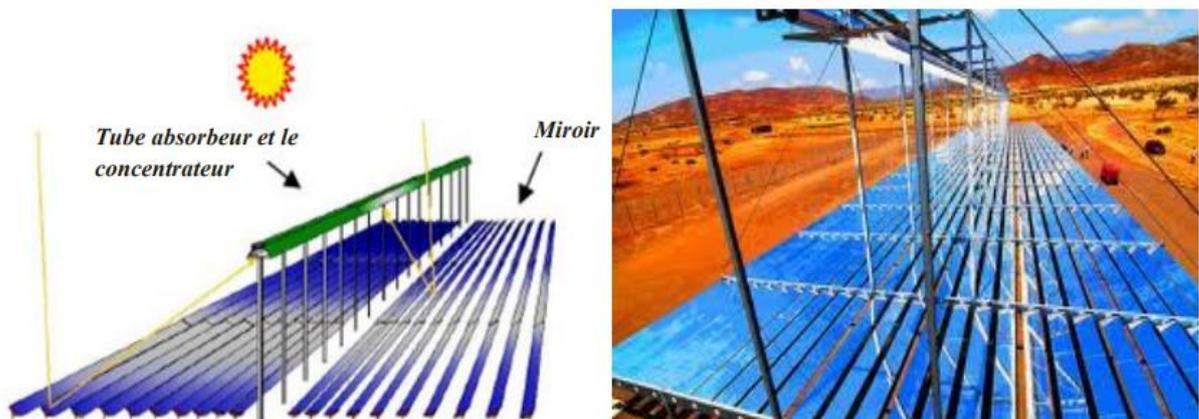


Figure 7 : Collecteur de Fresnel.

4.3 Système de centrale à tour (héliostat)

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers un point situé au sommet d'une tour, Figure 8. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 °C à 1000 °C et grandes efficacités que le système linéaire. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée à un fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines. Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité. Les tours peuvent générer de la

vapeur saturée ou surchauffée directement, ou utiliser de l'air ou d'autres fluides de transfert de chaleur.

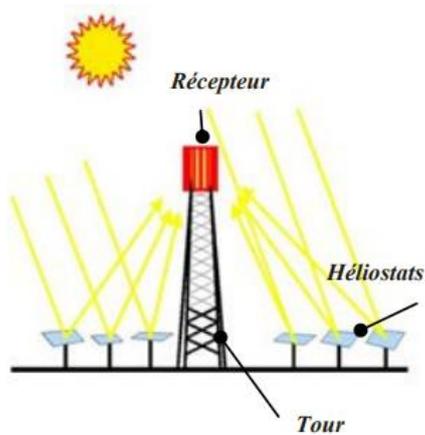


Figure 8 : Tour solaire.

4.4 Miroir parabolique (Dish-Stirling)

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes afin de réfléchir et de concentrer les rayons du soleil vers un point de convergence appelé foyer, Figure 9. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui dont la température monte sous l'effet de la concentration. Cela entraîne un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité. Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000°C. Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Pour ce type de système, le stockage n'est pas possible, et il n'y a nécessité d'eau de refroidissement.

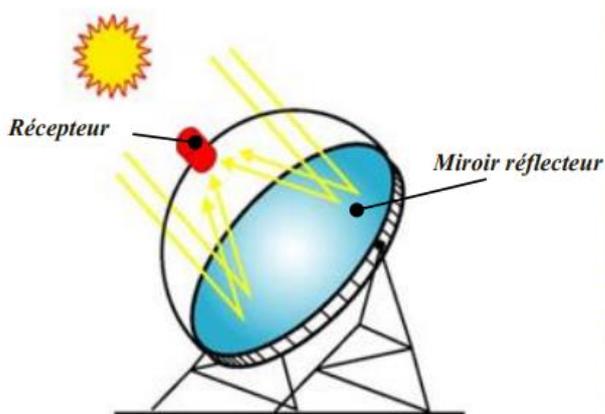


Figure -9 : Miroir parabolique.

5. Les capteurs solaires plans

Le rayonnement solaire peut être transformé en chaleur à basse température, par des capteurs plans utilisant conjointement l'absorbeur, surface sélective et l'effet de serre créé par le vitrage, ces capteurs ont l'avantage d'utiliser aussi bien les rayons directs du soleil que les rayons diffusés, c'est-à-dire que même par temps couvert, le liquide caloporteur de capteur parvient à s'échauffer. L'autre avantage est qu'il n'est pas nécessaire d'orienter le capteur suivant le soleil.

Les composants d'un capteur

Un capteur solaire plan est généralement composé d'un coffre, d'un vitrage, d'une isolation, d'un absorbeur et de tubes permettant le passage du fluide caloporteur.

Les absorbeurs

L'absorbeur est l'un des éléments les plus importants d'un capteur thermique; il convertit le rayonnement solaire en chaleur.

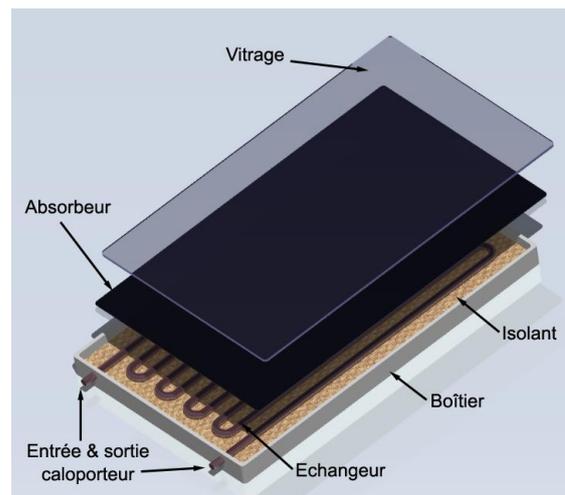


Figure 10 : Capteur plan

L'absorbeur se caractérise par deux paramètres:

- le **facteur d'absorption** solaire α^* (ou absorptivité): le rapport du rayonnement lumineux absorbé par le rayonnement lumineux incident;
- le **facteur d'émission** infrarouge ϵ (ou émissivité): le rapport entre l'énergie rayonnée dans l'infrarouge lorsque l'absorbeur est chaud et celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température.

Dans les applications de chauffage solaire, on cherche à obtenir le meilleur rapport facteur d'absorption solaire / facteur d'émission infrarouge. Ce rapport est appelé **sélectivité**.

Le matériau constituant l'absorbeur est en règle général en cuivre ou aluminium mais aussi parfois en matière plastique. Afin d'obtenir un meilleur rendement, certains systèmes sont donc constitués d'un revêtement particulier.

Les fluides caloporteurs

Le fluide caloporteur (ou *caloripporteur*) permet d'évacuer la chaleur emmagasinée par l'absorbeur et de la transmettre vers là où elle doit être consommée. Un bon fluide caloporteur doit prendre en compte les conditions suivantes:

- être chimiquement stable lorsqu'il atteint une forte température, en particulier lors de la stagnation du capteur;
- posséder des propriétés antigel en corrélation avec les conditions météorologiques locales;
- posséder des propriétés anticorrosives selon la nature des matériaux présents dans le circuit capteur;
- posséder une chaleur spécifique et une conductivité thermique élevées afin de transporter efficacement la chaleur;
- être non-toxique et avoir un faible impact sur l'environnement;
- avoir une basse viscosité afin de faciliter la tâche de la pompe de circulation;
- être facilement disponible et bon marché

Le vitrage

Le vitrage permet de protéger l'intérieur du capteur contre les effets de l'environnement et d'améliorer le rendement du système par effet de serre.

Les vitrages utilisés pour les capteurs thermiques sont à base de verre non-ferrugineux ou en verre acrylique, et souvent dotés d'un revêtement anti-reflet.

Les isolants thermiques

L'isolant thermique permet de limiter les déperditions thermiques, sa caractéristique est le coefficient de conductivité; plus il est faible meilleur est l'isolant. Les principaux matériaux utilisés pour les capteurs thermiques sont la laine de roche et de verre, des mousses de polyuréthane ou encore de la résine de mélamine. On retrouve parfois des isolants plus naturels.

6. Le stockage de la chaleur solaire.

On présente ici quelques schémas thermodynamiques d'intégration de l'énergie solaire dans les centrales thermiques.

Centrale solaire avec stockage thermique

Dans cet exemple, voir Figure 11, le champ solaire est connecté à une turbine à vapeur. Les collecteurs sont du type cylindro-parabolique. Il y'a trois fluides qui circulent dans cette centrale. Le fluide caloporteur (huile synthétique), le fluide thermodynamique (eau), et le fluide de stockage (sel fondu). En mode de jour, quand il y'a un surplus d'énergie thermique par rapport à la capacité de la turbine à vapeur, le fluide caloporteur le cède au fluide de stockage qui se déplace ainsi du réservoir 'froid' et remplit le réservoir 'chaud'. En mode de nuit, le réservoir 'chaud', rempli de sel fondu chaud, devient la source de production de la vapeur et ainsi d'électricité.

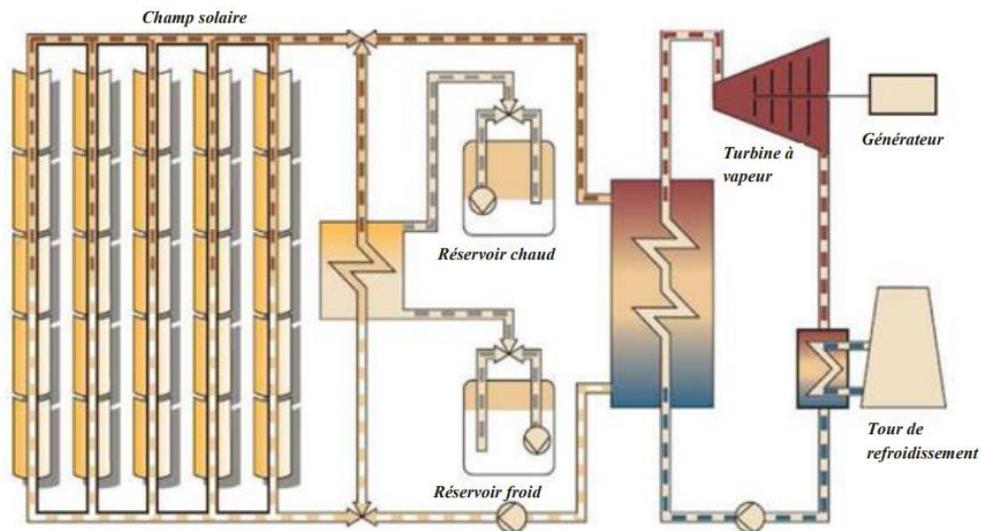


Figure 11: Centrale solaire avec stockage thermique.

Systeme solaire intégré dans une centrale à cycle combiné

Le concept est basé sur l'intégration d'un champ solaire à une centrale à cycle combiné, voir Figure 12. Il est appliqué surtout pour la production de grandes puissances. La vapeur générée par le champ solaire est introduite dans le cycle eau-vapeur de la centrale à cycle combiné, ce qui augmente la puissance de la turbine à vapeur et crée des mégawatts d'électricité supplémentaires sans utiliser de gaz naturel additionnel. Ce genre de centrale n'a pas besoin de système de stockage. En mode de nuit la centrale fonctionne comme une centrale à cycle combiné conventionnel.

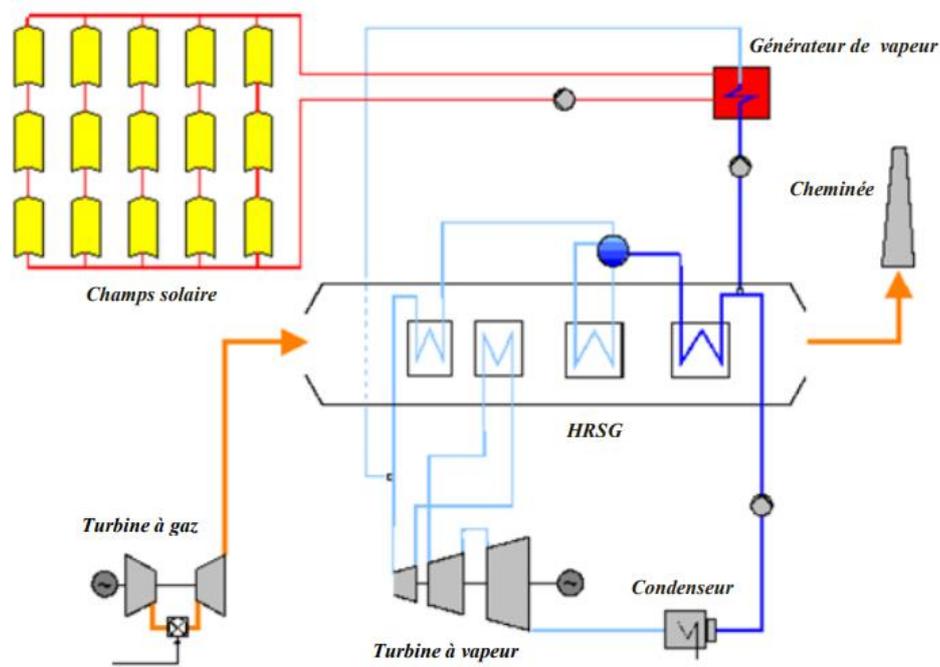


Figure 12 : Centrale solaire intégré à un cycle combiné.

7. Les applications de la conversion thermique solaire

Chauffage de l'eau sanitaire

Le chauffage de l'eau sanitaire est l'une des technologies solaires les plus accessibles aux particuliers. Le principe est simple: des capteurs thermiques transforment le rayonnement lumineux en chaleur. Le fluide caloporteur circule dans les capteurs thermiques et transporte la chaleur jusqu'à l'eau sanitaire stockée dans un ballon.

Chauffage de locaux

Le chauffage de locaux à partir de capteurs solaires n'est pas encore très développé même si l'évolution des normes d'isolation des bâtiments peuvent rendre cette technologie plus attractive. Le principal frein est que l'on a principalement besoin de chauffage en hiver, période durant laquelle l'ensoleillement est réduit. Il existe trois manières de chauffer un local par l'énergie solaire thermique: par des radiateurs conventionnels, par une ventilation à air chaud ou par un plancher chauffant.

Systèmes combinés eau chaude + chauffage

Les systèmes combinés eau chaude + chauffage ont l'avantage d'utiliser les mêmes types de capteurs thermiques. Un fluide caloporteur est chauffé dans ces capteurs puis transmet la chaleur jusqu'au système de stockage. La grande différence entre l'eau utilisée pour l'eau chaude et celle pour le chauffage est qu'elles n'ont pas la même température. Il existe deux grandes solutions à ce problème : le double système de stockage et le système de stockage combiné.

Un panneau solaire thermique a pour but de transmettre la chaleur émise par le soleil à un circuit d'eau secondaire. Les rayons du soleil traversent la vitre, à l'intérieur une plaque absorbante qui a pour but de capter les rayons infrarouges. Derrière cette plaque chaude passe un circuit d'eau qui récupère cette chaleur. Par la suite ce circuit alimente un circuit secondaire qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire ou en chauffage.

La circulation de l'eau peut se faire par simple phénomène physique, l'eau chaude est moins dense que l'eau froide. C'est pour cela que sur le schéma l'eau chaude est toujours au-dessus de l'eau froide, voir figure 13.

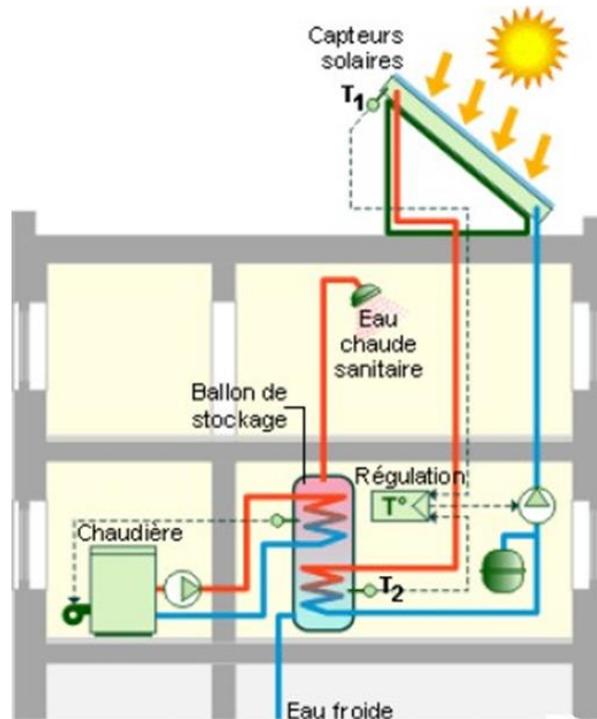


Figure 13 : Chauffe-eau solaire individuel avec chauffage d'appoint.

Les composants du chauffe-eau solaire de la figure 13, ainsi que du système intégré dans le bâtiment sont les suivants :

- Le capteur solaire qui servira à la transformation du rayonnement solaire en chaleur ;
- Le réservoir de stockage de la chaleur jusqu'au moment de l'utilisation ;

La boucle primaire qui aura pour objectif le transfert de chaleur entre le capteur et le réservoir

- Système de régulation du transfert de chaleur vers le réservoir (s'arrête quand température réservoir supérieure température capteur) ;
- La chaudière servira comme une énergie d'appoint lorsqu'il n'y aura pas assez de soleil.

Bien entendu, plusieurs systèmes permettent de chauffer l'eau sanitaire, avec pour chacun ses avantages et ses inconvénients

Les avantages

- Rendement élevé (jusqu'à 80%) ;
- Permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement, ce qui peut se révéler intéressant pour des collectivités qui voudraient maîtriser leurs dépenses telles que les piscines très énergivores ;
- Source d'énergie inépuisable ;
- Gros potentiel de développement.

Les inconvénients

- Généralement limité au chauffage de l'eau chaude sanitaire ;
- L'énergie solaire thermique reste une énergie coûteuse par rapport au chauffage par énergie fossile à cause d'investissements assez lourds
- Retour sur investissement assez long (en moyenne 10 à 15 ans)
- Durée de vie des panneaux généralement limitée à 20 ans
- Certains panneaux sont très sensibles et peuvent être endommagés par certaines conditions météorologiques (grêle, gel...).

Chauffage de l'eau de piscine

Le fonctionnement du chauffage solaire pour piscine : Comme son nom l'indique, une piscine à chauffage solaire utilise l'énergie solaire pour chauffer l'eau. Il est possible de gagner jusqu'à 5° sur la température de l'eau en utilisant ce type de chauffage. Ce n'est donc pas négligeable ! Ainsi, en utilisant uniquement le rayonnement solaire, il est possible de profiter de votre piscine plus longtemps.

Il faut savoir que le fonctionnement d'un chauffage solaire pour piscine est assez simple :

- L'eau qui passe dans le circuit de filtration est dérivée vers le système de chauffage solaire.
- Grâce à l'utilisation de capteurs solaires pour piscine, l'eau est filtrée puis chauffée
- Ensuite, elle est acheminée vers la piscine elle-même. De plus, l'eau peut-être chauffée par différents moyens tels que les dômes solaires ou la moquette solaire à placer devant sa piscine. Celle-ci passe dans un système de tuyaux, est réchauffée puis retourne dans le bassin. Par exemple, c'est un bon moyen de chauffage pour piscine hors sol. Le chauffe-eau solaire pour piscine est pratique et simple d'utilisation pour les piscines. Il se place généralement non loin de la piscine. Ceci permet d'éviter les déperditions de chaleur. L'installation d'un tel équipement renouvelable en énergie va donc être liée à la disposition du jardin. Dans tous les cas, le système de chauffage est branché sur le circuit d'eau, après la pompe à eau et le filtre.