

## ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE ET THERMODYNAMIQUE

### 1. GÉNÉRALITÉS

Le soleil est une gigantesque source d'énergie disponible en permanence : c'est un énorme « four » qui « brûle » de l'hydrogène depuis 4,6 milliards d'années. Quand les atomes d'hydrogène fusionnent, des atomes plus lourds se forment en libérant beaucoup d'énergie sous forme de rayonnement : c'est la fusion nucléaire. Le soleil est donc un immense réacteur nucléaire.

### 2. FILIÈRES D'EXPLOITATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Actuellement il existe 2 voies d'utilisation directe de l'énergie solaire :

- la transformation du rayonnement en chaleur
- la transformation du rayonnement en électricité

**Ces transformations ont permis le développement de 3 filières d'exploitation :**

- l'énergie solaire thermique : pour la chaleur, le froid et la production d'eau potable
- l'électricité solaire thermodynamique : pour l'électricité
- l'électricité solaire photovoltaïque : pour l'électricité (voir [fiche GAENA N° 28](#))

#### 2.1. ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE

Dans cette filière il y a plusieurs applications : le chauffage de l'eau sanitaire, le chauffage des locaux, le chauffage des piscines, la production de froid, la purification de l'eau.

L'objectif est ici de transformer en énergie calorifique les rayonnements photoniques solaires.

Pour cela on utilise des « capteurs thermiques » constitués de matériaux fortement absorbants. Ces capteurs absorbent les photons solaires et les transforment en chaleur qui est ensuite transportée vers un réservoir de stockage au moyen d'un liquide ou d'un gaz (appelé « caloporteur »).

##### Eau chaude et chauffage

De manière pratique le fonctionnement est le suivant : le rayonnement traverse une vitre qui laisse pénétrer la lumière et retient la chaleur (effet de serre, voir [fiche GAENA N°14](#)) et est capté par une surface absorbante.

La chaleur ainsi absorbée est ensuite récupérée grâce à un fluide caloporteur circulant sous la surface absorbante. La température du fluide peut alors atteindre 80°C, voire 100°C ; un matériau isolant thermiquement est placé à l'arrière de la surface absorbante pour limiter les pertes calorifiques.

Le caloporteur transmet la chaleur à un ballon d'eau chaude ou à un hydro-accumulateur (ballon tampon absorbeur d'énergie sous forme d'eau chaude) pour la production d'eau chaude sanitaire, ou à un plancher solaire pour le chauffage de la maison (le fluide caloporteur est alors injecté directement dans le plancher des bâtiments entre 25 et 30 °C).

Les développements technologiques en cours semblent ouvrir une voie prometteuse en associant trois fonctions dans le même capteur (en toit face sud) : couverture, production thermique et production électrique.

Quelques valeurs : Une surface de capteur de 4 m<sup>2</sup> suffit pour satisfaire les besoins en eau chaude de 4 personnes et 10 m<sup>2</sup> permettent le chauffage d'une maison sous nos climats. Cependant les appareillages actuellement disponibles sur le marché restent encore onéreux. Il faut espérer que le développement de cette technique conduise rapidement à un retour sur investissement de 2 à 3 ans.

### Production de froid

Pour la production de froid un fluide caloporteur enfermé dans des tubes absorbe la chaleur du rayonnement solaire captée par panneaux solaires, la chaleur est ensuite utilisée comme source chaude pour faire fonctionner une machine à absorption de chaleur.

Cette machine dissocie, par ébullition, une solution d'eau et de bromure de lithium. Après refroidissement la recombinaison des deux composants produit du froid par absorption de chaleur.

### Production d'eau potable

L'énergie solaire thermique a une autre application possible : la production d'eau potable dans les pays tropicaux ou subtropicaux à partir d'eau saumâtre, salée ou souillée.

Le principe est de distiller l'eau au moyen d'un distillateur solaire (puits solaire, boîte solaire, pyramide solaire) ; l'eau sous l'action du soleil s'évapore et se condense sur un support (film plastique, verre ...), l'eau ainsi distillée s'écoule vers un circuit de stockage.

## 2.2. ÉLECTRICITÉ SOLAIRE THERMODYNAMIQUE

L'énergie thermique du soleil permet aussi de produire de l'électricité par voie thermodynamique : la conversion de l'énergie solaire en électricité n'est pas directe mais passe par l'intermédiaire de centrales thermiques solaires de différents types.

Le principe de base utilisé, connu depuis l'antiquité, est l'obtention de température élevée par la concentration du rayonnement solaire, au moyen d'une grande quantité de miroirs réfléchissants (capteurs), en un seul foyer.

Cela rend possible le réchauffement de fluides caloporteurs à des températures allant de 250 à 1 000 °C, ces fluides transportent la chaleur vers un réservoir d'eau, il y a alors production de vapeur d'eau qui entraînera un turboalternateur pour produire de l'électricité comme dans les centrales thermiques conventionnelles.

Le fluide chauffé ayant une certaine inertie thermique la production d'électricité thermodynamique sera moins « saccadée » que la production photovoltaïque. De plus des systèmes de stockage dynamique de la chaleur peuvent être intégrés pour permettre une production d'électricité pendant plusieurs heures sans ensoleillement.

Il existe quatre types de centrales solaires thermodynamiques : les centrales à capteurs cylindro-paraboliques, les centrales à miroirs de Fresnel, les centrales à tour et les centrales à capteurs paraboliques.

### Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques

Ces centrales utilisent des miroirs cylindro-paraboliques de 100 à 800 m<sup>2</sup> (voir figure 1) qui concentrent les rayons du soleil sur des tubes placés à l'axe focal du concentrateur et dans lequel circule un fluide caloporteur.

Le Concentrateur suit la course du soleil en tournant sur un axe. Le fluide caloporteur (fluide de synthèse) chauffé lors du passage dans les tubes circule à travers une série d'échangeur de chaleur pour produire de la vapeur surchauffée (390 °C).

Un stockage thermique de plusieurs heures dans des sels fondus permet de mieux adapter la production à la demande et de produire de l'électricité en continu de jour et de nuit.

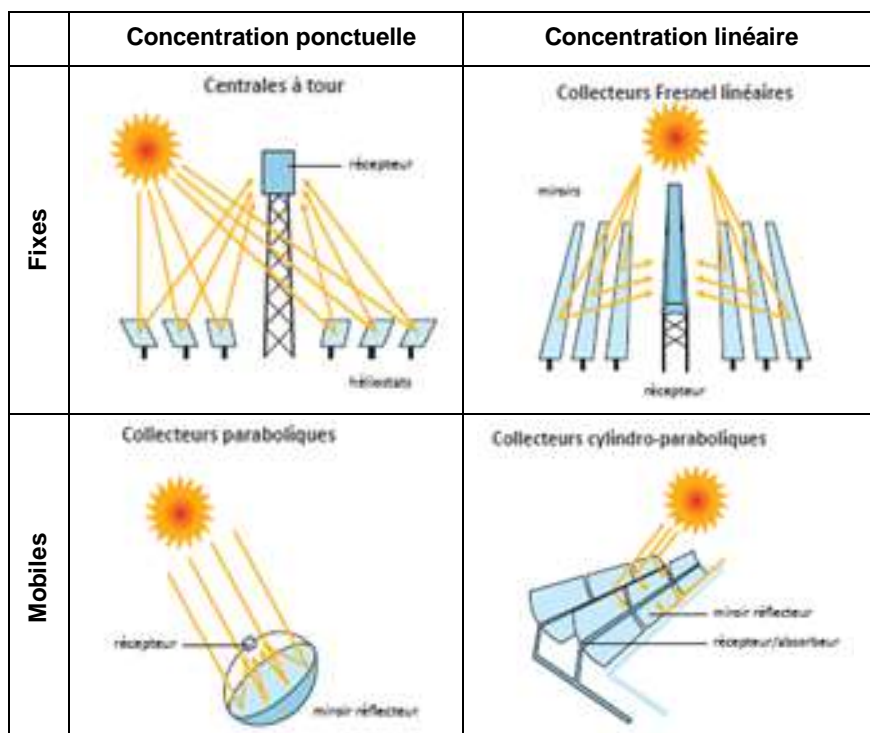
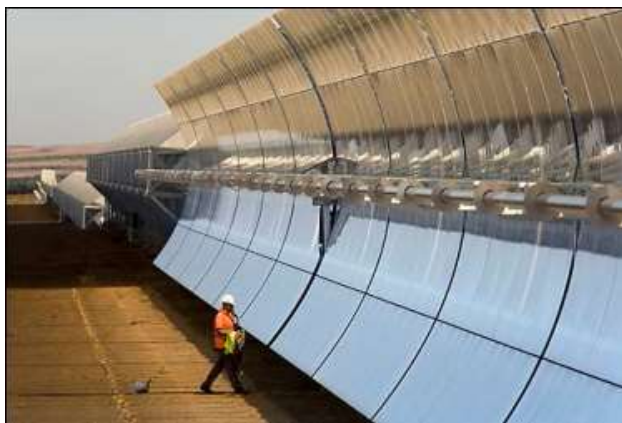


Figure 1 : Centrales à capteurs cylindro-paraboliques

Le rendement solaire-électrique maximal est d'environ 25 %. Ce type de centrale représente la majorité des centrales construites (une quarantaine dans le monde, spécialement en Espagne (centrale d'Andasol de Solnova (150 MW) formées chacune de 3 unités (50 MW) et aux USA, centrale de Solana (280 MW, octobre 2013) aucune en France).

En 2013, la centrale Shams1, implantée à Abou Dhabi a commencé à fonctionner elle a une capacité de 100 MW et ses 25 8048 miroirs paraboliques s'étendent sur une superficie de 250 ha. C'est actuellement la plus puissante centrale en service.



**Centrale d'Andasol**



**Centrale Shams 1**

### Les centrales solaires à miroirs de Fresnel

Dans ce type de centrales, un ensemble de miroirs réflecteurs mobiles capturent le rayonnement direct du soleil et le redirige à tout moment vers une cible unique le récepteur. Chacun des miroirs agit selon le principe des lentilles de Fresnel, possède sa propre courbure et une position spécifique afin d'optimiser la réflexion et la concentration du flux solaire.

Le récepteur conserve la chaleur ainsi collectée grâce à un dispositif isolant composé de tubes peints en noir entourés d'une vitre entraînant un effet de serre.



Cette énergie thermique est transférée à un fluide caloporteur (huile, eau, sels fondus) qui peut atteindre 500 °C ; la chaleur peut être stockée.

Le stockage le plus abouti (au CEA-Liten aujourd'hui) consiste à faire passer le fluide caloporteur dans un réservoir thermique où il cède sa chaleur à des matériaux (lits de roches) qui la restituent dans le circuit en cas de passage nuageux ou la nuit.

Il existe peu de centrales de ce type [4] et elles ont des puissances inférieures à 15 MW.

En France Alba Nova 1 (située en Corse) est la première centrale solaire à miroirs de Fresnel de grande puissance avec 12 MW.

**Centrale Alba nova**

### Les centrales à tour

*Les centrales à tour à effet de concentration :*

Dans une multitude de miroirs orientables (héliostats) suivent le soleil et concentrent l'énergie sur une chaudière unique contenant le fluide caloporteur et située en haut d'une tour.

Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures de 600 à 1000 °C. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement génératrice de vapeur entraînant une turbine soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur envoyé dans une chaudière, la vapeur générée actionnant des turbines.



Des centrales industrielles ont été mises en service ces dernières années.

En Espagne (Séville), a été installée une centrale solaire à tour PS10 (en 2008) (115 m de haut), d'une capacité de 11 MW. Elle produit plus de 23 GWh (gigawatts.heure) d'électricité par an et fournit de l'électricité à 5 500 foyers ; c'est la première d'une série dans la même région, elle a été suivie de PS20 (en 2009) de capacité supérieure 22 MW (tour de 165 m de haut) dont le champ de miroirs atteint 85 ha avec de nouveaux aspects techniques conduisant à une meilleure captation du rayon incident.

Enfin, le 13 février 2014 vient d'entrer en service la plus grande centrale solaire thermique du monde, la centrale IVANPAH dans le désert de Mojave (Californie) ; elle est formée de 3 tours de 140 m de haut sur lesquelles 173 500 miroirs héliostats contrôlés par ordinateurs concentrent l'énergie solaire chauffant l'eau située dans les chaudières à 538 °C. La centrale aura une capacité de 392 MW. L'ensemble occupe 14 km<sup>2</sup> de désert et fourni l'électricité pour 140 000 habitants. L'eau utilisée est en circuit fermé.



**Centrales PS10 PS20**



**Centrale Ivanpah**

En France, l'ancienne centrale à tour Thémis (Targassonne, Pyrénées orientales) a repris du service avec le projet PEGASE (EdF/CNRS : Production d'Electricité par turbine à GAZ et Energie SolairE).

Ce projet a pour but la mise en place et l'expérimentation d'un prototype de centrale solaire à haut rendement basé sur un cycle hybride à gaz à haute température constitué d'un récepteur solaire à air pressurisé et d'une turbine à gaz de 2 MWe ; un appoint de chaleur par combustion permet de maintenir le fonctionnement de la turbine quelque soit l'ensoleillement.

Pour cela on a remis en état la centrale à tour : une centaine d'héliostats concentrent les rayons de soleil sur la tour de 101 m de haut, là où circule l'air comprimé qui entraîne une turbine partiellement assistée par une combustion de gaz afin d'augmenter la température et assurer la production d'électricité pendant les périodes de moindre ensoleillement.

Ce concept expérimenté représente l'un des types de centrale solaire de troisième génération.

Si l'on veut augmenter les rendements énergétiques, des voies sont ouvertes avec les composants des caloporteurs, l'optimisation des miroirs et du revêtement sélectif. On envisage ainsi un potentiel d'amélioration de 20 à 30 %.



**Centrale Thémis**

*Les centrales à tour à effet de cheminée :*

Les rayons solaires ne sont plus ici concentrés sur un récepteur : l'air est chauffé par effet de serre par une surface de captage solaire formée d'une couverture transparente (verre, plastique) au centre de laquelle s'élève une tour très haute (voir figure 2).

L'air chauffé monte ainsi dans la tour ; la différence de température entre la partie basse et la partie haute de la tour provoque, par effet de convection, un déplacement continu de l'air qui permet à des turbines (placées à la base de la tour) de produire de l'électricité.



Centrale Manzanares

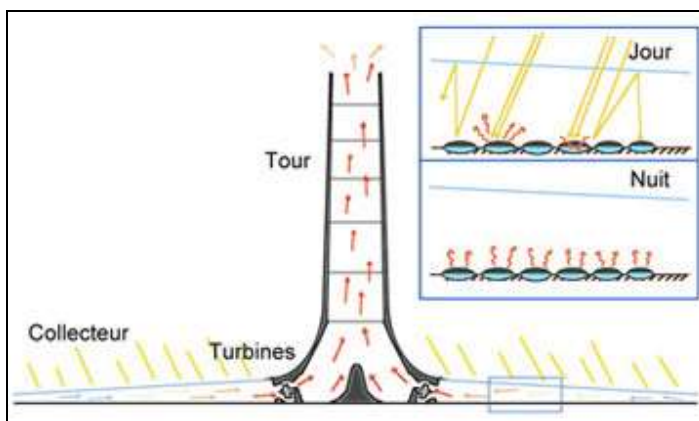


Figure 2 : Principe d'une centrale à effet de cheminée

Le principal avantage de ce système est qu'il peut fonctionner sans discontinuer en utilisant le rayonnement du soleil le jour et la chaleur emmagasinée dans le sol la nuit.

Un prototype de 194 m de haut, sur une surface de captation de 46 000 m<sup>2</sup>, d'une puissance de 50 kW a fonctionné en Espagne (Manzanares) entre 1981 et 1989 il a été arrêté à cause d'un coût trop élevé du kilowatt-heure.

Aujourd'hui le projet le plus ambitieux est australien (projet Buronga) dans le désert de New South Wells. La tour atteindrait environ 1000 m et 70 m de diamètre, la surface occupée par la « serre » serait de 5 km<sup>2</sup> ; la puissance électrique attendue est de 200 MW mais ce projet qui aurait dû démarrer en 2010 se heurte à des problèmes de financement.

### Les centrales à capteurs paraboliques

Dans ce type de centrale, une parabole s'orientant automatiquement concentre le rayonnement en son foyer qui est le récepteur du système : il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant un gaz qui est monté en température par l'effet de concentration.

Cela actionne un moteur qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique

Aujourd'hui une seule centrale industrielle de ce type fonctionne (depuis 2010) la centrale de Maricopa (USA), elle a une puissance de 1,5 MW et deux sont en projet en Espagne.



Centrale de Maricopa

Le projet européen DESERTEC, lancé par des industriels Allemands le 13 Juillet 2009, doit utiliser cette filière : des dizaines de centrales solaires tout autour du SAHARA enverront une partie de leur électricité vers l'Europe. La technologie sera classique : des séries de miroirs paraboliques capables de suivre la course du soleil concentrent la lumière vers une structure cylindrique chauffant un fluide jusqu'à 400° C.

La chaleur est alors transmise à un circuit d'eau transformé en vapeur et faisant tourner des turbines. L'électricité produite sera acheminée par des câbles enfouis dans le sol ou sous marin pour traverser la méditerranée.

Cette technologie de coût très élevé n'est pas adaptée à une production de masse, par contre c'est la seule qui puisse être mise en œuvre dans des sites isolés de petites tailles.

## 3. STOCKAGE

Le stockage d'énergie est un atout majeur de certaines technologies solaires thermodynamiques. Cela leur permet de fonctionner en continu. En effet une centrale solaire thermodynamique ne produit de l'électricité que lorsqu'il y a du soleil, le stockage permet donc à cette même centrale de produire pendant les périodes d'ensoleillement faibles ou nulles.

Plusieurs procédés de stockage peuvent être utilisés ; par exemple :

*Le stockage à sels fondus* : dans ce cas au lieu d'utiliser l'eau comme fluide caloporteur on utilise des sels fondus placés à l'intérieur d'un tube récepteur.

Le rayonnement concentré chauffe les sels fondus jusqu'à 550 °C qui sont ensuite stockés dans un réservoir. Quand c'est nécessaire les sels fondus chauds passent par un échangeur thermique pour fournir la vapeur nécessaire à la production d'électricité puis retournent dans le réservoir froid.

Le système à sels fondus a été utilisé pour la première fois dans une centrale de taille commerciale à la centrale de Gemasolar, en Espagne, (puissance 19,9 MW, entrée en service : octobre 2011) permettant le record de production d'électricité 24 heures sur 24 pendant 36 jours consécutifs.

*Le stockage sur lit de roche* : ce procédé (étudié au CEA) consiste à faire passer le fluide caloporteur dans un réservoir thermique vertical contenant un lit de roches (cailloux, galets) ; le fluide chauffe progressivement le lit de roches de haut en bas.

Le lit de roche conserve la chaleur pour la réinjecter dans le circuit en cas de passage nuageux ou la nuit.

Le fluide caloporteur qui sort froid du réservoir est ensuite renvoyé vers le récepteur pour être de nouveau chauffé. Cette capacité de chauffage permet un fonctionnement continu de la centrale.

#### 4. CONCLUSION

L'énergie solaire thermique est aujourd'hui bien maîtrisée en termes technologiques et économiques et a l'avantage d'être propre, abondante et gratuite mais elle est intermittente puisqu'elle dépend de l'ensoleillement.

Pour le chauffage elle est stockée dans un cumulus mais l'appoint d'autres formes d'énergie est nécessaire pour les périodes climatiques les plus défavorables.

L'électricité produite grâce à l'énergie solaire thermodynamique devrait être compétitive économiquement face aux énergies fossiles d'ici 10 à 15 ans. La durée de vie d'une installation est estimée entre 25 et 40 ans ; certaines technologies de la concentration bénéficient déjà d'un retour d'expérience important.

La production d'électricité par centrale solaire thermodynamique a l'avantage, par rapport à celle produite par la filière photovoltaïque qui produit directement l'électricité, d'être moins saccadée du fait de l'inertie thermique du fluide chauffé.

De plus, des systèmes de stockage dynamique de la chaleur peuvent être intégrés aux installations prolongeant alors la génération d'électricité plusieurs heures après la disparition du rayonnement solaire.

Du point de vue du coût la centrale à parabole est de la filière la plus chère 10 à 14 Euros/We contre 2,8 à 3,5 pour le cylindro-parabolique et 3 à 4 pour les centrales à tour.

A titre d'exemple donnons la comparaison en termes de puissance et d'énergie électrique entre les trois filières éolienne, solaire thermodynamique et nucléaire, par unité productrice :

- une grande centrale éolienne récente : puissance = 5 MW, énergie = 16 GWh/an
- une centrale solaire thermodynamique type Andasol : puissance = 50 MW, énergie = 182 GWh/an
- un réacteur nucléaire de Flamanville : puissance = 1300 MW, énergie = 9000 GWh/an

Enfin l'utilisation de la chaleur résiduelle après génération électrique pour produire de l'eau dessalée ou du froid augmente l'intérêt des installations solaires thermodynamiques.

#### Bibliographie :

[1] CEA de la recherche à l'industrie, Clefs CEA n°49/50/51

[2] CEA jeunes : l'énergie (les docs des incollables)

[3] ADEME

[4] 13ème journées internationales de thermiques d'ALBI (Ecole des Mines), août 2007 (*un nouveau concept de centrale solaire thermodynamique basé sur un récepteur à lit fluidisé*). 12<sup>ème</sup> rencontres scientifiques de la région Centre

[5] Syndicat des énergies renouvelables ([www.enr.fr](http://www.enr.fr))

[6] Deserteg.org

[7] Connaissance des Energies (CDE)