

# une technologie dévoilée



EDF R&D JUIN 2012 INNOVATION.EDF.COM



## Le solaire au zénith

Contrairement au photovoltaïque qui peut perdre 80% de sa puissance en quelques secondes lors de passages nuageux, les centrales solaires thermodynamiques ont une inertie thermique qui permet de limiter l'intermittence. Elles peuvent être équipées d'un stockage thermique de plusieurs heures et ainsi être exploitées lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible. Le stockage permet d'étendre ou de déplacer la période de production dans le temps et de rendre la prévision de productible plus fiable. Les centrales peuvent être facilement hybridées avec des combustibles fossiles. Les technologies solaires thermodynamiques sont actuellement plus chères que le photovoltaïque et ont de moindres perspectives de baisse de coût à court terme. Des projets aux Etats-Unis ont ainsi été reconvertis en projets photovoltaïques. Cependant, cet état de fait résulte des critères de choix en vigueur dans la plupart des appels d'offres où seul le coût de revient de l'électricité est pris en considération. On ne tient pas compte des bénéfices apportés par le stockage ou l'hybridation et des coûts évités par la substitution de moyens de pointe coûteux et fortement émetteurs de gaz à effet de serre.

Photo : collecteurs linéaires de Fresnel (Areva Solar, SolarPaces 2011)

## Le solaire thermodynamique à concentration

C'EST L'UNE DES TROIS FAÇONS D'UTILISER DIRECTEMENT L'ÉNERGIE SOLAIRE. LES DEUX AUTRES SONT LE THERMIQUE ET LE PHOTOVOLTAÏQUE.

Des milliers de miroirs qui suivent le mouvement du soleil, répartis sur plus de 100 hectares, font converger les rayons solaires vers un récepteur situé au sommet d'une tour de 140 mètres. Il s'agit d'une centrale solaire thermodynamique inaugurée l'an dernier en Andalousie. Les premières centrales commerciales ont été mises en exploitation en Californie de 1984 à 1991 grâce aux mesures incitatives de l'époque. Mais le contre-choc pétrolier et l'arrêt progressif des aides ont marqué un coup d'arrêt à la filière. Depuis 2006, la construction de projets redémarre en Espagne et aux Etats-Unis. Les perspectives de développement de la filière à moyen terme permettent d'envisager une capacité installée de l'ordre de 15 à 30 GW en 2025 dans les régions arides et semi-arides de la ceinture solaire. Les centrales solaires thermodynamiques peuvent être regroupées en trois familles qui se distinguent par le mode de collecte et de concentration de l'énergie solaire: les systèmes à focalisation linéaire (capteurs cylindro-paraboliques ou collecteurs linéaires de Fresnel), les centrales à tour, et les systèmes parabole-Stirling.

**Robert SOLER, chercheur senior à EDF R&D**



## Plein soleil pour EDF

Le Groupe EDF a récemment identifié le domaine du thermo-solaire comme un axe de développement potentiel dans le secteur des énergies renouvelables. Une étude du marché et des zones géographiques appropriées indique que des projets pourraient être menés aux Etats-Unis ou en Chine. Actuellement, plusieurs projets sont en cours d'instruction au Maghreb et au Moyen-Orient.

## PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SOLAIRE THERMODYNAMIQUE

# Miroir, mon beau miroir

LE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE PERMET DE TRANSFORMER L'ÉNERGIE SOLAIRE EN CHALEUR À TEMPÉRATURE ÉLEVÉE, PUIS DE CONVERTIR CETTE CHALEUR EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

Il faut tout d'abord concentrer le rayonnement solaire et une grande variété de configurations est possible. Les systèmes solaires thermodynamiques peuvent être classés en quatre filières technologiques: cylindro-parabolique, Fresnel, récepteur central (tour), parabole-Stirling. Ces technologies, qui ne valorisent que la composante directe du rayonnement solaire, sont équipées de dispositifs de suivi de la trajectoire du soleil et de miroirs pour concentrer ses rayons.

### La filière cylindro-parabolique

C'est la filière de loin la plus mature. Ces centrales utilisent des miroirs cylindro-paraboliques de 100 à 800 m<sup>2</sup> qui concentrent les rayons du soleil sur des tubes placés à l'axe focal du concentrateur et dans lesquels circule un fluide caloporteur. Le concentrateur suit la course du soleil en tournant sur un axe. Le fluide caloporteur, généralement une huile de synthèse, chauffé lors du passage dans les tubes, circule à travers une série d'échangeurs de chaleur pour produire de la vapeur surchauffée à la température de 390°C sous une pression de 100 bars. Il constitue ainsi la source chaude d'un cycle vapeur classique à resurchauffe. Toutes les unités construites à ce jour comportent une hybridation au gaz naturel d'au moins 12 à 15%. Un stockage thermique de plusieurs heures dans des sels fondus permet de mieux adapter la production à la demande bien que l'adjonction de ce système et l'extension du champ solaire qui en résulte engendrent un surcoût d'investissement. Le champ de collecteurs peut également être intégré à une centrale fossile pour augmenter le cycle vapeur. Le rendement solaire-électrique maximal est dans le meilleur des cas d'environ 25% tandis que le rendement annuel net est de

15%. L'empreinte au sol est de l'ordre de 3,25 ha/MW pour les centrales sans stockage. Cette technologie présente cependant quelques inconvénients. En particulier, un terrain assez plat (pente maximale de 3%) et rectangulaire est requis. D'autre part, l'huile thermique utilisée pose des problèmes : elle se dégrade chimique-



ment à partir de 400°C ce qui limite le rendement du cycle thermodynamique du fait de la limitation de la température de la source chaude ; elle fige à 12°C et il peut être nécessaire la nuit ou en hiver de consommer du combustible fossile dans l'unique but de la garder fluide ; enfin l'huile est inflammable et présente un risque environnemental. En France, ce produit est classé Seveso dans les quantités requises pour les centrales solaires. Des recherches sont en cours pour tenter d'utiliser d'autres fluides caloporteurs, en particulier les sels fondus ou la production directe de vapeur qui présentent eux aussi des risques d'exploitation.

**photo : centrale à tour Gemasolar en Andalousie**

## REPÈRES

**221-213 av JC Archimède** utilise la concentration des rayons solaires pour détruire les navires ennemis à Syracuse.

**1878 Four solaire d'Augustin Mouchot** présenté à l'exposition universelle.

**1912 Centrale de 55 kW par Sun Power** près du Caire pour produire de la vapeur. Collecteurs cylindro-paraboliques de 62 m de long.

**1970-80 Expérimentation** de 3 filières : cylindro-parabolique, tours et parabole-Stirling.

**1983 Centrale à tour THEMIS** exploitée par EDF et le CNRS. Puissance de 2,5 MW et stockage à sels fondus de 5 h.

**1985-1991 Californie : 9 centrales SEGS** commerciales à collecteurs cylindro-paraboliques. Capacité de 354 MW.

**1991 Faillite de Luz International** (centrales SEGS). Arrêt du développement commercial pendant 15 ans.

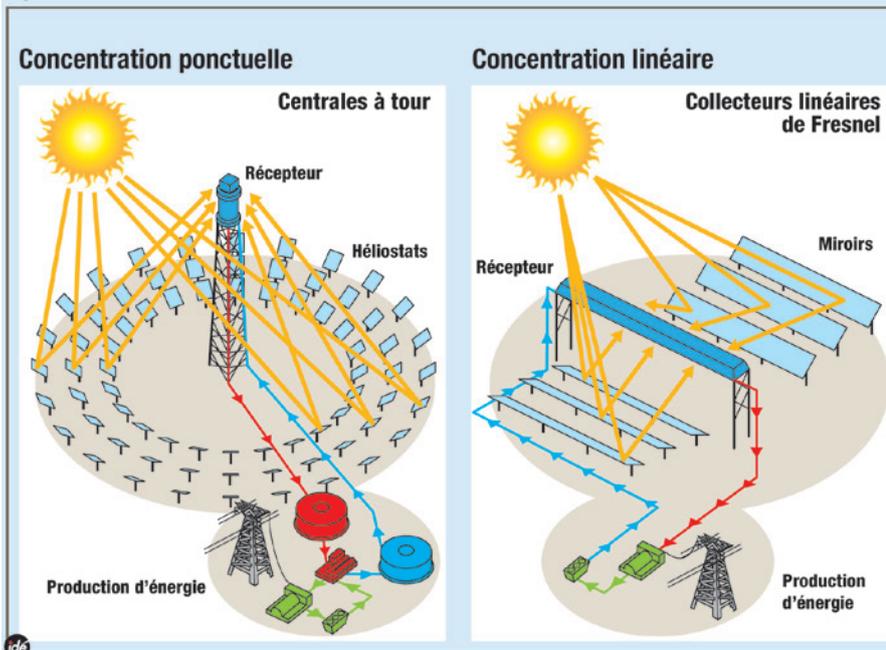
**2006 Centrale Nevada Solar One** à Boulder City, Nevada. Renouveau de la filière.

**2007 1re centrale à tour commerciale** près de Séville: PS10.

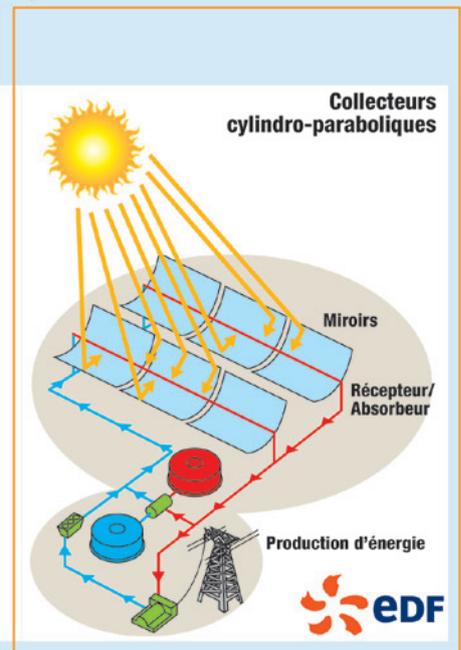
**2011 Mise en service de la centrale à tour de Gemasolar.** Utilisation des sels fondus.

## LES TROIS PRINCIPAUX SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES À CONCENTRATION

Système fixe



Système mobile



### LE SAVIEZ-VOUS ?

La centrale à tour Gemasolar, mise en service à Ecija (Andalousie) en 2011 atteint une puissance de 19,9 MW. Elle comporte 2650 héliostats sur 185 ha concentrant les rayons solaires au sommet d'une tour de 140 m. Elle dispose d'une stockage à sels fondus de 15 h permettant de fonctionner 24h/24 en été et de produire 110 GWh par an (soit la consommation de 25000 foyers). La centrale utilise 8500 tonnes de sels. 9 mois ont été nécessaires pour les fondre pendant la construction.

#### La filière Fresnel

Cette filière est simple et peu coûteuse. Les collecteurs sont des miroirs en bandes parallèles disposés à plat et près du sol concentrant les rayons sur des tubes récepteurs fixes. L'eau, portée à 100 bars et à 500°C, est utilisée comme fluide caloporteur et comme fluide de travail. Cette technologie est encore au stade de la démonstration. Son principe est similaire à celui de la filière cylindro-parabolique mais elle utilise des miroirs plans ou légèrement incurvés moins chers que les réflecteurs paraboliques. Cette filière possède les plus faibles performances optiques et le plus faible rendement solaire-électrique annuel net (10%) mais son empreinte au sol est de 1,5 ha/MW, soit moins de 60% par rapport aux centrales à collecteurs cylindro-paraboliques. Le lavage des miroirs peut s'automatiser. Il n'y a pas de solution de stockage mature. Les applications d'hybridation avec des centrales conventionnelles ainsi que la production de chaleur industrielle sont très intéressantes pour cette filière. Un terrain assez plat (pente au plus de 5%) est requis.

#### Les tours solaires

La technologie la plus souple d'utilisation. Des baisses de coûts importantes sont attendues. Les héliostats suivent le soleil et concentrent ses rayons sur un récepteur au sommet d'une tour. Deux technologies : la production directe de vapeur, à coûts moindres, et l'utilisation de sels fondus pouvant être utilisés comme fluide caloporteur et milieu de stockage thermique. Les technologies matures utilisent un cycle vapeur à resurchauffe proche de celui d'une centrale à charbon (vapeur à 150 bars et 550°C). Le stockage est trois fois plus efficace qu'avec la filière cylindro-parabolique. Le rendement maximal des centrales à tour à cycle de Rankine est de l'ordre de 22% pour un rendement annuel net d'environ 16%. L'empreinte au sol sans stockage est de 4 ha/MWe. Les héliostats acceptent un terrain pentu. Le bon rendement thermodynamique limite la puissance nécessaire de la source froide et la consommation d'eau.

#### La filière parabole-Stirling

Elle est très coûteuse et a du mal à passer au stade commercial.

## Perspectives

La technologie cylindro-parabolique est la première technologie ayant atteint le stade de l'exploitation commerciale à une échelle significative. Les centrales Solar Energy Generating Systems (SEGS), un ensemble de neuf unités d'une capacité totale de 354 MWe, ont été construites dans la deuxième moitié des années 80 et au début des années 90 dans le sud de la Californie. Cette technologie, qui domine le marché, n'a cependant pas de perspectives de baisse de coût très marquées. Les industriels estiment que l'avenir de la filière passe par l'utilisation de sels fondus qui présentent néanmoins des risques d'exploitation avec la nécessité de maintenir, dans des kilomètres de tubes, la température au-dessus du point de fusion des sels. Concurrente directe des systèmes cylindro-paraboliques, la technologie Fresnel est plus récente. Des architectes-ensembliers tels qu'ABB ou Areva Solar proposent maintenant la livraison clé en main de centrales produisant de la vapeur surchauffée. Des centrales pilotes de quelques MWe ont été construites en Espagne, aux Etats-Unis et en Australie.

Plusieurs projets commerciaux sont en construction. Les centrales à tour ont donné lieu à des projets pilotes dans les années 1980. De 1983 à 1986, EDF et le CNRS ont exploité la centrale THEMIS à Targassonne dans les Pyrénées Orientales. En 2007, les premiers projets commerciaux ont vu le jour. De manière générale, les évolutions actuelles laissent penser que les technologies Fresnel, de tour à sels fondus et de tour à vapeur surchauffée devraient se développer de manière significative et constituer à terme le socle des choix industriels. Trouver des solutions de stockage fiables et innovantes devient cependant essentiel. L'hybridation avec des centrales à cycle combiné ou thermiques sera un moyen de développer les technologies thermosolaires en minimisant les risques tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre des centrales. L'avenir à court et moyen terme passe par la baisse de coût des composants, l'amélioration du rendement et le développement de nouveaux modes de stockage pour l'air pressurisé et la production directe de vapeur.

**Robert SOLER,**  
chercheur senior à EDF R&D

## Lexique

**Watt (W) :** unité internationale de puissance. Correspond à la quantité d'énergie consommée ou produite par unité de temps (un joule par seconde). La puissance correspond à un débit d'énergie.

**kWh :** un kWh vaut 3,6 mégajoules (MJ) et correspond à la consommation d'un appareil électrique de mille Watts pendant une heure.

**Fluide caloporteur :** fluide (exemple, mélange de sels fondus) qui absorbe, transporte et cède la chaleur.

**Centrale thermique classique :** unité de production d'énergie électrique qui utilise la chaleur dégagée par la combustion d'énergies fossiles (charbon, gaz ou fioul). Cette chaleur sert à transformer l'eau en vapeur, dont la détente fait tourner une turbine entraînant un alternateur produisant à son tour de l'électricité.

**Cycle combiné à gaz :** technologie de production d'électricité dans une centrale thermique fonctionnant au gaz naturel. Un cycle est constitué de turbine(s) à combustion (TAC) et d'une turbine à vapeur (rendement amélioré). Le gaz de synthèse est envoyé dans la TAC qui produit de l'électricité et des gaz d'échappements très chauds (fumées). La chaleur des fumées est récupérée par une chaudière qui produit ainsi de la vapeur. Une partie de cette vapeur est utilisée par la turbine pour produire une quantité supplémentaire d'électricité.

**Héliostat :** miroir orientable télécommandé pour suivre la trajectoire du soleil et concentrer le rayonnement vers le récepteur situé au sommet de la tour.

**Sel fondu :** mélange de sels de nitrates (nitrate de sodium, nitrate de potassium...) qui fond à 220°C et se dégrade chimiquement à partir de 600°-650°. A une bonne capacité thermique massique (1,5 J/K.kg, à comparer aux 4,2 J/K.kg de l'eau), est liquide à pression atmosphérique, non inflammable et non toxique.

### > pour en savoir plus

La centrale expérimentale Thémis : bilan et perspectives. B. Bonduelle, B.

Rivoire et A. Ferriere. Revue Phys. Appl. 24, p 453-461. Avril 1989.

Power from the sun : <http://www.powerfromthesun.net/>

ESTELA : <http://www.estelasolar.eu/>

Torresol Energy : <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/planta-gemasolar/es>

Helioscsp : <http://www.helioscsp.com/>



N'imprimez que si vous en avez l'utilité.

EDF  
22-30 avenue de Wagram 75382 Paris Cedex 08  
FRANCE

SA au capital de 924 433 331 euros - 552 081 317 R.C.S. Paris

Publication EDF R&D - 1 av Général de Gaulle 92141 Clamart Cedex

Directeur de la publication : Stéphane ANDRIEUX

Secrétaire de rédaction : Florence METGE-LAYMAJOUX

Le contenu de cette publication n'engage que son auteur et en aucune manière la responsabilité d'EDF.

© 2012 EDF

Toute reproduction interdite sans l'autorisation de l'auteur.

Credits photos : AREVA, Robert SOLER

Le groupe EDF est certifié ISO 14001

