

Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique

C'est à la fin du 19^{ème} siècle que les premières expériences, sous leurs formes actuelles, apparaissent dans le domaine du solaire à concentration (exposition universelle de 1878). Au 20^{ème} siècle, les premiers systèmes paraboliques produisant de la vapeur sont conçus. A la fin des années 1970, des projets pilotes de centrales solaires à concentration se développent aux États-Unis, en Russie, au Japon et en Europe. Les années 1980 marquent le début de la construction en série de ces centrales dans le désert californien. Aujourd'hui, la technologie du solaire thermodynamique a considérablement évolué et de nombreux projets y font appel.

Le solaire thermodynamique est l'une des valorisations du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels.

Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent une grande variété de systèmes disponibles tant au niveau de la concentration du rayonnement, du choix des fluides caloporteur et thermodynamique ou du mode de stockage.

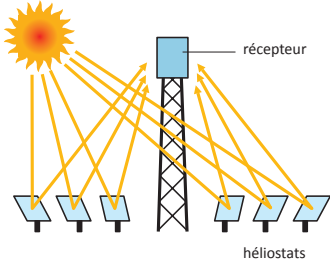
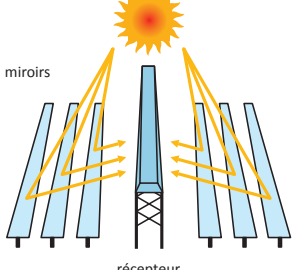
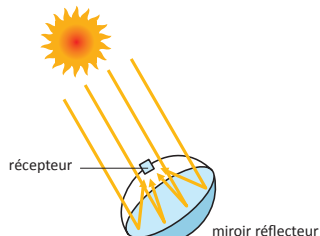
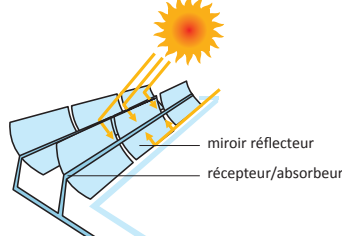
Les systèmes de concentration

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer, via des miroirs réflecteurs, pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel. Le récepteur absorbe l'énergie réfléchi par le miroir et la transfère au fluide thermodynamique. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à celui des concentrateurs ponctuels.

Le facteur de concentration

Une caractéristique du système est son facteur de concentration. Ce coefficient permet d'évaluer l'intensité de la concentration solaire : plus le facteur de concentration est élevé, plus la température atteinte sera importante.

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

	Concentration ponctuelle	Concentration linéaire
Fixes	<p>Centrales à tour</p> 	<p>Collecteurs Fresnel linéaires</p> 
Mobiles	<p>Collecteurs paraboliques</p> 	<p>Collecteurs cylindro-paraboliques</p> 

■ Les fluides caloporteurs et thermodynamiques

L'énergie thermique provenant du rayonnement solaire collecté est convertie grâce à un fluide caloporteur puis un fluide thermodynamique. Dans certains cas, le fluide caloporteur est utilisé directement comme fluide thermodynamique. Le choix du fluide caloporteur détermine la température maximale admissible, oriente le choix de la technologie et des matériaux du récepteur et conditionne la possibilité et la commodité du stockage.

- L'**eau liquide** est, a priori, un fluide de transfert idéal. Elle offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique. En outre, elle peut être utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine. Cependant son utilisation implique de travailler à des pressions très élevées dans les récepteurs en raison des hautes températures atteintes, ce qui pose problème pour les technologies cylindro-paraboliques.
- Les **huiles** sont des fluides monophasiques qui présentent un bon coefficient d'échange. Leur gamme de température est limitée à environ 400 °C. C'est le fluide le plus couramment employé dans les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.

- Les **sels fondus** à base de nitrates de sodium et de potassium offrent un bon coefficient d'échange et possèdent une densité élevée. Ils sont donc également de très bons fluides de stockage. Leur température de sortie peut atteindre 650 °C. Leur association avec un concentrateur à tour et un cycle de Rankine constitue une combinaison déjà éprouvée.
- Les **gaz** tels l'hydrogène ou l'hélium peuvent être utilisés comme fluides thermodynamiques et entraîner les moteurs Stirling qui sont associés aux collecteurs paraboliques.
- Les **fluides organiques** (butane, propane, etc.) possèdent une température d'évaporation relativement basse et sont utilisés comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine.
- L'**air** peut être utilisé comme fluide caloporteur ou comme fluide thermodynamique dans les turbines à gaz.

■ Les systèmes de génération d'électricité

Plusieurs systèmes de génération d'électricité sont envisageables : turbine à gaz solarisées, cycle de Rankine vapeur, moteur Stirling, Cycle de Rankine organique, etc. Le choix d'un système est conditionné par le type de fluide, la technique de captage et de stockage envisagés. Les cycles de Rankine vapeur sont, dans l'état actuel des technologies, les plus largement déployés.

■ Une production en continu par le stockage et l'hybridation

- Le **stockage** : un atout majeur de certaines technologies solaires thermodynamiques est leur capacité de stockage qui permet aux centrales de fonctionner en continu. En effet, lorsque l'ensoleillement est supérieur aux capacités de la turbine, 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. Plusieurs procédés de stockage peuvent être utilisés : sel fondu, béton, matériaux à changement de phase, etc.
- L'**hybridation** avec une source de chaleur fossile ou biomasse permet d'accroître la disponibilité des installations et de produire la chaleur de manière garantie. Elle favorise ainsi la stabilité des réseaux électriques nationaux et continentaux.

Glossaire du solaire thermodynamique

- **Solaire thermodynamique** : également appelé solaire à concentration ou CSP (concentrated solar power), cette technologie permet de convertir le rayonnement solaire direct en électricité via des processus thermodynamiques
- **Miroir** : également appelé collecteur, capteur, réflecteur ou concentrateur, le miroir est le système qui permet de collecter et de concentrer le rayonnement solaire
- **Fluide caloporteur** : également appelé fluide de transfert, il est chargé de transporter la chaleur collectée et concentrée par le miroir
- **Fluide thermodynamique** : appelé également fluide de travail, il permet d'actionner et d'entraîner les machines (moteurs, turbines, etc.)



Syndicat des énergies renouvelables
13-15, rue de la Baume
75008 Paris
Tél. : +33 1 48 78 05 60
Fax : +33 1 48 78 09 07
www.enr.fr

■ Les différents types de centrales solaires thermodynamiques

D'une superficie pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de mètres carrés, les centrales solaires thermodynamiques recouvrent l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis à convertir cette chaleur en énergie électrique. Selon le mode de concentration du rayonnement solaire, une grande variété de configurations différentes est possible pour les centrales solaires thermodynamiques. Les applications sont diverses : production d'électricité, production de vapeur pour procédés industriels ou encore appoint solaire pour des installations utilisant des combustibles biomasse ou fossiles.

■ Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques

Ce type de centrale 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 à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou un générateur électrique.



■ Les centrales solaires à miroir de Fresnel

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques repose sur la mise en forme du verre pour obtenir sa forme parabolique. Une alternative possible consiste à approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans.

C'est le principe du concentrateur de Fresnel. 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 thermodynamique peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500 °C. La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur.



■ Les centrales à tour

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. 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. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée au 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.



© JAMES PACHECO / EDISON INTERNATIONAL

■ Les centrales à capteurs paraboliques

Ayant la même forme que les paraboles de réception satellite, 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. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui est monté en température 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 en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Pour ce type de système, le stockage n'est pas possible.

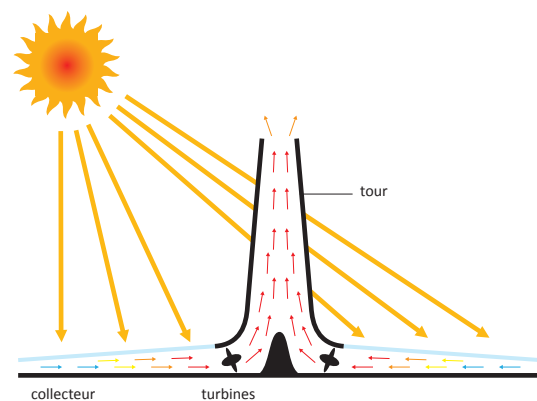


© THOMAS MANCINI / TWINE.CE

■ Un cas particulier : la tour solaire à effet de cheminée

Dans ce concept, les rayons solaires ne sont pas concentrés. L'air est chauffé par une surface de captage solaire formée d'une couverture transparente et agissant comme une serre. L'air chaud étant plus léger, il s'échappe par une grande cheminée centrale. La différence de température entre la partie basse et la partie haute de la cheminée donne lieu à un déplacement perpétuel de l'air (phénomène de la convection naturelle). Cette circulation d'air permet alors à des turbines situées à l'entrée de la cheminée de produire de l'électricité.

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

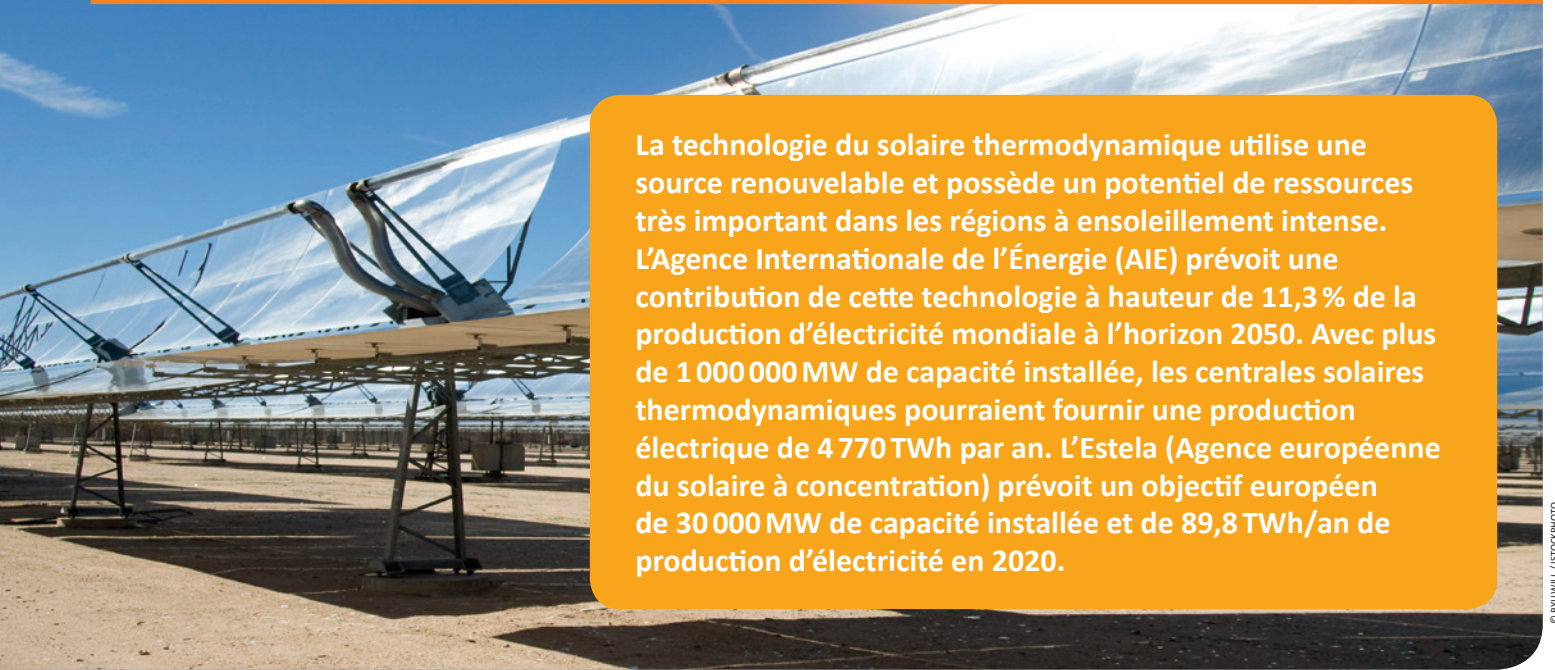


Design graphique: THINK UP communication éco-responsable® www.thinkup.fr



Syndicat des énergies renouvelables
13-15, rue de la Baume
75008 Paris
Tél. : +33 1 48 78 05 60
Fax : +33 1 48 78 09 07
www.enr.fr

■ Les perspectives du solaire thermodynamique



La technologie du solaire thermodynamique utilise une source renouvelable et possède un potentiel de ressources très important dans les régions à ensoleillement intense. L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) prévoit une contribution de cette technologie à hauteur de 11,3 % de la production d'électricité mondiale à l'horizon 2050. Avec plus de 1 000 000 MW de capacité installée, les centrales solaires thermodynamiques pourraient fournir une production électrique de 4 770 TWh par an. L'Estela (Agence européenne du solaire à concentration) prévoit un objectif européen de 30 000 MW de capacité installée et de 89,8 TWh/an de production d'électricité en 2020.

© PAVILLI / ISTOCKPHOTO

■ Le potentiel, les ressources

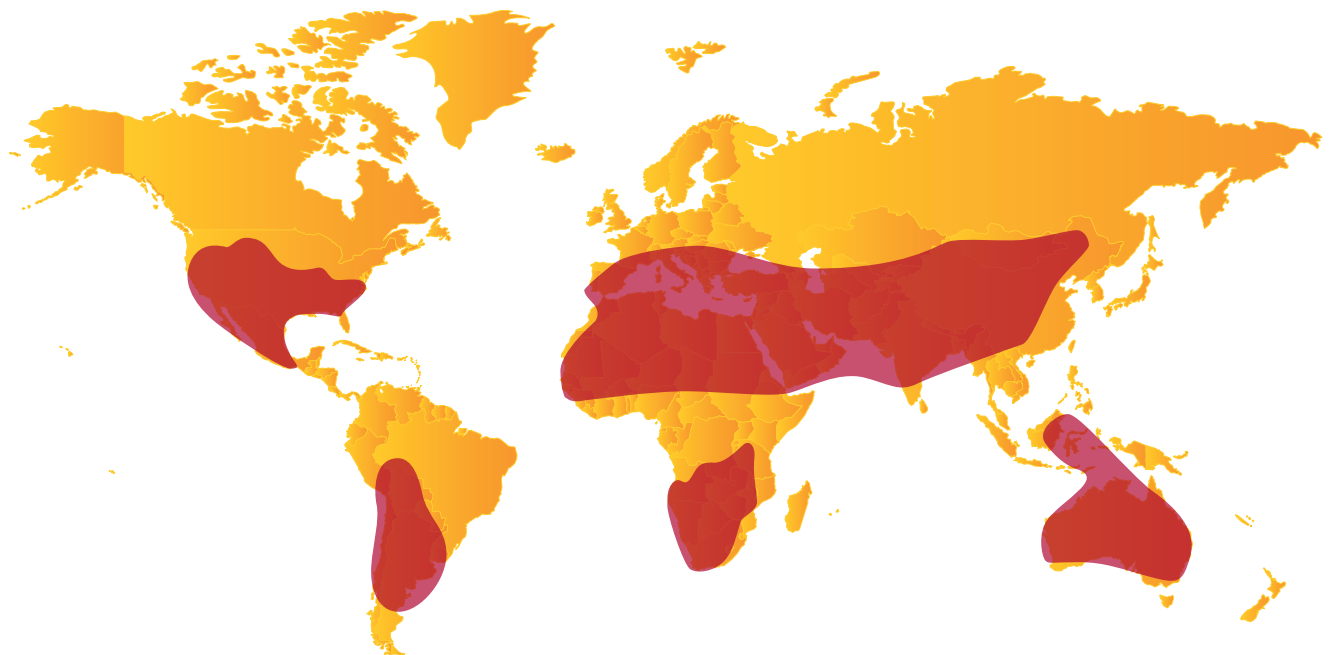
Les zones les plus favorables à l'utilisation de l'énergie solaire concentrée sont celles où l'ensoleillement direct est supérieur à 1900 kWh/m²/an. Les régions adaptées sont très nombreuses et recèlent un potentiel très important. Elles se situent principalement en Afrique du Nord et septentrionale, au Proche et Moyen-Orient, en Australie, dans le sud-ouest des États-Unis, en Inde ou encore en Asie centrale. En France, seul l'ensoleillement direct du pourtour méditerranéen permet d'envisager des projets sur le territoire national.

« Couvrir 0,3 % de la surface des déserts suffirait à produire l'électricité nécessaire à l'ensemble de l'humanité »

selon les experts du projet Desertec

Zones les plus favorables à l'utilisation de l'énergie solaire à concentration

source : Stine et Geyer, 2001



■ Les applications d'aujourd'hui et de demain

Au-delà des applications actuelles (production d'électricité, appoint solaire de centrales, production de vapeur pour procédés industriels), la technologie solaire thermodynamique pourra, dans les prochaines années, être employée pour d'autres usages et applications.

Appoint solaire (ou « booster »)

La solution d'appoint solaire consiste à installer un champ solaire à proximité d'une centrale biomasse ou fossile afin de réduire la consommation de combustible. Cette solution hybride la source en bénéficiant du « powerblock » de la centrale.

Procédés industriels

De nombreuses industries utilisent des procédés faisant appel à la haute température : stérilisation, chauffage, cuisson, traitement thermique, fusion, distillation, blanchissement, etc.

Certaines technologies solaires thermodynamiques et notamment les collecteurs cylindro-paraboliques et miroirs de Fresnel sont appropriées pour ces applications. Elles peuvent être envisagées dans le cas d'une installation couvrant une gamme entière d'industries utilisant des procédés haute température.

Dessalement

Le dessalement est le processus de transformation de l'eau de mer en eau potable. Les régions souffrant le plus d'une pénurie d'approvisionnement en eau potable sont souvent celles qui reçoivent les grandes quantités de radiation solaire. Parce qu'il est compatible avec des zones chaudes et sèches, le solaire thermodynamique pourra être mis à contribution pour dessaler l'eau de mer de ces pays en minimisant l'impact environnemental de ce procédé par rapport aux technologies actuelles.

Carburants solaires

Le développement et la recherche pourraient permettre, dans les prochaines années, la production de carburants solaires. La production d'hydrogène par séparation thermo-chimique de l'eau pourrait être permise par les hautes températures fournies par les systèmes solaires à concentration.



■ Des projets ambitieux

Plan solaire méditerranéen (PSM)

Ce programme, lancé le 13 juillet 2008 par l'Union pour la Méditerranée (UPM) a pour objectif de permettre aux pays situés sur le pourtour méditerranéen, en Afrique du Nord et au Proche-Orient, de développer une production d'électricité d'origine renouvelable par la construction de capacités additionnelles de production d'électricité bas carbone, et notamment solaire d'une puissance totale de 20 000 MW à l'horizon 2020. Le fort potentiel solaire de ces pays permettrait d'approvisionner, en électricité à faible contenu CO₂, le marché local et d'en exporter une partie vers les pays européens, fortement demandeurs d'électricité. Pour mettre en œuvre ces objectifs, de nombreux pays se sont dotés de plans solaires nationaux.

Medgrid

Le projet Medgrid s'inscrit dans le cadre du Plan Solaire Méditerranéen. Cette initiative industrielle a pour objet d'étudier la faisabilité d'un réseau de transport de l'électricité entre les rives nord et sud de la Méditerranée et le développement des interconnexions autour du bassin méditerranéen. En effet, acheminer l'électricité produite par les centrales développées dans le cadre du PSM vers les zones de consommation nécessite de nouvelles infrastructures de transport et d'interconnexion reliant les sites de production aux réseaux locaux et à l'Europe, notamment par des lignes sous-marines à courant continu haute tension (CCHT).

Desertec

Initié en 2009, le projet Desertec vise à exploiter les potentiels énergétiques des déserts du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord, grâce à un vaste réseau de centrales solaires à concentration et de parcs éoliens. L'objectif de cette initiative industrielle est de faire coopérer l'Europe, le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord afin de produire de l'électricité et de l'eau douce. D'ici 2050, 15 % des besoins en électricité de l'Europe et une grande partie de ceux des pays producteurs pourraient être assurés.



Syndicat des énergies renouvelables
13-15, rue de la Baume
75008 Paris
Tél. : +33 1 48 78 05 60
Fax : +33 1 48 78 09 07
www.enr.fr

Le solaire thermodynamique en Europe et dans le monde

L'énergie solaire est inépuisable et ne produit ni déchet ni gaz à effet de serre. Particulièrement bien adaptée aux pays dont l'ensoleillement direct est intense, la technologie du solaire thermodynamique est amenée à se développer considérablement durant les prochaines années et à contribuer aux objectifs européens de 20 % d'énergies renouvelables à l'horizon 2020.

Les régions favorables recèlent un potentiel très important de production d'électricité et les centrales solaires thermodynamiques y représentent une option technologique majeure pour un approvisionnement énergétique écologique.

Le marché mondial

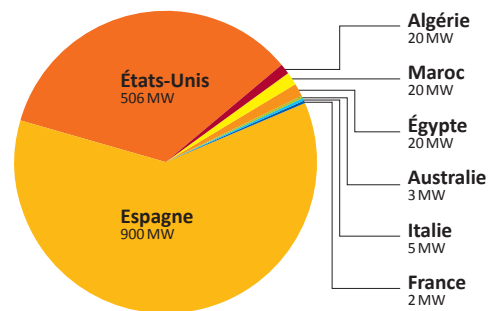
En septembre 2011, on recensait une capacité mondiale de solaire thermodynamique d'environ 1 475 MW. L'Espagne et les États-Unis concentrent la quasi-totalité des centrales thermodynamiques en activité. Ils sont les seuls à commercialiser actuellement de l'électricité provenant du solaire à concentration. Plus de 3 000 MW sont également en construction et près de 13 700 MW ont été annoncés en projets à travers le monde.



© M. MEHOS/T. MANCINI/SANDIA

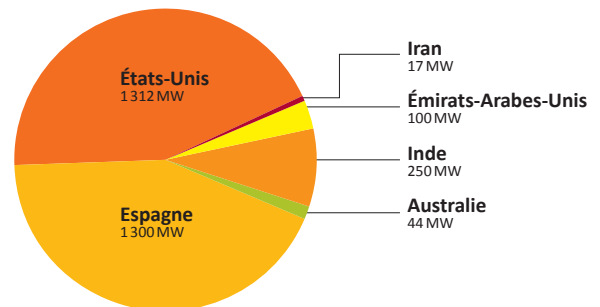
Capacité solaire thermodynamique installée en septembre 2011

sources : AIE, SER, Protermosolar



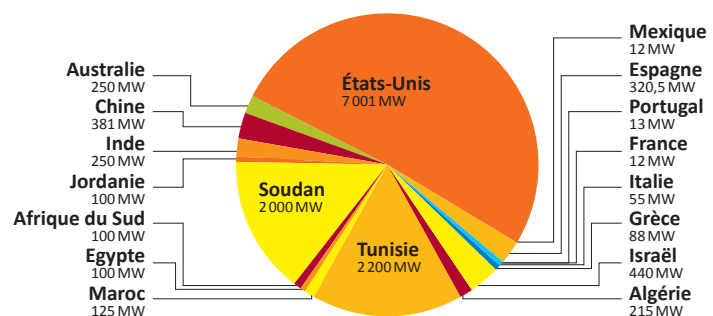
Capacité solaire thermodynamique en cours de construction au 1^{er} janvier 2011

sources : AIE, SER



Capacité solaire thermodynamique en projet en septembre 2011

sources : AIE, SER



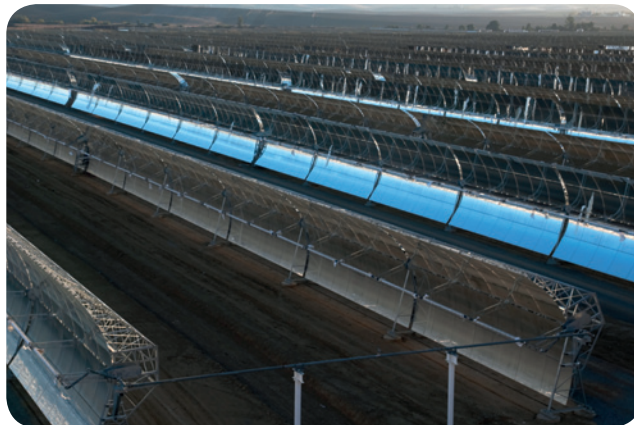
■ Répartition des capacités selon les technologies en 2011

Les centrales solaires à collecteurs cylindro-paraboliques représentent 96% des centrales actuellement en activité. C'est également la technologie privilégiée pour la plupart des centrales en construction et en projet. Cette technologie bénéficie, en effet, du retour d'expérience des centrales SEGS (Solar Energy Generating Systems) en Californie, en opération depuis bientôt 30 ans.

Il existe également plusieurs exemples de centrales Compact Linear Fresnel (CLFR) dans le monde :

aux États-Unis avec la centrale thermique de Kimberlina (5 MW), à Liddell en Australie (3MW) ou encore à Murcia en Espagne (1,4 MW).

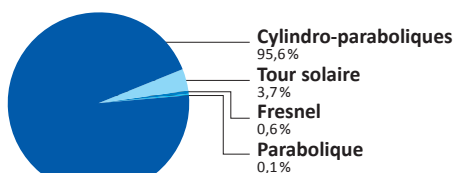
La technologie des centrales à tour est présente en Espagne, à Séville, avec les centrales PS10 et PS20 de puissances respectives de 10MW et 20MW, ainsi qu'aux États-Unis avec la Sierra Sun Tower de 5 MW, ou encore en Allemagne avec la centrale expérimentale de Jülich de 1,5 MW.



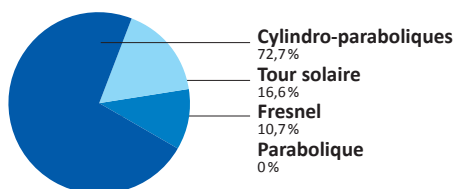
© PAUL ROMMER / ISTOCKPHOTO

Répartition des capacités opérationnelles / en construction / en projet par technologie en septembre 2011

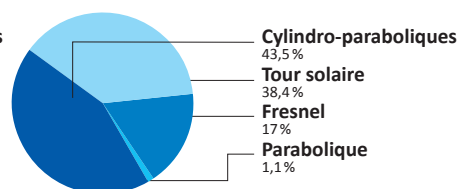
sources : AIE, SER



opérationnel



en construction



en projet



© XAVIER TUDJAN

La France : la centrale Themis

Inaugurée en 1983 à Targassonne dans les Pyrénées Orientales, la centrale Themis constitue alors une véritable référence internationale en matière de conversion de l'énergie solaire en électricité. Fermée en 1986 pour raisons économiques, elle renaît aujourd'hui grâce à deux projets : Themis-PV (Photovoltaïque) et Pégase (Production d'électricité par turbine à gaz et énergie solaire).

Ainsi, la moitié haute des héliostats a été équipée de panneaux photovoltaïques, en vue de produire directement de l'électricité injectée sur le réseau public. L'autre moitié est consacrée au projet de recherche Pégase : les 100 héliostats vont concentrer les rayons du soleil vers la tour centrale existante où circulera de l'air. Ce projet permettra de mener des travaux de R&D sur la technologie du solaire à concentration.

L'opération pilote de la centrale Themis a permis à la France d'être pionnière dans le domaine du solaire thermodynamique. Riches de cette expérimentation, les acteurs français de la filière disposent aujourd'hui d'atouts incontestables pour exporter leurs savoir-faire et se positionner sur le marché international.

Design graphique: THINK UP communication éco-responsable® www.thinkup.fr



Syndicat des énergies renouvelables
13-15, rue de la Baume
75008 Paris
Tél. : +33 1 48 78 05 60
Fax : +33 1 48 78 09 07
www.enr.fr

© GREGORY ZOBEL / SANDA