

# Le retour d'un acteur français dans le secteur de la technologie du solaire à concentration

A l'aube de l'humanité, la seule énergie disponible était l'énergie humaine. Puis, progressivement, l'homme a eu recours à l'énergie animale et il a appris à domestiquer l'énergie contenue dans la biomasse, les énergies éolienne et hydraulique : toutes des énergies que l'on qualifie, aujourd'hui, de renouvelables.

Avec la révolution industrielle, il s'est massivement appuyé sur une énergie devenue abondante et facile à domestiquer : l'énergie fossile.

par **Roger PUJOL\***

---

## QU'EST-CE QUE LE SOLAIRE À CONCENTRATION ?

A la fin du vingtième siècle, l'homme a pris conscience des impacts négatifs sur la planète de l'utilisation intensive de l'énergie fossile, tant en termes de tarissement des ressources que (et surtout...) d'émissions de gaz à effet de serre (dont le principal est le gaz carbonique, CO<sub>2</sub>).

C'est pour faire face à cette nouvelle problématique que l'homme a « redécouvert » les énergies renouvelables.

Ces énergies proviennent toutes de la restitution (immédiate ou légèrement différée dans le temps) de l'énergie solaire. La biomasse fonctionne sur un cycle de l'ordre de quelques années ; elle a recours à la photosynthèse, qui permet de capter le carbone de l'air dans un carburant, carbone qui sera ensuite restitué à l'atmosphère lors de la combustion du carburant, ce qui aboutit, à la fin du cycle considéré, à un bilan à somme nulle. L'hydraulique provient du cycle « évaporation – condensation » des océans sous l'effet du rayonnement solaire, l'éolien utilisant, pour sa part, les masses d'air mises en mouvement (sous l'effet, notamment, de ce même rayonnement).

Viennent ensuite les énergies dites solaires : le solaire thermique (destiné essentiellement à des installations de chauffage), le solaire photovoltaïque (utilisant des composants électroniques produisant directement de l'électricité dès lors qu'ils reçoivent des photons émis par le soleil) et, enfin, solaire à concentration, qui (comme son nom l'indique) concentre le rayonnement solaire à l'aide de miroirs, afin de récupérer l'énergie thermique à un niveau de température qui soit compatible avec des utilisations thermodynamiques ou industrielles.

---

\* Directeur général de la Division Énergie Solaire, Constructions Industrielles de la Méditerranée  
<http://www.cnim.fr>



Photo 1.

Les tours disposent au sol d'un grand nombre de capteurs orientables appelés héliostats qui sont individuellement formés en paraboloïde et renvoient le rayonnement en haut d'une tour qui est fixe et dont la hauteur est dépendante du nombre d'héliostats et de la latitude du lieu.

Le principe du fonctionnement du solaire à concentration est simple ; il est connu depuis la Grèce antique, la légende voulant qu'Archimède l'ait utilisé pour incendier les vaisseaux de la marine romaine qui attaquaient la ville portuaire sicilienne de Syracuse.

On utilise des miroirs disposés suivant une forme de parabole, qui concentrent le rayonnement solaire sur son foyer où circule un fluide caloporteur, qui récupère les calories ainsi captées.

On distingue quatre familles de capteurs et quatre familles de fluides caloporteurs :

Il y a deux familles de capteurs utilisant une forme parabolique, qui concentre la chaleur en un point, ce qui permet d'obtenir des températures élevées et donc de bons rendements thermodynamiques. Leur inconvénient tient au fait que les flux d'énergie, qui sont très intenses, engendrent des problèmes en matière de tenue des matériaux du récepteur. Afin d'assurer la continuité de son fonctionnement, les capteurs de ce type doivent se déplacer sur deux axes, ce qui leur permet de suivre le mouvement du soleil (voir les photos 1 et 2).

Les deux autres familles de capteur ont recours à une forme cylindro-parabolique. Dans ce cas, la concentra-

tion du rayonnement solaire ne se fait plus, en un point unique, mais sur une ligne : les flux et les températures sont donc plus faibles que dans la première famille de capteurs. Le mouvement du capteur ne se fait plus que sur un seul axe (voir les photos 3 et 4).

Parmi les fluides caloporteurs utilisés, on distingue (dans leur ordre chronologique d'utilisation, depuis les premières centrales des années quatre-vingts) :

- les sels fondus, constitués de mélanges binaires ou ternaires de nitrate (ou nitrite) de sodium/potassium, qui présentent l'avantage de pouvoir également servir au stockage thermique. S'ils permettent d'atteindre des températures supérieures à 500°C, ils ont toutefois les inconvénients d'être solides à la température ambiante (ce qui nécessite leur fusion initiale) et de figer à des températures de l'ordre de 200°C, ce qui impose leur maintien en température durant toute la durée de vie de la centrale. En tant que fluide caloporteur, ces sels ne sont généralement utilisés que dans les tours, mais ils servent au stockage thermique dans tous les types de centrales. Bien qu'utilisés très couramment dans beaucoup d'industries et ne présentant pas de réelle dangerosité, il semble que leur classification puisse susciter



Photo 2.

Les « dish » sont des paraboloïdes individuels dont le foyer qui reçoit le récepteur est solidaire du capteur et se déplace avec lui.

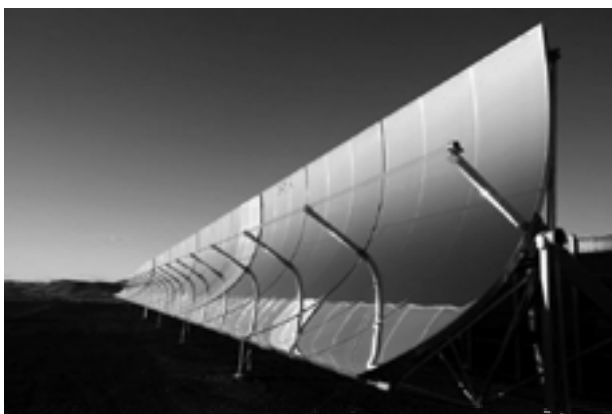


Photo 3.

Le « parabolic trough » qui utilise des miroirs disposés sur des cylindres à section parabolique dont le foyer est constitué d'un tube récepteur se déplaçant en même temps que le miroir.



Photo 4.

Les miroirs de Fresnel qui reprennent le principe ci-dessus mais en ayant découpé la parabole en éléments parallèles tous disposés au sol et tournant individuellement tandis que le tube récepteur est lui fixe.

des interrogations, au regard de la réglementation française.

- les huiles thermiques, utilisées majoritairement dans les *parabolic troughs*, fonctionnent à des températures de l'ordre de 400°C. Ces huiles sont de bons calorporteurs, mais elles sont inflammables et elles présentent un risque de toxicité, surtout si on les fait circuler sur de grandes surfaces.
- l'eau ou la vapeur : pour éviter les inconvénients mentionnés plus haut, de nouveaux développements sont aujourd'hui en cours, en matière de génération directe de vapeur : cela consiste à réchauffer de l'eau pressurisée, à la vaporiser, (puis éventuellement à surchauffer la vapeur produite), comme on le fait dans une chaudière classique. Suivant la nature du récepteur, on doit prendre en compte un certain nombre de contraintes : dans les tours, les flux du rayonnement solaire sont très importants et ils peuvent varier très brutalement, au passage d'un nuage, ce qui peut être source d'instabilité et de fortes contraintes thermiques ; dans les fours

cylindro-paraboliques ou les fours à lentilles de Fresnel, la circulation horizontale du fluide peut conduire à une ségrégation du mélange eau + vapeur, entraînant, là encore, des dysfonctionnements.

- enfin, il y a le cas particulier des gaz (voir la figure 1) : on réchauffe un gaz (hydrogène, hélium, air) : ce gaz entraîne un moteur thermodynamique (de type Stirling) placé au foyer d'un *dish* entraînant lui-même un alternateur, ou on réchauffe de l'air dans une centrale à tour, qui sera introduit au foyer d'une turbine à gaz comme, dans le cas du projet « Pégase » (Production d'Electricité par turbine à Gaz) développé sur le site français de la centrale Thémis de Targassonne (Pyrénées-Orientales).

#### COMPARAISON ENTRE LE SOLAIRE À CONCENTRATION ET LES AUTRES ÉNERGIES SOLAIRES

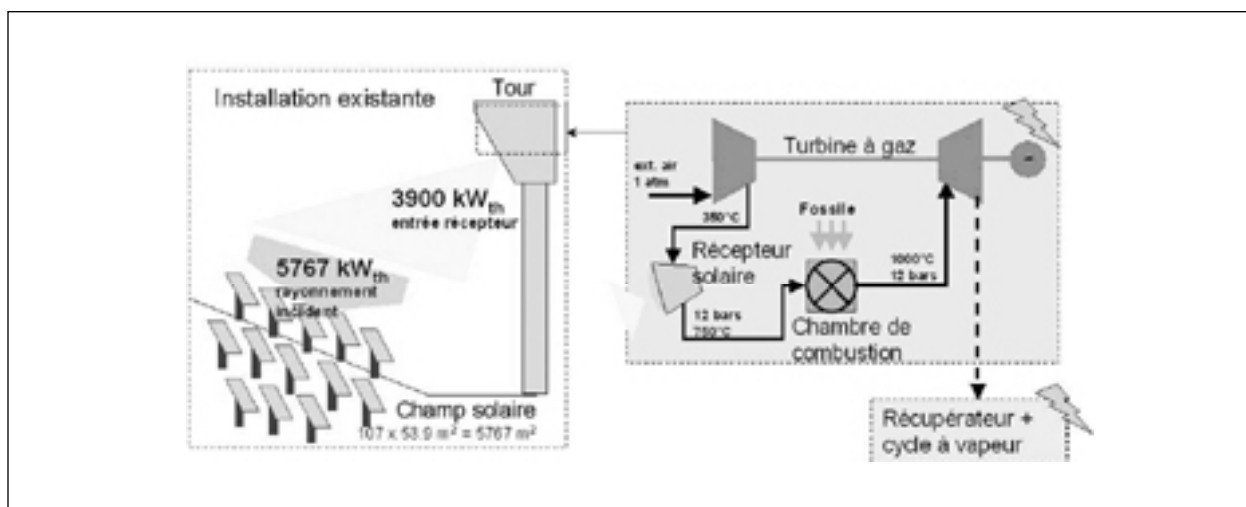


Figure 1 : Pegase : Système hybride solaire/fossile à cycle à gaz (et CC).

Il peut être intéressant de comparer le solaire à concentration, qui est moins connu (dans notre pays) que le solaire thermique ou photovoltaïque, à ces autres technologies.

On verra que ces différentes technologies ne sont pas concurrentes entre elles, mais qu'elles sont au contraire complémentaires. Chacune a sa raison d'exister et il est d'une saine prudence que de permettre à chacune de se développer et d'atteindre le degré de maturation technologique, qui lui permettra d'apporter sa contribution aux problèmes énergétiques que l'humanité rencontre déjà de nos jours.

Les panneaux solaires thermiques sont essentiellement destinés à des applications individuelles de chauffage. Les panneaux photovoltaïques, développés initialement pour des applications individuelles, peuvent être assemblés afin de constituer des centrales de puissance. A contrario, le solaire à concentration est généralement destiné à des applications de forte puissance (à l'exception du cas particulier du *dish* équipé d'un moteur Stirling, que nous avons mentionné plus haut).

Dans la suite de notre comparaison, nous allons nous focaliser sur le photovoltaïque, puisque seule cette technologie peut parfois entrer en compétition avec le solaire à concentration.

La première différence entre les deux techniques réside dans la qualité du rayonnement récupéré. Les capteurs solaires photovoltaïques (comme les capteurs thermiques) capturent non seulement le rayonnement direct du soleil, mais aussi le rayonnement diffus, qui, dans nos régions tempérées, représente une partie non négligeable.

Le solaire à concentration ne capte que les rayons directs, il est donc plus particulièrement destiné aux zones de la ceinture solaire (représentée sur la carte ci-après) qui entoure la mer Méditerranée.

Dans ces régions, la température de l'air ambiant peut être très élevée, le jour : il faut savoir que la perfor-

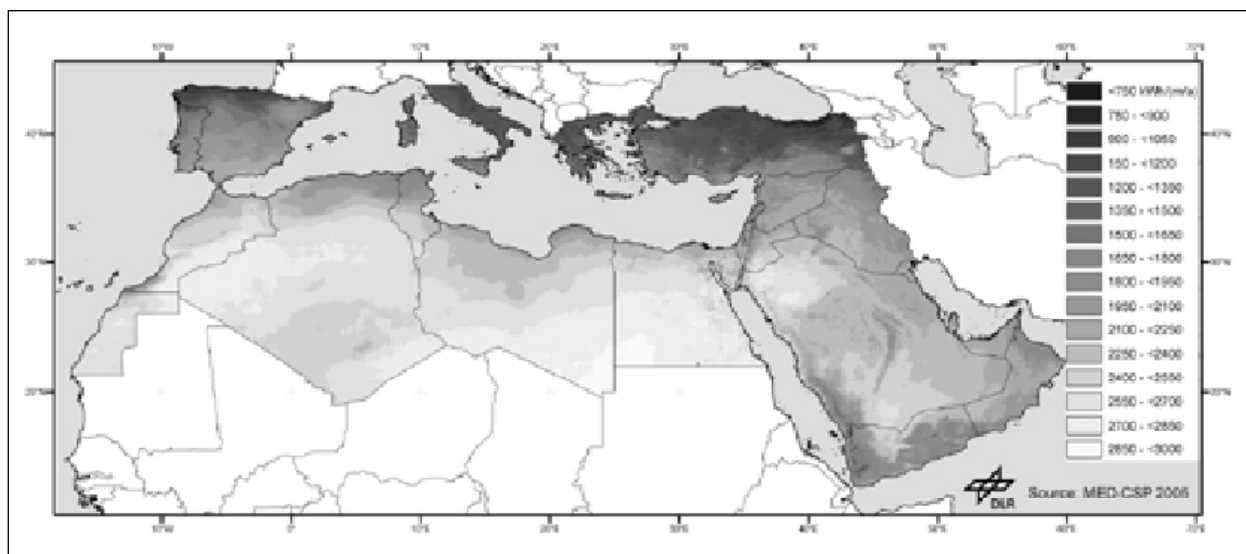
mance énergétique des panneaux photovoltaïques décroît avec l'augmentation de la température.

C'est pourquoi on va plutôt rencontrer des centrales photovoltaïques en Europe, qui représente l'essentiel de leur marché mondial, alors que les centrales à concentration se retrouveront essentiellement dans les déserts américains ou dans le Sud de l'Espagne, et qu'elles ont également vocation à être construites dans les pays de l'Afrique du Nord, du Moyen-Orient, en Inde, en Chine, en Australie, etc.

Ce sera donc cette dernière technologie qui sera la plus utilisée dans l'ambitieux programme du Plan Solaire Méditerranéen, dont une variante est déclinée dans le concept Désertec. Ce plan prévoit une interconnexion électrique de tous les pays du pourtour méditerranéen, de façon à produire, dans les zones à fort rayonnement solaire, une énergie non polluante et à la distribuer dans toutes les zones concernées par cette interconnexion (et donc, y compris en Europe du Nord).

La deuxième différence réside dans l'énergie produite : le photovoltaïque ne produit que de l'électricité, alors que le solaire à concentration produit de la chaleur à haute température, qui peut être transformée en électricité au moyen d'une turbine à vapeur, mais qui peut aussi être utilisée directement, soit en appoint, dans une centrale existante, soit en appoint, sur un site industriel diminuant, par cet apport solaire, le besoin en combustible fossile normalement utilisé. Dans ce cas, les investissements sont réduits au seul champ solaire, le reste de l'installation continuant à être utilisé. Cela permet une transition douce vers l'énergie renouvelable (car il est illusoire de penser que l'on va pouvoir remplacer immédiatement la totalité de l'énergie fossile).

De cette différence découle également le rapport prix/puissance. Les panneaux photovoltaïques étant déjà fabriqués dans des usines de forte capacité, le prix d'une installation est pratiquement proportionnel à sa taille. Alors qu'en solaire à concentration, seul le champ



Carte.

solaire est d'un coût proportionnel à sa taille, la salle des machines bénéficiant, comme dans les centrales classiques, d'un fort effet de taille. Le solaire à concentration est donc plutôt destiné aux installations de puissance élevée.

La troisième différence réside dans son mode d'exploitation. Le photovoltaïque ne nécessite que peu (voire pas du tout) de personnel d'exploitation, tandis que le solaire à concentration, à l'instar de n'importe quelle centrale thermique, en a besoin. Selon les circonstances, cette différence peut être vue comme un avantage ou un inconvénient, suivant que l'on veut mettre en valeur la facilité d'exploitation ou la sauvegarde de l'emploi local. En tout état de cause, cette différence conduit, là encore, à réserver le solaire à concentration aux installations d'une puissance conséquente.

La quatrième différence réside dans le mode de stockage de l'énergie. Alors que pour le photovoltaïque, le stockage de l'électricité ne se fait que dans des batteries (la production d'hydrogène, bien qu'envisageable, n'est pas actuellement une solution économique), il est possible de stocker directement l'énergie thermique récupérée par une installation solaire concentrée dans des stockages de sel fondu, d'eau pressurisée, de béton ou de céramiques, et cela permet d'ajuster la production au besoin, en particulier lors des pointes de consommation.

La cinquième différence réside dans le mode de production des éléments de la centrale. Une installation photovoltaïque met en œuvre des composants qui ne peuvent être fabriqués que dans des usines dédiées, nécessitant des investissements lourds. Aujourd'hui, alors que la demande est dominée par l'Europe, qui, en 2008, représentait 80 % du marché mondial, l'offre est dominée par les pays asiatiques, qui représentent 65 % de l'offre mondiale, le seul pays Européen visible sur le marché étant l'Allemagne, avec 24 % en produits finis (dont une partie est constituée d'éléments provenant de pays asiatiques). Pour sa part, la France a une production non significative (<1 %). Le solaire à concentration, au contraire, met en œuvre des technologies traditionnelles, que la France a à sa disposition (ingénierie des procédés thermiques, verre, construction métallique classique, turbines, etc.), mais qui sont également partiellement disponibles dans les pays qui vont recevoir les installations, ce qui permet de les impliquer fortement dans les processus de construction. De plus, le mode de production des installations du photovoltaïque étant plus énergivore que celui des installations de solaire à concentration, le bilan carbone du photovoltaïque est plus défavorable.

Bien entendu, d'autres différences existent, notamment en termes de coût ou de surface au sol nécessaire. Mais on ne peut en tirer de généralités, car cela est fortement influencé par l'ensoleillement et la latitude du lieu d'installation. De plus, on a parfois tendance à comparer les coûts d'investissement ramenés à la puissance de crête disponible, mais

cette comparaison n'est pas valable, car, pour une même puissance de crête installée, le productible annuel du solaire concentré est très supérieur (entre 1,5 fois, sans stockage, et jusqu'à 5 fois, en fonction de la capacité de stockage).

Si l'on compare le productible annuel ramené au foncier, il est du même ordre, sous les ensoleillements du Sud de la France, puis il penche en faveur du solaire concentré, sous les forts ensoleillements des zones désertiques. En termes de coût, la filière concentrée n'a pas encore bénéficié des effets de masse, dont a pu bénéficier la filière photovoltaïque, laquelle, sous l'impulsion de l'Allemagne puis de l'Espagne, a décollé depuis une dizaine d'années.

## LA POSITION DE LA FRANCE

La France a eu un rôle de leader dans le domaine du solaire concentré, soit au travers de la recherche (dont l'emblème est encore, à ce jour, le four solaire d'Odeillo, exploité par le CNRS PROMES), soit au travers de la centrale Themis, construite par EDF dans les années quatre-vingts, avec une technologie qui reste, en 2009, la technologie de référence en matière de centrales à tour, du fait des possibilités de haut rendement qu'elle offre.

La centrale Thémis, située à Targassonne (en Cerdagne, dans les Pyrénées-Orientales) a été couplée au réseau EDF en 1983 (voir la figure 2 de la page suivante).

Un champ, constitué de 201 héliostats, d'une surface unitaire de 53,7m<sup>2</sup> (10 800 m<sup>2</sup> de miroirs), concentrait le rayonnement solaire sur une chaudière à sel fondu située au sommet d'une tour (d'une hauteur totale de 100 m).

La chaudière était parcourue par du sel fondu (température d'entrée de 250°C, température de sortie de 450°C), qui servait à la fois de fluide caloporteur et de stockage. Le stockage thermique était assuré par les 550 tonnes de sel Hitec (un mélange de nitrite et de nitrate de sodium et de potassium), qui équivalait à 5 heures d'ensoleillement.

La puissance nominale de la turbine était de 2,5 MWé (mégawatts électriques).

La centrale a été arrêtée en 1986, car, à l'époque, aucune incitation financière ne permettait de compenser le différentiel de coût de production par rapport aux procédés traditionnels.

Dans la même période (1982-1986), le *Department of Energy* (DoE) américain démarrait, dans le désert des Mojaves, la centrale SOLAR 1 (d'une puissance de 10 MWé), basée sur une technologie uniquement eau/vapeur.

Ce site a été transformé (1995-1999) en SOLAR 2 : la principale modification a été le passage à une technologie sel fondu similaire à celle de la centrale française Thémis.

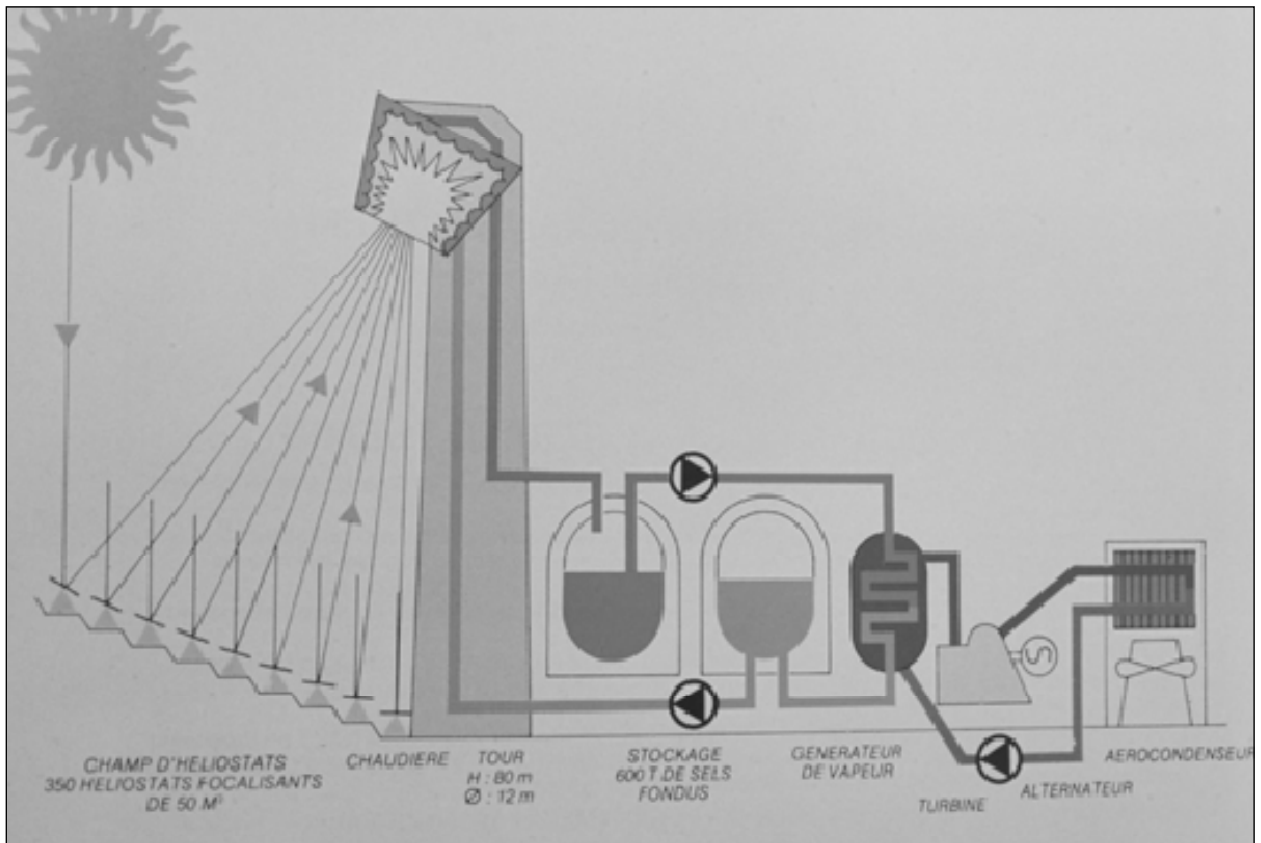


Figure 2 : Principe de fonctionnement.

Actuellement, les Etats-Unis ont des projets de centrales, de puissances allant de 100 MW<sub>e</sub> à 300 MW<sub>e</sub> (Ivanpah 1, eSolar, Ivanpah 2...).

Pour sa part, l'Espagne, après avoir expérimenté en 1981 une centrale à tour (technologie sodium) à Almeria, joue, dans ce domaine comme dans les autres domaines du solaire concentré, un rôle de leader : après avoir mis en service PS 10 en 2006 (10 MW<sub>e</sub>) et PS 20 en 2009 (20 MW<sub>e</sub>), toutes deux basées sur la technologie eau/vapeur, elle construit actuellement, à Séville, Solar Tres (50 MW<sub>e</sub>), qui est basée sur la technologie du sel fondu (15 heures de stockage).

On voit donc que les centrales à tour, qui furent historiquement construites les premières, sont en plein renouveau.

La technologie aujourd'hui « mature » est le cylindro-parabolique utilisant de l'huile thermique comme fluide caloporteur (et éventuellement du sel fondu, pour le stockage).

Les pays leaders dans ces technologies sont l'Espagne et les Etats-Unis (que ce soit pour les centrales installées ou en construction) et l'Allemagne (pour la fourniture des composants). En particulier, les Etats-Unis viennent d'annoncer qu'ils faisaient des énergies renouvelables une priorité.

Les pays du Golfe arabo-persique ont commencé un programme ambitieux, et des réalisations existent également en Afrique du Nord.

A la fin 2008, il y avait, dans le monde, toutes technologies de solaire thermodynamique confondues, 560 MW<sub>e</sub> en service et 984 MW<sub>e</sub> en construction.

Les projets annoncés (non compris le Plan Solaire Méditerranéen ou le projet Desertec) représentaient environ 7 500 MW<sub>e</sub>.

Même si la France a cessé tout investissement dans le solaire à concentration, on voit qu'il n'est pas trop tard pour revenir sur ce marché, qui n'en est qu'au début de son développement.

Si nous voulons éviter de reproduire ce qui s'est passé dans l'éolien ou le photovoltaïque, à savoir la nécessité d'importer, pour notre propre consommation, l'essentiel du matériel installé sur le territoire national et l'incapacité d'exporter nos propres produits, nous devons mettre à profit l'expérience acquise et nous donner les moyens de redévelopper cette industrie. En effet, nous disposons de tout le savoir-faire nécessaire, des références ainsi que des industriels prêts à relever le défi. Il faut maintenant une volonté politique pour actualiser ces références et faire en sorte que la France devienne un acteur incontournable du Plan Solaire Méditerranéen.

Une excellente opportunité de construire une nouvelle unité de démonstration aurait pu être l'appel d'offre CRE « une centrale solaire par région ». Mais sa rédaction est telle que le territoire métropolitain est réservé au bénéfice exclusif du solaire photovoltaïque, avec la possibilité d'offrir 10 MW<sub>e</sub> dans la majorité des régions françaises, alors que le solaire à concentration ne peut être proposé, quant à lui, que pour les

DOM et la Corse, avec une limitation à 5 MWé. Or, nous l'avons vu plus haut, le solaire concentré ne peut utiliser le rayonnement diffus, très présent dans les îles du fait de la nébulosité. Et, difficulté supplémentaire, les DOM sont exposés aux cyclones, ce qui conduit à de coûteux renforcements des structures supportant les miroirs.

Espérons que de nouveaux appels d'offres permettront de combler cette lacune !

---

## LES AMBITIONS DE CNIM

Le Groupe CNIM ([www.cnim.fr](http://www.cnim.fr)) conçoit et réalise des ensembles industriels « clefs en main » à fort contenu technologique, et il propose des prestations de recherche/ expertise par le biais de Bertin, sa filiale.

Ses principaux domaines d'action sont : l'environnement, les systèmes mécaniques complexes pour la défense et l'industrie, les transports, l'énergie et les sciences du vivant.

Groupe de taille intermédiaire (3 500 personnes), résolument tourné vers l'exportation (80 % de parts de commandes en 2008), CNIM s'intéresse depuis

toujours aux énergies renouvelables, en particulier à la biomasse, mais également au solaire à concentration, puisque c'est CNIM, qui, dans les années quatre-vingts, a conçu et construit la chaudière à sel fondu de Thémis.

Lorsque le CNRS, avec le soutien du Conseil général des Pyrénées-Orientales, a récemment décidé de lancer sur le site de Thémis l'ambitieux programme de R&D « Pégase », le groupe CNIM s'est impliqué dans cette démarche en participant activement à ce programme.

Fort de son expérience de construction « clefs en main » de centrales électriques dans la gamme de puissances 5 -100 MW (centrales de valorisation énergétique de déchets ou de biomasse), de son expérience de mécanicien et de son savoir-faire en matière d'expertise et de recherche, CNIM a décidé de créer, à la fin 2008, sa Division « Energie Solaire » afin de se positionner rapidement en tant que fournisseur de centrales solaires à concentration « clefs en main ».

Actuellement, CNIM développe plusieurs projets de centrales, tant en France qu'à l'étranger, et il noue des partenariats avec des industriels français dans les domaines des miroirs et des groupes turbo-alternateurs, afin de devenir un acteur important du Plan Solaire Méditerranéen.