

CHIFFRES CLÉS

Puissance installée

0,75 MW

(uniquement pour des démonstrateurs)

La programmation pluriannuelle de l'énergie ne contient aucun objectif explicite dédié à la filière solaire thermodynamique

Projet eLLO en cours de construction (Pyrénées-Orientale – Occitanie).

Crim

Le photovoltaïque n'est pas le seul mode de valorisation électrique possible du rayonnement solaire. L'énergie solaire thermodynamique peut proposer des solutions pertinentes, notamment dans des zones à fort ensoleillement. La France, pionnière historique de la filière, a des ambitions sur le marché international du secteur qui ne se limitent pas à la seule production d'électricité.

95

FILIÈRE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE

Observ'ER

Le Baromètre 2017
des énergies renouvelables
électriques en France

UNE ALTERNATIVE AU PHOTOVOLTAÏQUE

Le solaire thermodynamique (ou CSP pour *concentrated solar power*) est l'une des valorisations du rayonnement solaire direct. Comparé au photovoltaïque, il est plus polyvalent dans ses usages. La technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température (entre 200 et 500 °C) et produire de la vapeur qui sera valorisée sous forme d'électricité, de froid, de chaleur industrielle ou dans des applications plus spécifiques comme le dessalage d'eau de mer.

Un des principaux avantages du solaire thermodynamique est qu'il peut produire de l'électricité en continu grâce aux systèmes de stockage thermique auxquels il peut être associé. Cela permet de couvrir des pics de consommation situés avant le lever ou après le coucher du soleil. L'autre avantage est l'hybridation. Le principe est d'associer une centrale solaire à une autre source de chaleur issue d'énergie fossile ou de la biomasse, garantissant ainsi une production continue. Cela autorise des systèmes de cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur) qui peuvent améliorer la rentabilité des projets. L'hybridation permet ainsi de disposer de capacités fermes, prédictibles, et non de capacités uniquement relatives, reposant sur le taux et la qualité de l'ensoleillement.

Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent une grande variété de systèmes disponibles tant au niveau de la concentration du rayonnement, du choix du fluide caloporteur que du mode de stockage (voir schéma n° 1).

Au début des années 1980, la France était pionnière dans le domaine du solaire à concentration avec l'inauguration de la cen-

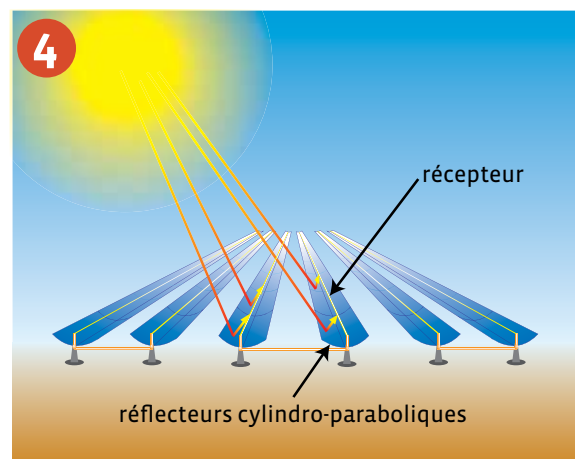
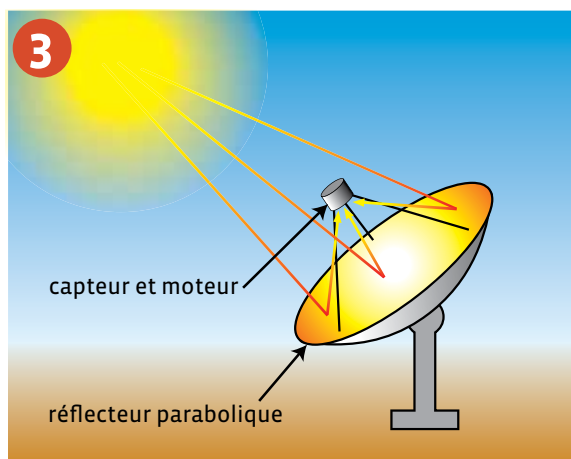
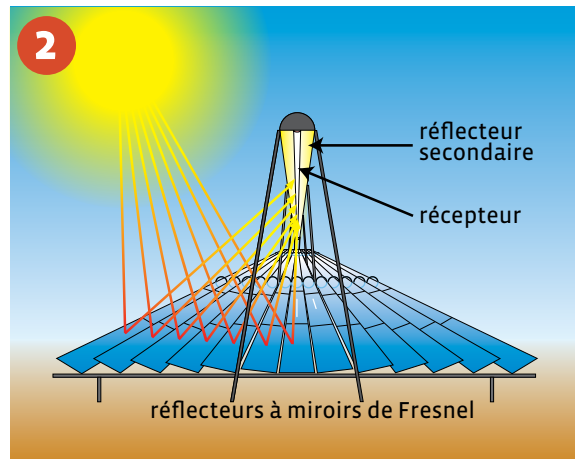
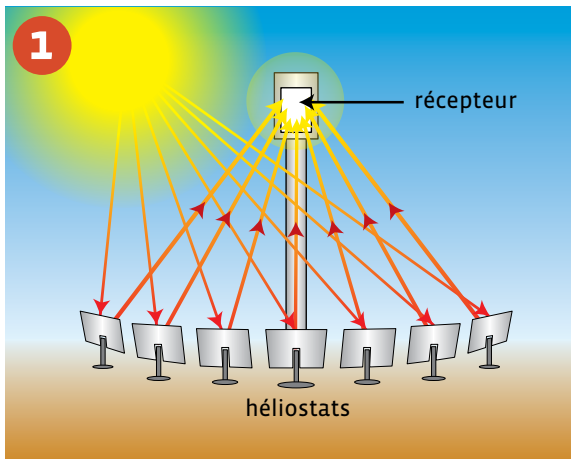
trale à tour de Thémis à Targassonne. Cette réalisation était alors une référence internationale qui venait récompenser les travaux menés depuis une quinzaine d'années sur le four solaire d'Odeillo. Cependant, ces premières expériences ne débouchèrent pas sur une phase industrielle et la filière française entra alors en hibernation pendant une vingtaine d'années. Ce n'est qu'au milieu des années 2000 qu'un renouveau va se faire, aiguillonné par la croissance du marché mondial portée par les États-Unis et l'Espagne.

La relance du solaire thermodynamique en France s'est déroulée en plusieurs étapes. En 2005, après la reconversion de Thémis en plateforme de recherche et développement, une réflexion est initiée sous l'égide de l'Ademe pour déboucher en 2012 sur une feuille de route pour la filière. Parmi les objectifs définis figure la réalisation de démonstrateurs pour les différentes technologies sur lesquelles se sont positionnés les industriels français. Dans la foulée, un appel à manifestation d'intérêt avait été organisé et quatre projets avaient été retenus. 2012 avait également vu le lancement d'un appel d'offres d'électricité solaire, encadré par la CRE, comportant un volet solaire thermodynamique. Deux dossiers avaient été alors retenus : le projet corse d'Alba Nova 1, porté par Solar Euromed, pour 12 MW, et celui de la centrale solaire de Llo, pour 9 MW, porté par le groupe Constructions industrielles de la Méditerranée (Cnim) en Languedoc-Roussillon. La stratégie suivie était alors de constituer, au travers de ces démonstrateurs, la vitrine du savoir-faire français afin de pouvoir concourir aux appels d'offres internationaux.

Schéma n° 1

Les quatre technologies principales de production d'électricité d'origine solaire par voie thermodynamique

Source : Observ'ER 2017



- 1 Les héliostats et centrales à tour** : des centaines, voire des milliers de miroirs (héliostats) équipés d'un système de suivi du soleil (deux axes de rotation) concentrent les rayons du soleil sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.
- 2 Les collecteurs à réflecteurs linéaires de Fresnel** sont composés d'une succession de miroirs plans qui suivent la courbe du soleil (un axe de rotation) et redirigent les rayons sur un tube absorbeur (récepteur). L'utilisation de réflecteurs non incurvés permet d'abaisser considérablement le coût, comparativement aux collecteurs cylindro-paraboliques, malgré un rendement inférieur.
- 3 Les disques paraboliques**, en forme d'assiettes, suivent la course du soleil (deux axes de rotation) et concentrent les rayonnements vers un récepteur situé au point focal de la parabole. Au point focal se trouve une enceinte à l'intérieur de laquelle un gaz entraîne un moteur Stirling. Peu d'industriels dans le monde portent cette technologie.
- 4 Les réflecteurs cylindro-paraboliques**, miroirs en forme d'auges, concentrent les rayons du soleil vers un tube (récepteur) placé sur la ligne focale.

Le programme Solar-era.net

Solar-era.net est un programme européen de cofinancement ouvert aux filières solaires photovoltaïques et à concentration (CSP). Son objectif est de renforcer les filières industrielles européennes au travers des techniques innovantes de fabrication, de développement de nouveaux produits et services ainsi que par une aide à l'intégration de ces technologies dans le système énergétique. Onze pays sont partenaires et le programme repose sur un réseau d'agences nationales de l'énergie ou de la recherche. La France y est présente et est représentée par l'Ademe. Le dispositif se déroule en deux étapes. Dans un premier temps, des projets nationaux sont sélectionnés par l'agence nationale membre du réseau en fonction de ses priorités thématiques. Pour la France, le solaire thermodynamique est ainsi éligible pour des projets travaillant sur la réduction des coûts de production et sur l'intégration des installations au système électrique.

Dans un deuxième temps, une évaluation de l'ensemble des projets préselectionnés est effectuée par des évaluateurs indépendants afin de déterminer la liste des opérations retenues in fine pour un soutien financier. Ce soutien se compose d'une aide fixée par l'agence nationale, en fonction de ses propres barèmes, dont une partie des fonds provient de l'Union européenne. Ainsi, concernant le dernier programme en date qui s'est ouvert du 5 décembre 2016 au 20 février 2017, les pourcentages d'aide variaient de 25 à 70 % du coût total du projet en fonction du profil des porteurs (public, privé, grand groupe ou PME) et de l'orientation de l'action (recherche appliquée ou fondamentale). L'enveloppe budgétaire de l'Ademe pour ce round était alors de 300 000 euros. Un nouvel appel à projet Solar-era.net devrait être ouvert en début d'année 2018.

www.solar-era.net

L'autre élément fort des choix faits au cours de ces années a été, pour les acteurs français de la filière, de se spécialiser sur la technologie des concentrateurs linéaires de Fresnel. Pour la production d'électricité, cette technologie est traditionnellement concurrente de celle des capteurs cylindro-paraboliques. Elle a l'avantage d'être moins chère et moins sophistiquée, mais elle offre un rendement moyen inférieur à la technologie cylindro-parabolique. Autre atout important, les concentrateurs solaires peuvent être utilisés dans

des applications variées qui ne se cantonnent pas à la production d'électricité. Ainsi, ces technologies sont intéressantes pour obtenir de la vapeur à température intermédiaire pour des applications dans l'industrie ou dans des procédés de désalinisation d'eau de mer. En 2011, Areva avait décroché un important contrat à Kogan Creek en Australie, où l'énergie solaire thermique devait améliorer le rendement d'un site de production d'électricité à par-

tir de charbon en injectant de la vapeur dans le process. Mais le retrait d'Areva du solaire thermodynamique a empêché l'aboutissement du projet.

SIX ANS APRÈS LA RELANCE DE LA FILIÈRE, QUEL BILAN ?

Quel bilan tirer de la relance de la filière thermodynamique en France initiée en 2011-2012 ? Sur les six projets retenus par l'AMI de l'Ademe ou par la procédure d'appel d'offres de la CRE, seuls trois ont été achevés ou sont en passe de l'être. Les deux opérations terminées sont celles de Microsol et d'eCare. La première, portée par Schneider Electric, a débouché sur un démonstrateur associant PV et CSP installés sur le site du CEA à Cadarache. La partie solaire thermodynamique n'a cependant pour l'instant pas débouché sur des possibilités de réplifications. Le second projet, porté par la Cnim, s'est achevé après des travaux de R&D concluants sur le prototype de la Seyne-sur-Mer et dans la perspective de la réalisation du troisième projet, qui est l'opération la plus importante en envergure : il s'agit de la centrale solaire de Llo. Les trois autres dossiers retenus ont été abandonnés. Ainsi le projet Stars proposé par Areva, et sélectionné dans le cadre des AMI de l'Ademe en 2012, a été stoppé suite à l'annonce en 2014 du retrait de l'industriel du domaine du solaire thermodynamique. Autres pistes prometteuses non abouties, les sites développés par la société Solar Euromed. Après la liquidation de la société en 2016, le projet d'Alba Nova et le démonstrateur de tube absorbeur à haute température, retenu parmi les quatre dossiers de l'AMI de 2012, ont tous les deux été abandonnés. Reste donc le projet de Llo comme principal démonstrateur solaire thermodynamique développé en France au cours des

dernières années. Il amorce ses dernières phases avant une mise en service prévue pour courant 2018. Basé sur la technologie de Fresnel, le site disposera de plus de 95 000 miroirs (153 000 m²) et de 9 ballons accumulateurs de vapeur proposant 4 heures de stockage d'énergie. La partie électrique devrait permettre la production d'environ 20 GWh par an. Suncnim signale, par ailleurs, que la centrale sera « éco-conçue et 100 % recyclable ».

Initialement, le site de Llo devait être un démonstrateur destiné à étoffer la vitrine technologique française en matière de solaire thermodynamique pour produire de l'électricité. Avant même la mise en service de l'installation, la centrale solaire a déjà apporté son lot de retour d'expérience et a notamment contribué à améliorer les matériaux et les éléments utilisés. Cependant, le site de Llo, avec 9 MWe et ses capacités limitées de stockage de l'énergie (autour d'une heure), ne correspond pas aux standards du marché des grosses installations de production d'électricité qui peuvent se réaliser au Maroc où en Afrique du Sud. Dans ces pays, ce sont davantage des sites d'une puissance allant de 50 à 150 MW qui sont recherchés, reposant sur des technologies de centrales à tour et utilisant des sels fondus pour obtenir des capacités de stockage de très longue durée (jusqu'à 7 heures). Le démonstrateur de Llo ne sera cependant pas inutile. En plus des enseignements qu'il a déjà livrés, il faut se rappeler de la souplesse de la technologie de Fresnel. Son exploitation reste tout à fait pertinente pour des usages thermiques, notamment pour de la production de vapeur dans des process industriels. Cette piste est d'ailleurs, selon Alain Ferrière du laboratoire Promes (voir "Trois question à"),

La climatisation solaire, l'autre facette du solaire thermique à concentration

Le solaire à concentration n'est pas uniquement voué à produire de l'électricité. La société Helioclim, créée en 2011 et plusieurs fois primée pour ses solutions de climatisation à partir d'énergie solaire, est actuellement en phase d'achèvement d'un démonstrateur préindustriel qui alimentera en chaleur et en froid le centre commercial Leclerc de Saint-Raphaël (83) grâce à l'énergie du soleil. Le système est constitué d'une machine à absorption réversible permettant de produire de l'eau glacée ou chaude, alimentée par un système de capteurs solaires thermiques à concentrateurs. La solution comporte également des dispositifs de stockage d'énergie et d'appoint en énergie de relève. Côté capteurs, un champ de 130 capteurs Heliolight 4800, de type cylindro-parabolique, sera installé en toiture du centre commercial pour alimenter une machine de 250 kW froid. Ces capteurs, en verre argenté, se distinguent de la concurrence en ne présentant pas de vieillissement de la surface de concentration, ce qui permet un maintien des rendements dans le temps. Les miroirs seront posés sur une structure composite légère qui permettra son installation sur la toiture du centre. La mise en service est prévue pour l'été 2018, et ce sera alors l'une des plus grandes puissances froid solaires installées en France. L'objectif est, à terme, de dupliquer cette solution en France ou à l'export. Cette réalisation s'intègre dans le cadre du projet Scrib (Solaire de climatisation réversible intégré au bâti) cofinancé par l'Ademe et les Investissements d'Avenir.

la meilleure voie à suivre pour tenter une relance de la filière française.

QUELLE STRATÉGIE POUR LA FILIÈRE ?

Au moment de la relance de la filière solaire thermodynamique française, la stratégie nationale visait à développer un savoir-faire sur la base de projets portés à la fois par des petites PME et des grands groupes (Schneider Electric, Areva). Soutenu par un réseau de laboratoires de recherche, qui reste actif sur le domaine (voir dernière partie de la fiche), l'objectif était de stimuler une filière industrielle française et d'accompagner sa montée en puissance. Cependant, le retrait de plusieurs acteurs du secteur (grands entreprises comme PME) et la difficulté de faire aboutir les démonstrateurs laisse

l'image d'une filière industrielle nationale qui reste encore largement à structurer. Sur la partie électrique, les acteurs industriels sont trop rares (Suncnim et Alsolen) et les grands groupes, tels que EDF où Engie, semblent préférer se placer sur leur cœur de métier au sein de grands consortium internationaux plutôt que de chercher à faire émerger un savoir-faire technologique spécifique au solaire thermodynamique. Concernant les valorisations thermiques, la situation est différente. Plusieurs entreprises françaises gagnent régulièrement des appels d'offres dans des projets solaires à concentrations sans avoir une seule installation sur le sol national. C'est

le cas de la société Degremont, qui utilise sa technologie solaire thermodynamique dans des procédés de dessalement d'eau de mer. Pour ces applications, la vitrine du savoir-faire français existe et elle est représentée par l'ensemble des réalisations faites à travers le monde. C'est un peu la même chose pour l'utilisation de vapeur solaire dans des procédés industriels.

UN MARCHÉ INTERNATIONAL TRÈS COMPÉTITIF

Au niveau mondial, la filière solaire thermodynamique a déjà fait un bond entre 2005 et 2016 en passant de 355 MW installés à 4,7 GW. Cette croissance a été essentiellement tirée par l'Espagne (2,3 GW) et les États-Unis (1,7 GW). Selon CSP Today, un cabinet d'étude anglais spécialisé dans le secteur, les projections d'évolution du marché font état d'un parc installé qui se situerait entre 20 et 22 GW en 2025. À plus long terme, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit une contribution du solaire thermodynamique à hauteur de 11 % de la production électrique mondiale en 2050. Cette prévision, qui date de septembre 2014, est restée inchangée par rapport à l'objectif de la feuille de route 2010. Avec plus de 1 000 GW de capacité installée dans ce scénario, les centrales associées ou non à des systèmes de stockage de l'énergie pourraient assurer une production annuelle de 4 770 TWh, soit l'équivalent de la consommation des États-Unis.

Aujourd'hui, les principaux marchés dans le secteur sont l'Afrique du Sud, le Maghreb, le Chili et la Chine. Parmi les pays les plus ambitieux figure le Maroc, où le programme Noor prévoit le développement de centrales solaires d'une capacité totale de 2 000 MW d'ici 2020 et devrait permettre une économie annuelle des émissions de

gaz à effet de serre équivalente à 3,7 millions de tonnes de CO₂. Dans l'optique de ce programme, la filière solaire marocaine se met en place sous les auspices de l'agence marocaine de l'énergie solaire (Masen), qui pilote la stratégie. Cinq sites ont été présélectionnés pour accueillir les futures installations : Ouarzazate, Midelt, Laâyoune, Boujdour et Tata. Le complexe de Ouarzazate, d'une étendue de 3 000 hectares et d'une capacité de 580 MW, est le plus grand au monde. Il sera constitué de quatre centrales solaires multitechnologiques (CSP cylindro-parabolique, CSP tour et photovoltaïque), associées à une plateforme de recherche et développement qui s'étend sur plus de 150 hectares. La France est associée au plan Noor, notamment dans le domaine de la recherche et développement.

Masen a signé à l'été 2015 un partenariat tripartite « *d'ambition mondiale* » avec le Commissariat français à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et le conglomérat industriel français Alcen. Les accords visent particulièrement la technologie utilisant les miroirs de Fresnel avec l'entrée de Masen au capital d'Alsolen, filiale d'Alcen. L'agence marocaine a déboursé 30 millions d'euros pour acquérir 50 % de l'entreprise. L'objectif est de développer et commercialiser des centrales thermodynamiques utilisant comme fluide caloporteur de l'huile et dotées d'un stockage thermique direct à thermocline en roche. Ces centrales peuvent produire, selon les besoins, de l'électricité (via un cycle organique de Rankine), de la chaleur industrielle et/ou du froid (machine à absorption) et/ou du dessalement d'eau de mer (par distillation multieffet). Point important de la collaboration, pour encourager le transfert de savoir-faire, la réalisa-

tion des futures centrales sera localisée en grande partie au Maroc.

Plus récemment, l'agence Masen a conclu en juillet 2016 un accord de collaboration de 1,5 million d'euros avec le CEA afin d'étudier le vieillissement des centrales solaires CSP et de développer une usine de dessalement à énergie solaire. Autre acteur français engagé, la start-up franco-américaine HeliosLite a pu bénéficier des financements de l'Iresen (l'Institut de recherche en énergie solaire et énergies nouvelles, marocain) pour tester des trackers sur la plateforme solaire Green Energy Park, à Benguerir. La technologie française a des atouts à faire valoir mais la concurrence est rude. La première vague des gros appels d'offres lancés dans le solaire n'a pas été favorable aux opérateurs tricolores. Ainsi les marchés des centrales thermodynamiques Noor I, II et III ont été remportés tous les trois par le saoudien Acwa Power, en consortium avec la société espagnole Sener, sur la base d'offres financières très compétitives.

LA RECHERCHE RESTE ACTIVE

Malgré la concurrence étrangère, les acteurs français ont une carte à jouer. Le pays dispose des compétences nécessaires et du tissu d'entreprises sur l'ensemble de la chaîne de valeur (fabricants de turbines, de miroirs, de trackers, de structures métalliques, mais aussi ingénierie), même si la filière industrielle est encore à constituer. Un autre avantage français est de pouvoir compter sur un réseau de laboratoires de recherche très actif sur le sujet avec comme tête de pont le laboratoire Promes (pour Procédés, matériaux et énergie solaire). Cette unité propre du CNRS a pour mission de faire de la recherche en profitant notamment des installations à concentration françaises de Font-Romeu

(four solaire d'Odeillo) et de la tour solaire de Thémis. Le laboratoire couvre l'ensemble des aspects de la filière en travaillant à la fois sur les technologies de captation des rayonnements solaires (réflecteurs à miroirs de Fresnel, centrale à tour ou réflecteurs cylindro-parabolique), sur les fluides caloporteurs et sur les systèmes de stockage. Parmi les thèmes plus spécifiques de travail figure l'étude de la résistance et du vieillissement des matériaux à très hautes températures. L'objectif est de simuler les conditions extrêmes de température, sous environnement chimique et pression contrôlés, appliquées à des matériaux afin d'étudier leur comportement physico-chimique. Autre thème prometteur : le développement de procédés de production de carburants synthétiques comme l'hydrogène à partir d'énergie solaire thermique sans émission de gaz à effet de serre. Les différentes voies développées concernent notamment le craquage de méthane et de gaz naturel permettant la coproduction d'hydrogène et de noir de carbone ainsi que les cycles thermochimiques de décomposition de l'eau. Le recyclage et la valorisation du CO₂ pour la production de combustibles de synthèse sont également étudiés.

On peut également citer le laboratoire du CEA Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux), qui a noué un partenariat avec la société Alsolen pour la conception de centrales solaires thermodynamiques de moyenne puissance allant jusqu'à 100 MWth (soit 20 MWe environ), particulièrement destinées aux réseaux isolés ou décentralisés. Un prototype a été réalisé sur le site de Cadarache. Il est doté d'un stockage thermique direct de type

SOLAIRE THERMODYNAMIQUE

thermocline à lit de roche, qui permet une extension de fonctionnement de 4 heures pleine puissance.

Autre acteur de la recherche sur le solaire à concentration, le laboratoire Rapsodee (Recherche d'Albi en génie des procédés des solides divisés, de l'énergie et de l'environnement) localisé à l'école des Mines d'Albi et rattaché au CNRS depuis 2001. ●

Quelques sites pour aller plus loin :

- ✓ Les pages dédiées à la filière sur le site de l'Ademe : www.ademe.fr
- ✓ www.promes.cnrs.fr
- ✓ <http://liten.cea.fr/cea-tech/liten>
- ✓ www.estelasolar.org
- ✓ www.foursolaire-fontromeu.fr
- ✓ Les pages dédiées à la filière sur le site du Syndicat des énergies renouvelables (www.enr.fr)



3 QUESTIONS

de l'Observatoire
des énergies renouvelables



à **Alain Ferrière**,
responsable
de l'équipe de
recherche vecteurs
énergétiques
durables au
laboratoire Promes
du CNRS

1 Quelle est la situation aujourd'hui de la filière française CSP pour la valorisation électrique ?

Au tournant des années 2010 on a véritablement cru à une relance possible de la filière solaire à concentration pour la partie électrique. Les projets retenus dans le cadre de l'AMI de l'Ademe et les deux sites de démonstrateurs issus de l'appel d'offres CRE devaient redonner un élan au secteur. Toutefois, le choix fait par plusieurs acteurs de se retirer de cette technologie et l'arrêt de Solar Euromed ont fait qu'une bonne part de ces projets n'ont pas abouti. Le développement industriel de la filière se résume, aujourd'hui, presque exclusivement au site de Llo, même si la recherche reste, quant à elle, plus active. La vitrine technologique du savoir-faire français est encore à construire. Cela dit, le marché mondial de l'électricité solaire thermodynamique n'est globalement pas très dynamique ces dernières années. Il ne se passe pratiquement plus rien en Europe et seuls le Maroc, le Chili, l'Afrique du Sud et la Chine ont des programmes. Il faudrait que davantage de pays soient actifs sur cette technologie.

2 Llo va aboutir plus de sept ans après l'appel d'offres qui l'a fait émerger. C'est une période très longue en matière d'électricité solaire, pendant laquelle le photovoltaïque a vu ses coûts se réduire très fortement. Quel pourra être le rôle du démonstrateur une fois mis en service ?

Llo est un démonstrateur préindustriel qui a déjà apporté des enseignements et des résultats. Les méthodes de fabrication d'assemblage des miroirs ont été optimisées, les tests faits sur des matériaux ont déjà permis d'avancer sur plusieurs aspects, notamment sur celui de la réduction du poids des miroirs. Sur la question du coût de l'énergie produite, il faut être prudent. Les coûts de Llo, qui sont ceux d'un démonstrateur situé en France avec des conditions d'ensoleillement propres à son site, ne peuvent évidemment pas être comparés avec ceux qui sortent des appels d'offres internationaux comme ceux de Noor au Maroc. Même s'il est vrai que la technique la plus demandée aujourd'hui au niveau international en matière de production électrique n'est pas celle de Llo, il faut capitaliser sur les retours d'expériences que le site va nous donner. Les enseignements sur la technologie des réflecteurs de Fresnel vont être précieux et il faudra davantage se tourner vers des valorisations thermiques.

3 Que faudrait-il, selon vous, pour relancer la filière solaire thermodynamique en France ?

Je pense qu'il faudrait consacrer davantage d'efforts au développement des usages chaleur dans l'industrie. Il n'y a, à ma connaissance, actuellement pas de



programme pour soutenir ce type de valorisation du CSP en France alors qu'il y a de vrais besoins. Peut-être que les projets en la matière pourraient émarger au Fonds chaleur, notamment dans la catégorie NTE. Des acteurs comme Newheat commencent à aller sur l'usage du solaire à concentration pour des besoins vapeurs dans des processus de production, mais c'est le tout début. Pour moi, c'est une des clés d'une éventuelle relance de la filière CSP en France : cibler davantage les usages thermiques. ●