


CHIFFRES CLÉS

Puissance installée

1,01 MW
(uniquement sur des sites pilotes)

La programmation pluriannuelle de l'énergie ne contient aucun objectif pour la filière solaire thermodynamique



Pilote d'une centrale solaire à concentration utilisant des miroirs de Fresnel, développé par Cnim à La Seyne-sur-Mer - Var (PACA).

ERDA 2010

Pionnière historique de la filière, la France a de fortes ambitions quant au rôle qu'elle entend avoir sur le marché international du solaire thermodynamique. Toutefois, le secteur national manque encore de démonstrateurs industriels pour étoffer son offre et être compétitif face à la concurrence étrangère.

111

FILIÈRE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE

Observ'ER

Le Baromètre 2016
des énergies renouvelables
électriques en France

Le solaire thermodynamique est l'une des valorisations du rayonnement solaire direct. Souvent 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 offre la possibilité de 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 après le coucher du soleil, point qui est essentiel pour les pays intéressés par le développement de ce type de centrales sur leur territoire. L'autre avantage est l'hybridation. Cette technique consiste à associer une centrale solaire à une autre source de chaleur issue d'une énergie fossile ou de la biomasse, garantissant ainsi une production continue. Cela peut déboucher sur 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 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 80, la France était pionnière dans le domaine du solaire à concentration, avec l'inauguration de la centrale à tour de Thémis (voir schéma n°1),

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 s'est fait, aiguillonné par la croissance du marché mondial portée par les États-Unis et l'Espagne.

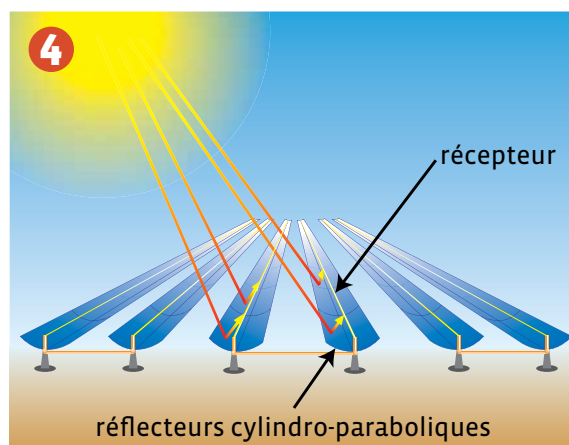
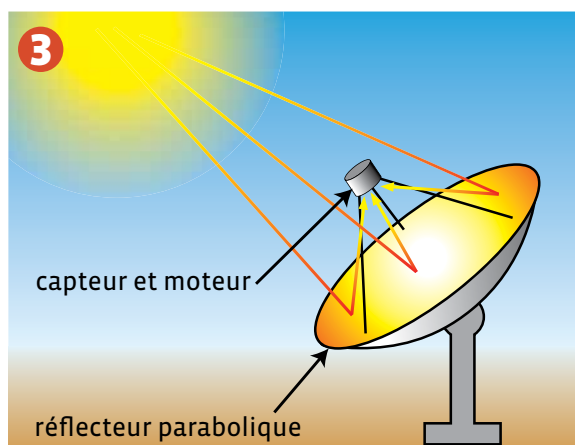
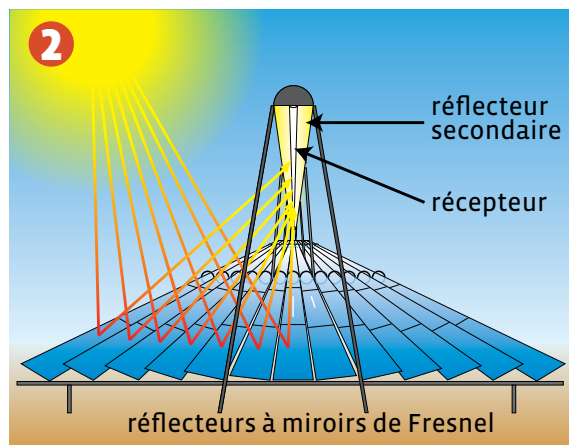
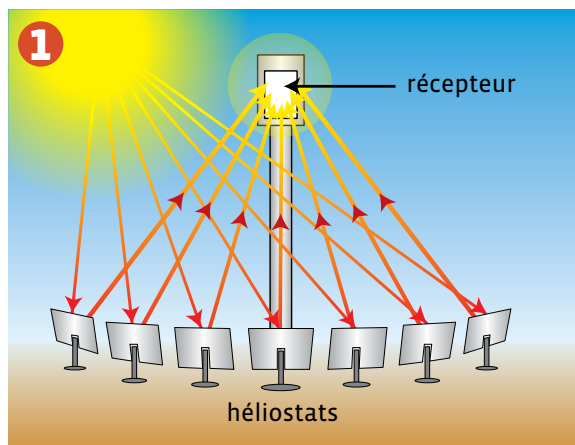
La relance du solaire thermodynamique en France s'est faite en plusieurs étapes. En 2005, après la reconversion de Thémis en plateforme de recherche et développement, une réflexion est initiée sous l'égide de l'Ademe, qui débouche en 2012 sur une feuille de route pour la filière. Parmi les objectifs 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 a été organisé pour déboucher en avril 2012 sur le choix de trois projets (voir tableau n° 1) censés poser les bases d'un savoir-faire national. Stars, un quatrième projet mené par Areva, avait été initialement retenu, avant d'être abandonné après l'annonce du retrait de l'industriel en 2014 du domaine du solaire thermodynamique.

2012 a également vu le lancement d'un appel d'offres d'électricité solaire (essentiellement tourné vers le photovoltaïque) comportant un volet solaire thermodynamique. Deux dossiers ont été retenus : le projet corse d'Alba Nova 1, porté par Solar Euromed pour 12 MW, et la centrale solaire de Llo pour 9 MW, porté par le groupe

Schéma n° 1

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

Source : Observ'ER 2015



- 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.

Tabl. n° 1

Projets retenus dans le cadre des appels à manifestation d'intérêt

Source : Ademe

Projet	Industriel	Technologie	Objectifs	Fonds alloués par l'Ademe
eCare	Cnim	Fresnel	Démonstrateur préindustriel de centrale solaire pour la production d'électricité, accompagné d'une méthode de prédiction de la ressource solaire.	4,4 M€ (montant total projet : 10,1 M€)
LFR 500 pour Linear Fresnel Reflector à plus de 500 °C	Solar Euromed	Fresnel	Développer une technologie solaire thermodynamique à une température de plus de 500 °C reposant sur la technologie innovante d'un tube absorbeur résistant aux hautes températures sans maintien sous vide.	2,9 M€ (montant total projet : 5,9 M€)
Microsol	Schneider Electric	Fresnel	Proposer des produits et solutions adaptés à des milieux ruraux dans des pays au fort taux d'ensoleillement. Énergie fiable, abordable et propre.	5,1 M€ (montant total projet : 10,9 M€)

Constructions industrielles de la Méditerranée (Cnim) en Languedoc-Roussillon (aujourd'hui Occitanie). Les professionnels du secteur s'attendaient à ce que cette opération soit reconduite et demandaient une tranche dédiée de 100 MW. Pourtant, l'appel d'offres de 2014 dédié aux installations solaires de grande puissance (> 250 kW) n'a pas inclus de volet solaire thermodynamique. La position des pouvoirs publics est d'attendre la concrétisation des projets en cours avant de lancer d'éventuels nouveaux appels d'offres sur le secteur. Cependant, avec la liquidation prononcée de Solar Euromed, le devenir du projet d'Alba Nova est très incertain.

METTRE EN AVANT LE SAVOIR-FAIRE FRANÇAIS

La stratégie de la France en matière de solaire thermodynamique est de déployer sur son territoire une vitrine technologique pour ses entreprises et de développer l'export. Cet objectif est surtout primordial dans les applications électriques de la technologie. Pour les utilisations de la vapeur dans des processus industriels ou des installations de désalinisation, les réalisations faites par des entreprises françaises représentent déjà bien le savoir-faire national (voir 3 questions à Cédric Philibert).

En matière de production électrique, l'appel d'offres CRE 1, dans lequel les projets Llo et Alba Nova ont été retenus, entre dans cette stratégie de vitrine technologique. Pour

L'instant, ces chantiers associés aux projets de l'Ami de l'Ademe représentent le principal horizon de développement de la filière. Il n'y a eu en effet aucun objectif de puissance retenu pour la filière dans le la programmation pluriannuel énergétique d'octobre 2016, au contraire de la précédente programmation, qui visait 540 MW à fin 2020. Lorsque les projets issus de CRE 1 seront terminés, la filière espère un nouvel appel d'offres sur un projet ambitieux. Ainsi à moyen terme, une centrale entre 30 et 50 MW serait un excellent produit d'appel à présenter aux investisseurs internationaux.

Côté industriel, 2016 aura vu la disparition de l'un des acteurs français les plus actifs : Solar Euromed. Lauréate de l'Ami de 2012 et de l'appel CRE 1 avec le projet corse d'Alba Nova, l'entreprise avait été placée en redressement judiciaire en 2015, avant d'être finalement liquidée en septembre 2016. Fondée en 2007, cette société indépendante cherchait depuis plusieurs années 10 millions d'euros pour financer la construction d'une usine d'assemblage pour ses miroirs de Fresnel linéaires.

Du côté de la Cnim, les nouvelles sont meilleures. Acteur historique du CSP en France, puisqu'il avait participé à la création du projet Thémis, le groupe a bouclé en octobre 2016 le budget de sa filiale commune avec Bpifrance, baptisée Suncnim, pour un montant de 60 millions d'euros. Les capitaux sont constitués de 20 % de fonds propres apportés par Suncnim et la CDC et de 80 % de dette obtenue auprès d'un pool bancaire. Suncnim est tout particulièrement dédiée au projet thermodynamique de Llo, dont la mise en service est toujours prévue pour courant 2018. Le groupe disposera alors de la fameuse vitrine technologique dont il a

besoin pour mieux attaquer le marché international : le principal horizon de développement du solaire thermodynamique.

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 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. Au niveau français, l'Ademe a également introduit la filière dans ses travaux. Dans son scénario "un mix électrique 100 % renouvelable en 2050" publié à l'automne 2015, les projections des puissances solaires thermodynamiques sont de 430 MW en 2050.

Aujourd'hui, les principaux marchés dans le secteur sont l'Afrique du Sud, le Moyen-Orient, le Maghreb, l'Inde, la Chine et le Chili. Parmi les pays les plus ambitieux figure le Maroc, où le programme Noor pré-

Vers la fusion entre photovoltaïque et thermodynamique ?

Parfois mis en concurrence frontale dans les projets internationaux, le photovoltaïque et le solaire thermodynamique pourraient également envisager leur avenir sous la forme d'une fusion technologique – des centrales utilisant la totalité du spectre solaire avec une très bonne efficacité, avec une moitié de l'électricité (PV) produite au fil du soleil, et une moitié produite à la demande après stockage de la chaleur recueillie. Les États-Unis ont mis 30 millions de dollars dans un programme sur ce thème (Focus, pour Full Spectrum Optimized Conversion and Utilization of Sunlight), et pourraient détenir les clés de l'avenir.

Le photovoltaïque est très efficace sur certaines longueurs d'onde du rayonnement solaire, mais présente des limites sur d'autres. Les rayonnements non utilisés et d'autres pertes pourraient être récupérés sous forme de chaleur. D'où l'idée de combiner PV et CSP (concentrated solar power) : l'énergie qui n'est pas transformée directement en électricité pourrait l'être en passant par une phase thermique – laquelle permet, via stockage de chaleur, de différer la production électrique au moment le plus opportun. Ainsi, une installation mixte PV et thermodynamique pourrait offrir une efficacité totale supérieure à ce que l'on peut obtenir avec l'une ou l'autre des techniques (les niveaux devraient être supérieurs à 40 %), avec en plus l'avantage qu'une part au moins de cette électricité serait parfaitement dispatchable. Le programme Focus finance une douzaine de projets de recherche sur ce thème aux États-Unis, permettant d'évaluer les diverses formes que la fusion PV-CSP pourrait prendre et où placer les panneaux photovoltaïques dans le dispositif thermodynamique. À quand un programme de recherche sur ce thème en Europe ?

voit 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 du monde. Il sera constitué de quatre centrales solaires multitechnologiques (CSP cylindro-para-

bolique, 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 ainsi 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 multi-effet). Point important de la collaboration, pour encourager le transfert de savoir-faire, la réalisation 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 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 Ben Guerir.

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 thermodynamique 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.

L'ACCOMPAGNEMENT INSTITUTIONNEL DE LA FILIÈRE

Malgré la concurrence étrangère, les acteurs français ont une carte à jouer,

car il y a peu de sociétés au plan mondial capables de répondre aux appels d'offres internationaux. De plus, la France possède des compétences et des entreprises sur l'ensemble de la chaîne de valeur : fabricants de turbines, d'alternateurs, de miroirs, de trackers, de structures métalliques, de récepteurs, mais aussi groupes d'ingénierie, électriciens, chaudronniers, chaudiéristes, fabricants de pompes ou de moteurs...

Le pays possède une large gamme d'organismes et d'outils qui peuvent être sollicités dans le cadre de la recherche de marchés à l'étranger. La BPI, dont l'objectif est de porter les fleurons de l'industrie française sur les marchés les plus prometteurs, s'est engagée auprès de la filière thermodynamique, sous la forme de prêts ou de prises de participation. La France commence à structurer son réseau d'export pour les filières solaires en mobilisant le ministère des Affaires étrangères, l'Agence française de développement et ses réseaux diplomatiques. La filière cherche notamment à profiter de ce mouvement pour faire émerger un fonds de garantie qui viendrait couvrir le risque pays et par là même rassurer les banques privées, encore peu présentes dans le secteur. ●

Quelques sites pour aller plus loin :

- ✓ Les pages dédiées à la filière sur le site de l'Ademe : www.ademe.fr
- ✓ www.estelasolar.org
- ✓ www.promes.cnrs.fr
- ✓ www.foursolaire-fontromeu.fr
- ✓ Les pages dédiées à la filière sur le site du Syndicat des énergies renouvelables : www.enr.fr

Observ'ER

Le Baromètre 2016
des énergies renouvelables
électriques en France



3 QUESTIONS

de l'Observatoire
des énergies renouvelables



à **Cédric Philibert**,
Expert Énergie
et changements
climatiques
à l'Agence
Internationale
de l'Énergie

1 Les industriels français ont souhaité se spécialiser dans la technologie des concentrateurs linéaires de Fresnel. Les récents échecs de l'offre française dans le plan solaire marocain Noor ne remettent-ils pas en question ce choix ?

En matière de solaire thermodynamique, il est important de rappeler que les applications peuvent être variées et ne se cantonnent pas à la production d'électricité. Ainsi, la technologie des concentrateurs linéaires est intéressante pour obtenir de la vapeur à température intermédiaire pour des applications dans l'industrie ou dans des procédés de désalinisation d'eau de mer. Autre exemple, en 2011, Areva avait décroché un contrat à Kogan Creek, en Australie, où l'énergie solaire thermique devait améliorer le rendement d'un site de production d'électricité à partir de charbon en injectant de la vapeur dans le process. Le retrait d'Areva du solaire thermodynamique a empêché l'aboutissement du projet. Les résultats de Noor ne condamnent donc pas le choix de la filière française.

Pour la production d'électricité, la technologie de Fresnel est traditionnellement concurrente de celle des capteurs cylindro-paraboliques. Les concentrateurs de Fresnel sont moins chers, leur usage est moins sophistiqué et il est généralement plus facile de trouver localement le matériel nécessaire à la réalisation d'une installation. En revanche, leur rendement est inférieur à celui de la technologie cylindro-parabolique, car leur capacité à capter l'ensoleillement est bonne en milieu de journée mais moindre en début de matinée et en fin d'après-midi.

2 Où se situe au niveau du marché mondial la compétitivité du CSP par rapport au PV ?

Aujourd'hui, on a un rapport de coût entre les deux technologies qui se situe dans une fourchette de un à deux ou un à trois en faveur du photovoltaïque. Pour un projet de production d'électricité de jour sans stockage, le photovoltaïque coûte en moyenne aux alentours de 50 euros le MWh, alors que le solaire thermodynamique va être aux environs de 140-150 euros le MWh. L'écart est très important et ce n'est donc pas sur ce type de projets que le solaire thermodynamique est pertinent. En revanche, le thermodynamique est bien plus compétitif dans le cas de sites qui veulent couvrir des pointes de consommation d'électricité en début de journée ou en fin de soirée, donc en dehors des heures d'ensoleillement. La capacité des technologies CSP à intégrer des solutions de stockage, notamment à travers l'utilisation de sels fondus, les rend bien plus intéressantes, car elles sont alors en compétition avec des solutions de type photovoltaïque avec stockage, qui restent encore chères, ou photovoltaïque associé à des centrales fossiles, qui



posent le problème des émissions de gaz à effet de serre. Paradoxalement, le solaire thermodynamique peut surtout faire la différence sur les périodes en dehors des heures d'ensoleillement.

3 Le manque d'une vitrine technologique est-il vraiment handicapant pour la filière ?

Il y a plusieurs façons d'appréhender cette fameuse vitrine technologique, car n'oublions pas que les applications du solaire haute température peuvent être variées. Il y a plusieurs entreprises françaises qui interviennent dans des projets solaires thermodynamiques dans le monde, qui gagnent régulièrement des appels d'offres et qui n'ont pas une seule installation sur le sol national. C'est notamment le cas de la société Degremont, qui utilise la technologie solaire thermodynamique dans des procédés de désalinisation 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.

En revanche, pour la production d'électricité, c'est différent. Dans ce cas, la filière manque de références face à la concurrence internationale, et c'est vrai qu'un projet comme celui de Suncnim jouera un rôle important quand il sera mis en service. ●