

UN JEUDI AU SOLEIL : ODEILLO ET TARGASSONNE

Le 27 septembre 2018, nous avons rendez-vous au four solaire d'Odeillo. Ce jour, les climatologues des années 1970 auraient parlé de temps serein. Les chercheurs de ce laboratoire nous ont dit « le rayonnement direct au midi solaire a dépassé les 1000 W m^{-2} ». Pour nous visiteurs, le temps était estival avec le ciel d'un bleu que l'on ne trouve qu'en Cerdagne. Le laboratoire PROMES Procédés, Matériaux et Energie Solaire nous accueillait. PROMES est une Unité Propre du CNRS (UPR 8521) rattachée à l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (<https://www.promes.cnrs.fr>). Ce laboratoire est localisé sur trois sites: Odeillo, Targassonne et Perpignan.

L'histoire des recherches sur l'énergie solaire en Cerdagne est ancienne. Elle débute en 1949 à Mont-Louis, à 8 km d'Odeillo. A la suite du développement à Meudon un « chauffage » solaire pour la chimie et la métallurgie, par le professeur Félix Trombe, s'ensuivit la construction d'un four solaire de 50 kilowatts à Mont-Louis. Les activités de celui d'Odeillo démarrèrent en 1968.

A tout seigneur tout honneur, notre visite débute par ce dernier. Il se compose d'un miroir à facettes en forme de paraboloïde de révolution de 1830 m^2 dont les propriétés géométriques font converger le rayonnement vers un foyer situé à une distance focale de 18 m.



Photo 1. Vue générale du four solaire d'Odeillo adossé au bâtiment qui abrite à la fois des fours solaires de moyenne puissance et les activités du laboratoire (photo SR).

Il est éclairé par un champ de 63 héliostats mobiles d'une aire totale de 2835 m^2 . La parabole est adossée à la façade nord du bâtiment de 8 étages qui abrite les activités du laboratoire et des fours solaires de petites tailles (**photo 1**). Il focalise 1 mégawatt sur une zone d'environ 80 centimètres de diamètre avec un pic en densité de flux de $10 \text{ mégawatts m}^{-2}$ au foyer.

C'est ici qu'une partie des tests thermiques de la sonde Parker Solar Probe a été réalisée. Le four a permis de chauffer à plus de $2000 \text{ }^\circ\text{C}$, c'est-à-dire dans des conditions proches de celles qu'elle rencontrera près du soleil (voir CNRS Le journal n° 293). Ces tests concernèrent le bouclier thermique, en composite carbone-céramiques, de 11 cm d'épaisseur ainsi que les matériaux des capteurs embarqués. La sonde a été lancée le 12 août 2018. L'approche vers la couronne solaire sera progressive. À la fin de sa mission, la sonde terminera son travail à 6,1 millions de kilomètres du centre de l'astre solaire!



Photo 2. Un concentrateur de 1,5 kilowatt pour une tache focale de diamètre centimétrique permet de produire de hautes températures (photo SR).

Les fours de petites tailles (**photo 2**) sont capables de produire de très hautes températures jusqu'à 3000°C . Ils sont utilisés dans des recherches sur la synthèse de nanomatériaux.

Au voisinage du four solaire, nous avons pu faire un large tour d'horizon des centrales solaires dites thermodynamiques. La Cerdagne accueille, sans doute, la concentration la plus dense de technologies solaires de l'Hexagone: un laboratoire solaire à ciel ouvert. Ces centrales solaires utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons du soleil vers un fluide caloporteur ainsi chauffé à haute

température. Pour cela, les miroirs suivent le mouvement du soleil afin de capter et concentrer les rayons tout au long de leur cycle quotidien. Le fluide produit de l'électricité par le biais de turbines à vapeur ou à gaz. Il existe plusieurs types de centrales solaires thermodynamiques: les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et leur variante à miroirs de Fresnel et les centrales à tour.

Les centrales à miroirs cylindro-paraboliques est la technologie la plus répandue aujourd'hui. Dans l'axe du foyer de la parabole se trouve le tube collecteur dans lequel circule un fluide caloporteur, qui se réchauffe jusqu'à une température supérieure à 300°C. Le fluide est ensuite transporté jusqu'à un système de génération électrique. L'ensemble miroir cylindro-parabolique/récepteur suit le mouvement du soleil (**photo 3**). Un stockage thermique permet de produire de l'électricité plusieurs heures après la tombée de la nuit. En Andalousie, la plus grande centrale de ce type d'Europe est, avec la mise en service de sa troisième tranche, sur le point de produire 150 Mégawatts. Des réalisations qui pourront atteindre 600 Mégawatts en 2030 sont en projet.



Photo 3. Vue de la centrale à miroirs cylindro-parabolique d'Odeillo. Cette unité d'expérimentation est ici en position de repos. En dessous du miroir de 5,70 m d'ouverture, nous distinguons le tube dans lequel circule le fluide caloporteur. Ce dernier est localisé au foyer de la parabole (photo S. Payre).

A peu de distance d'Odeillo, nous apercevons la centrale solaire à miroirs de Fresnel de Llo. Les miroirs de Fresnel imitent la forme cylindro-parabolique avec des miroirs plans, dits aussi réflecteurs compacts linéaires. Ils sont agencés pour pivoter en suivant la course du soleil.

Seuls les miroirs bougent, la structure et le tube absorbant sont tous fixes. Le coût des centrales solaires à miroirs de Fresnel est inférieur à celui des centrales à miroirs cylindro-paraboliques tant à l'installation qu'en maintenance. La focalisation n'est pas optimale dans ce système. La baisse de coût semble compenser la dégradation d'efficacité. Ce système est encore peu répandu. A Llo avec 95 200 miroirs soit 153 000 m² la production atteint 9 Mégawatts. Il dispose de dispositifs permettant 4 heures de stockage à pleine charge.

La dernière étape de notre tour d'horizon est celle de la centrale Thémis de Targassonne, à 4 km à vol d'oiseau d'Odeillo, le rayonnement solaire est ici fortement concentré à destination d'un foyer unique de taille réduite dans lequel la température peut atteindre de 700 à 1 000°C. De nombreux miroirs, suivant la course du soleil, concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur central situé au sommet d'une tour, dans lequel circule le fluide caloporteur. Comme dans les systèmes cylindro-paraboliques, la chaleur du fluide est alors transférée à un générateur d'électricité. Par rapport à un système cylindro-parabolique, la tour solaire offre l'avantage de ne pas avoir à faire circuler de fluide dans l'ensemble du champ de miroirs. Les pertes thermiques sont significativement réduites. Le niveau élevé de concentration de l'irradiation solaire améliore le rendement du cycle thermodynamique.

La centrale Thémis a été mise en service en 1983 par EDF. Elle comprenait 201 héliostats et une tour de 105 mètres de haut. Cette centrale solaire fut une référence internationale en matière de recherche appliquée à la conversion de l'énergie solaire en électricité. Son utilisation cessa en 1986 ! Ce type de centrale est en fonctionnement ou en construction dans beaucoup de régions du globe à fort ensoleillement. Citons pour l'exemple, l'une des plus puissantes, il s'agit de l'Ivanpah Solar Electric Generating System qui depuis 2014, dans le désert Mojave en Californie, a une capacité de 392 Mégawatts: 173 500 héliostats focalisent l'énergie solaire sur des générateurs de vapeur de trois tours solaires centrales.



Photo 4. Vue du champ d'héliostats de Thémis. Nous sommes ici à 80 m au dessus du sol. C'est à ce niveau, celui du récepteur central, que se mettent en place les expérimentations du programme PEGASE. L'ombre de la tour est visible sur la photo. Ici les héliostats sont en position de repos. Ils sont pilotés par deux programmes informatiques couplés, un programme superviseur central et un programme embarqué dans chaque héliostat (photo SR).

Aujourd'hui, le site de Thémis (**photo 4**), propriété du conseil général des Pyrénées orientales, n'est utilisé que pour l'accueil de « jeunes pousses » développant des technologies solaires y compris photovoltaïques et pour un projet de recherche de PROMES sur une tour solaire thermodynamique munie d'un système hybride solaire/gaz. Ce projet, d'acronyme PEGASE (Production of Electricity from Gas and Solar Energy), concerne la mise au point et les tests d'un prototype de centrale solaire à haut rendement de conversion basé sur un cycle hybride à gaz haute température vers une turbine à gaz de 1,6 MW. Un appoint de chaleur par combustion permettra de maintenir les conditions de fonctionnement de la turbine quel que soit l'ensoleillement. En aval de la turbine à gaz, la cogénération, c'est-à-dire l'utilisation de la chaleur résiduelle augmente sensiblement la compétitivité de ce type d'installation.

Pour optimiser le rendement et atteindre 30%, plusieurs pistes sont suivies. Il s'agit principalement du développement du récepteur solaire à air pressurisé et de l'utilisation de nouveaux fluides de transfert. Les suspensions denses de particules solides restent stables à hautes températures. Ces propriétés font de ces poudres à la fois de très bons caloporteurs et de très bons « calostockeurs ». Les températures atteintes sont nettement supérieures à celles

atteintes avec des huiles ou des sels fondus. Ces derniers ont leurs limites vers 550°C.

Au générique de cette passionnante visite, il nous faut citer notre amie S. Payre d'A3CNRS-LR, la maîtresse d'œuvre de cette visite, Nicolas Boulet qui nous a guidés lors de la visite du four solaire et Yann Volut dans celle de Thémis. En dépit de manips en cours pour le projet PEGASE, Gilles Flamant a partagé avec nous un repas convivial et nous a fait découvrir les coulisses et les obstacles de la recherche sur le solaire.

Pour terminer, je voudrais que nous ayons ici une pensée pour Claude Dupuy qui dirigea le PROMES de 1986 à 1998. En dépit d'une sante défaillante, il voulait être absolument des nôtres ce jour. La vie en a décidé autrement.

Serge Rambal