

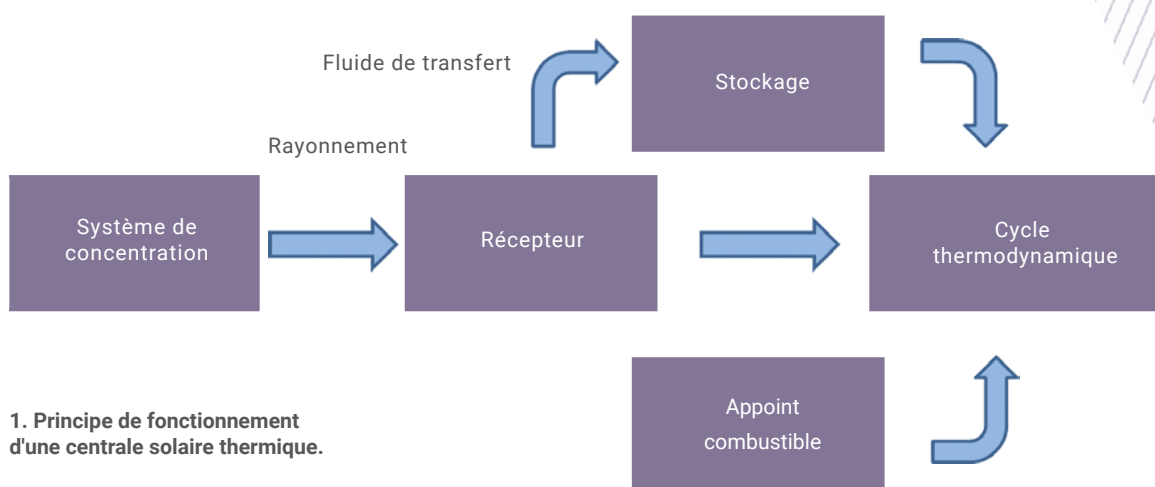
L'autre technologie, le solaire à concentration

Gilles Flamant (gilles.flamant@promes.cnrs.fr)

Laboratoire Procédés, Matériaux et Énergie Solaire (PROMES, UPR 8521 CNRS)
7 rue du four solaire, Odeillo, 66120 Font Romeu

Le solaire à concentration permet de chauffer à haute température un fluide caloporteur. La chaleur obtenue peut être ou bien utilisée directement, ou bien convertie en énergie électrique en utilisant un cycle thermodynamique. Un avantage des centrales solaires est de pouvoir améliorer, grâce à un couplage avec des systèmes de stockage thermique, les possibilités de régulation de la production en fonction de la demande.

Dans cet article, les performances actuelles et les perspectives d'évolution de ces centrales sont rapidement présentées.



Principe et état de l'art

La concentration de la composante directe du rayonnement solaire permet de produire de la chaleur à haute température. Cette chaleur peut être utilisée soit directement dans un procédé industriel, soit pour générer de l'énergie mécanique ou des vecteurs chimiques d'énergie par des procédés thermochimiques. Dans le cas de la production d'électricité (fig. 1), l'énergie solaire est transférée à un fluide caloporteur

circulant dans un récepteur solaire. Un ensemble d'échangeurs permet ensuite à ce fluide caloporteur de céder sa chaleur à un fluide de travail qui convertit cette énergie thermique en énergie mécanique *via* un cycle thermodynamique. Cette chaleur peut également être stockée pour décaler la production vers les périodes de forte consommation (généralement le soir en Europe). Enfin, une génératrice couplée à ce cycle moteur produit de l'électricité. La seconde partie de cette chaîne de

conversion est identique à celle d'une centrale thermique classique mais la source d'énergie primaire est l'énergie solaire dans le cas des centrales solaires thermiques. En conséquence, une centrale solaire thermique peut être hybridée avec un appoint de combustible.

Les systèmes optiques mis en œuvre sont des miroirs produisant une concentration soit linéaire (concentrateurs cylindro-paraboliques et linéaires de Fresnel), soit ponctuelle

>>>

Thémis est un centre de recherche sur l'énergie solaire, situé dans la commune de Targasonne (Pyrénées-Orientales), dans une région où les conditions météorologiques (ensoleillement, altitude...) sont très favorables. Il est géré par le Conseil départemental des Pyrénées-Orientales.

Après le choc pétrolier de 1973, le gouvernement français décide en 1977 de développer l'utilisation de l'énergie solaire et d'implanter dans les Pyrénées-Orientales une centrale de conversion de cette énergie en électricité par concentration du rayonnement solaire. Construite par EDF et le CNRS, la centrale Thémis est inaugurée en 1983, mais la baisse du prix du pétrole conduit EDF à abandonner son financement en 1986. C'est en 2004 que le Conseil départemental des Pyrénées-Orientales décide de relancer la centrale solaire Thémis, dont l'électricité sera revendue à EDF, et de développer sur ce site un centre de recherche et de développement technologique sur la production d'énergie d'origine solaire. Les premiers kWh sont produits fin 2007.

Sur le site de 102 ha (fig. E1a) sont installés un champ de 200 héliostats (miroirs plans mobiles), qui suivent la course du soleil pour réfléchir son rayonnement et le concentrer vers le sommet d'une tour en béton de 101 m de haut (fig. E1b), un bâtiment accueillant des entreprises et des visites touristiques, et des bureaux.

Depuis 2014, l'installation est divisée en deux zones expérimentales. Dans la première zone, exploitée par le laboratoire PROMES du CNRS, 107 héliostats et la tour solaire alimentent la centrale solaire thermodynamique. La seconde zone, avec une centaine d'héliostats, est réservée à des projets innovants (dont l'opération Thémis-PV).



© Jeroen Komen (licence CC BY-SA-2.0).

E1. La centrale solaire Thémis.

(a) Le site de Thémis en 2015.

(b) Essais d'un récepteur solaire à particules fluidisées au sommet de la tour de Thémis.

Fonctionnement de la centrale solaire à concentration

Les héliostats concentrent les rayons du soleil vers le sommet de la tour, qui héberge un récepteur solaire où circule un fluide caloporteur (au départ, des sels fondus à 350°C). Chauffé par les rayons, celui-ci transfère son énergie à un circuit d'eau. La vapeur alors formée actionne une turbine qui produit de l'électricité.

Dans le cadre du programme européen next-CSP (2016-2020), la centrale Thémis a été équipée d'une nouvelle turbine de 1,2 MW_{el} et utilise des particules solides chauffées à 800°C (pour un meilleur rendement de conversion thermodynamique) comme fluide caloporteur et pour le stockage thermique.

Projets

Le projet européen POLYPHEM a permis de prototyper les composants d'une centrale solaire à concentration à petite échelle, qui pourrait se révéler idéale pour les petites entreprises isolées ou les pays en développement.

La société Engie PV Thémis projette de construire sur le site de Thémis une centrale photovoltaïque, qui utilisera 80 des héliostats et produira annuellement plus de 800 MWh. Dans ce cadre, des projets portent sur l'utilisation de nouvelles cellules de silicium à base de couches minces ou microcristallines, et sur l'installation de systèmes de concentration de l'énergie lumineuse arrivant sur les cellules photovoltaïques.



© Xaviateur (Wikipédia, CC BY-SA 3.0).

>>>

(paraboloïdes et centrales à tour). Les facteurs de concentration correspondants sont de quelques dizaines à quelques milliers. Les fours solaires qui utilisent le principe de la double réflexion sont des outils de recherche.

Fin 2019, la puissance solaire thermodynamique installée dans le monde atteignait 6,3 GW pour une production de 16 TWh environ [1]. Plus de cent centrales solaires sont en fonctionnement, avec une puissance unitaire variant entre 1 et 280 MW. En Espagne, la puissance installée est de 2,3 GW ; c'est le pays qui a le plus développé cette technologie au stade commercial. Les autres pays qui sont équipés de telles centrales sont, en particulier, les États-Unis d'Amérique, le Maroc, l'Afrique du Sud, le Chili, certains États du Moyen-Orient (Dubai, Abou Dhabi...), l'Inde et la Chine. Depuis 2016, la Chine développe de nombreux projets de démonstration à partir de différentes technologies. En France, des recherches sont effectuées autour de la centrale solaire Thémis (encadré 1, p. 64).

Comme les systèmes de concentration ne valorisent que la composante directe du rayonnement solaire, il est couramment admis que la ressource annuelle minimale nécessaire pour rentabiliser une centrale solaire est de 1800 à 2000 kWh/m².an. En Europe, l'Espagne, le Portugal, la Grèce et certaines régions du sud de l'Italie et de la France répondent à ce critère. En revanche, pour la production de chaleur industrielle ce seuil peut être largement diminué, ce qui explique le développement de telles applications dans certains pays nordiques comme au Danemark.

Capacité de stockage thermique à grande échelle, un atout

L'intégration d'un stockage thermique donne aux centrales solaires thermiques une qualité très appréciée des régulateurs de réseau : la possibilité de réguler la production en fonction de la demande (*dispatchability*). Le stockage permet d'augmenter le facteur de charge. Le facteur de charge est le rapport entre l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie

qu'une centrale aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période. Généralement (sauf pour les centrales fonctionnant en pointe), l'énergie nécessaire pour charger le stockage est fournie en augmentant la surface de miroirs par rapport à la surface nécessaire pour la production à la puissance nominale. Le critère pour qualifier cette augmentation est dénommé le « multiple solaire ». Les valeurs classiques du multiple solaire sont comprises entre 1,5 et 2,5, ce qui correspond à une durée de stockage pour une production à pleine puissance de 6 à 15 heures. Les centrales qui possèdent un stockage de plus de 8 heures présentent généralement un facteur de charge situé dans la gamme 50-65 %. Les capacités de stockage installées atteignent plusieurs GWh.

Rendement, cout et impact

Le rendement de conversion thermodynamique varie de 37 % à 42 % selon la technologie de concentration, car la concentration ponctuelle permet d'atteindre des températures de cycle de 550°C au lieu de 390°C pour les systèmes à concentration linéaire. Compte tenu des pertes optiques (concentrateur) et thermiques (récepteur), le rendement global nominal de conversion énergie solaire en électricité est de l'ordre de 20 %. Le rendement global moyen annuel est de 15 à 17 %. L'évolution de la technologie devrait permettre la mise en œuvre de cycles thermodynamiques ayant un rendement de 50 %.

Le cout actualisé de l'électricité produite par les centrales solaires thermiques a diminué de 47 % entre 2010 et 2019. La courbe d'apprentissage du solaire à concentration est très proche de celle du photovoltaïque [2, 3]. Dans le contexte des États-Unis, le cout actuel de l'électricité produite par une centrale à tour à sel fondu avec stockage est de 100 \$/MWh [4]. L'objectif affiché par le DOE (*US Department of Energy*) pour 2030 est de 50 \$/MWh pour les centrales produisant en base avec 12 heures de stockage, et de 100 \$/MWh pour les centrales conçues pour la production de pointe.

L'analyse du cycle de vie des centrales solaires cylindro-paraboliques et à tour montre que les émissions sont de 26-38 g CO₂-eq/kWh, soit dix fois moins qu'une centrale alimentée au gaz naturel. Le temps de retour énergétique est de 1 an environ [5].

Futur

Les recherches actuelles portent en particulier sur l'accroissement de la température de fonctionnement des centrales (fig. E1b) [6] et sur la diminution du cout des composants comme le stockage thermique. La production de chaleur solaire (en 2014, l'industrie utilisait 32 % de la consommation énergétique mondiale et la chaleur représentait 74 % de la consommation énergétique industrielle) et d'hydrogène sont également des domaines de recherche et d'innovation très actifs. ■



- 1• IEA (2020), "Renewables 2020, Analysis and forecast to 2025", IEA, Paris. https://cutt.ly/iea_renewable2020, License: CC BY 4.0.
- 2• IRENA (2020), "Renewable power generation costs in 2019", International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-244-4.
- 3• J. Lilliestam et R. Pitz-Paál, "Concentrating solar power for less than USD 0.07 per kWh: finally the breakthrough?" *Renewable Energy Focus*, **26** (2018) 17-21.
- 4• C. Murphy et al., "The Potential Role of Concentrating Solar Power within the Context of DOE's 2030 Solar Cost Targets", National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/TP-6A20-71912 (2019).
- 5• J.J. Burkhart et al., "Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Trough and Tower Concentrating Solar Power Electricity Generation", *Journal of Industrial Ecology*, **16** (2012) 93-109.
- 6• O. Behar et al., (2020). "Design and performance evaluation of a modular solar power plant using a gas turbine combined cycle with fluidized particle-in-tube receiver and direct thermal storage", *Energy Conversion & Management*, **220** (2020) 11310.

La chaleur solaire à basse température

Bernard Tamain (bernard.tamain@free.fr)

Commission Énergie et Environnement de la Société Française de Physique

L'article de G. Flamant (p. 63) traite de l'utilisation de l'énergie solaire pour transférer de la chaleur à haute température sur un fluide utilisé pour produire de l'électricité. Une autre utilisation du soleil consiste à tirer parti de la chaleur basse température qu'il accumule dans la terre, l'air ou l'eau. Elle peut être employée directement pour chauffer un fluide qui circule entre un panneau et un réservoir d'eau chauffée. De nombreux pays méditerranéens ont leurs toits truffés de telles installations pour produire une bonne partie de l'eau chaude sanitaire.

Les centrales thermiques solaires utilisent l'énergie du rayonnement solaire afin de produire de l'eau chaude centralisée, qui est ensuite distribuée aux consommateurs au moyen d'un réseau de chaleur (fig. 1). Actuellement, ces centrales représentent une part très marginale du marché du solaire thermique dans le monde.

On peut aussi récupérer la chaleur du sol pour chauffer une habitation par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur (PAC) : on parle alors abusivement de géothermie de surface, la géothermie profonde (la vraie) consistant à récupérer la chaleur accumulée en profondeur par la radioactivité de la terre. Cette technique des pompes à chaleur est aussi utilisée pour récupérer la chaleur de l'air ambiant afin de chauffer une habitation ou un ballon d'eau chaude (ballon thermodynamique). Ces installations qui fonctionnent à l'électricité sont caractérisées par un coefficient



de performance énergétique (COP), rapport entre l'énergie totale thermique fournie et la consommation électrique de la pompe : des valeurs typiques sont de 3 ou 4.

Les gisements de chaleur solaire accessibles sont grands et pourraient en principe chauffer de nombreux logements correctement isolés. Les limitations tiennent au coût de l'installation, à leur moindre efficacité en période de grand froid lorsque la chaleur est prélevée dans l'air, à la plus grande difficulté de mise en œuvre dans les zones densément construites (surfaces grandes nécessaires pour le géothermique de surface), et aux problèmes de voisinage que peut induire le bruit des compresseurs de pompe à chaleur en zones denses. Elles tiennent aussi au fait qu'en dépit de quelques possibilités d'aide publique aux PAC air-eau dans le résidentiel, l'essentiel des incitations se concentre sur le solaire photovoltaïque. ■

1. Le parc solaire thermique Cellcius de Creutzwald, en Moselle, le plus grand de France, inauguré le 15 octobre 2020, est constitué de 379 panneaux capteurs plans de 16 m² en aluminium vitré, soit une surface de captage de plus de 6000 m². Le liquide caloporteur est véhiculé à travers des alvéoles extrudées tout le long des panneaux. Au fond, on distingue la cuve tampon de 2000 m³, qui permet de stocker, sous forme d'eau chaude à 85°C, la chaleur produite en été par le parc solaire thermique. La production annuelle de la centrale s'élève à 2,7 GWh, ce qui correspond à l'équivalent des besoins en chaleur de 190 foyers. Source : Le Républicain Lorrain.

“ Une autre utilisation du soleil consiste à tirer parti de la chaleur basse température qu'il accumule dans la terre, l'air ou l'eau. ”