

ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE

RÉSUMÉ

Le soleil est une énorme boule de gaz chaud qui produit de l'énergie et qui rayonne en permanence. Il nous transmet une puissance maximale de l'ordre de 1 kW par mètre carré sous forme de lumière visible et de rayonnement infrarouge (Figure 1). En France, l'énergie solaire incidente annuelle varie entre 1200 et 1800 kWh par m², la moyenne étant de 1500 kWh/m² (Figure 2).

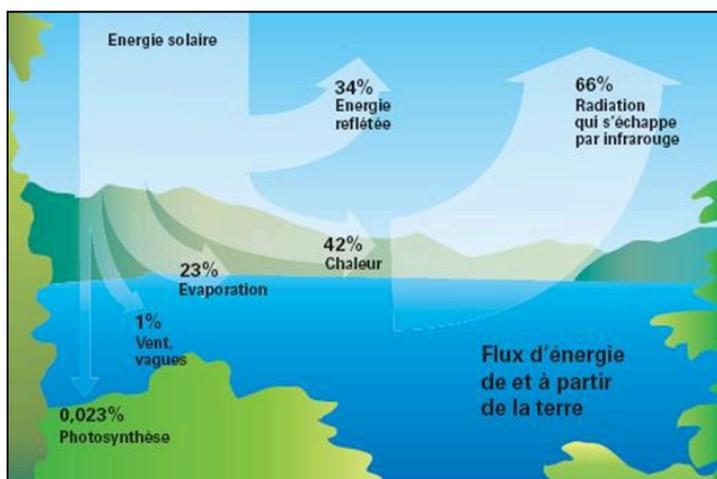


Figure 1 : Energie libérée par le soleil

C'est une énergie renouvelable dont l'homme a compris depuis longtemps l'intérêt. Il existe trois façons de convertir directement l'énergie solaire : thermique, thermodynamique et photovoltaïque.

Dans la présente fiche, seules sont abordées les deux premiers types d'énergie, l'énergie photovoltaïque étant l'objet de la [fiche argumentaire GAENA "Energie solaire photovoltaïque"](#).

L'énergie solaire « thermique » est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux, la production de froid et la production d'eau ; l'énergie solaire « thermodynamique » permet d'obtenir une température plus élevée pour produire de l'électricité à partir de turbines.

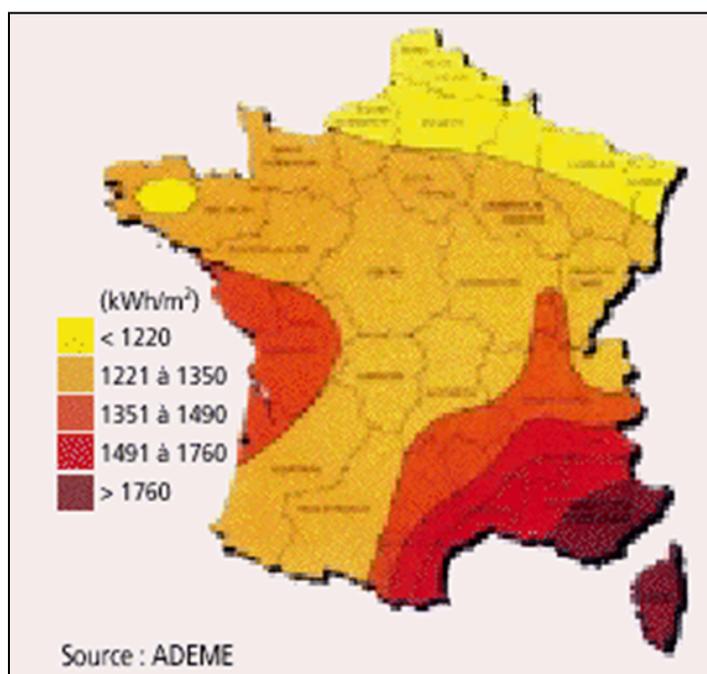


Figure 2 : Gisement solaire en kWh/ m² et par an

1. GÉNÉRALITÉS

L'énergie solaire thermique est l'énergie thermique du rayonnement solaire. Elle est captée dans le but d'échauffer un fluide. L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement ou indirectement. C'est ainsi une forme d'énergie solaire, émise par le Soleil sous forme de rayonnement.

Le soleil est une gigantesque source d'énergie disponible en permanence : c'est un énorme « four » qui « brûle » de l'hydrogène depuis 4,6 milliards d'années. Quand les atomes d'hydrogène fusionnent, des atomes plus lourds se forment en libérant beaucoup d'énergie sous forme de rayonnement : c'est la fusion nucléaire. Le soleil est donc un immense réacteur nucléaire.

2. FILIÈRES D'EXPLOITATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Actuellement il existe 2 voies d'utilisation directe de l'énergie solaire :

- la transformation du rayonnement en chaleur
- la transformation du rayonnement en électricité

Ces transformations ont permis le développement de 3 filières d'exploitation :

- l'énergie solaire thermique : pour la chaleur, le froid et la production d'eau potable
- l'énergie solaire thermique : pour l'électricité
- l'énergie solaire photovoltaïque : pour l'électricité (voir [fiche argumentaire GAENA "Energie solaire photovoltaïque"](#))

2.1. ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE POUR PRODUIRE DE LA CHALEUR

Dans cette filière il y a plusieurs applications : le chauffage de l'eau sanitaire, le chauffage des locaux, le chauffage des piscines, la production de froid, la purification de l'eau.

L'objectif est ici de transformer en énergie calorifique les rayonnements photoniques solaires.

Pour cela on utilise des « capteurs thermiques » constitués de matériaux fortement absorbants. Ces capteurs absorbent les photons solaires et les transforment en chaleur qui est ensuite transportée vers un réservoir de stockage au moyen d'un liquide ou d'un gaz (appelé « caloporteur »).

Eau chaude et chauffage

De manière pratique le fonctionnement est le suivant : le rayonnement traverse une vitre qui laisse pénétrer la lumière et retient la chaleur (effet de serre, voir [fiche argumentaire GAENA "Effet de serre"](#)) et est capté par une surface absorbante. La chaleur ainsi absorbée est ensuite récupérée grâce à un fluide caloporteur circulant sous la surface absorbante. La température du fluide peut alors atteindre 80°C, voire 100°C ; un matériau isolant thermiquement est placé à l'arrière de la surface absorbante pour limiter les pertes calorifiques.

Le caloporteur transmet la chaleur à un ballon d'eau chaude ou à un hydro-accumulateur (ballon tampon absorbeur d'énergie sous forme d'eau chaude) pour la production d'eau chaude sanitaire, ou à un plancher solaire pour le chauffage de la maison (le fluide caloporteur est alors injecté directement dans le plancher des bâtiments entre 25 et 30 °C).

Les développements technologiques en cours semblent ouvrir une voie prometteuse en associant trois fonctions dans le même capteur (en toit face sud) : couverture, production thermique et production électrique.

Quelques valeurs : Une surface de capteur de 4 m² suffit pour satisfaire les besoins en eau chaude de 4 personnes et 10 m² permettent le chauffage d'une maison sous nos climats. Cependant les appareillages actuellement disponibles sur le marché restent encore onéreux. Il faut espérer que le développement de cette technique conduise rapidement à un retour sur investissement de 2 à 3 ans.

Production de froid

Pour la production de froid un fluide caloporteur enfermé dans des tubes absorbe la chaleur du rayonnement solaire captée par panneaux solaires ; la chaleur est ensuite utilisée comme source chaude pour faire fonctionner une machine à absorption de chaleur. Cette machine dissocie, par ébullition, une solution d'eau et de bromure de lithium. Après refroidissement, la recombinaison des deux composants produit du froid par absorption de chaleur.

Production d'eau potable

L'énergie solaire thermique a une autre application possible : la production d'eau potable dans les pays tropicaux ou subtropicaux à partir d'eau saumâtre, salée ou souillée. Le principe est de distiller l'eau au moyen

d'un distillateur solaire (puits solaire, boîte solaire, pyramide solaire) ; l'eau sous l'action du soleil s'évapore et se condense sur un support (film plastique, verre ...), l'eau ainsi distillée s'écoule vers un circuit de stockage.

2.2. ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE POUR PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ

L'énergie thermique du soleil permet aussi de produire de l'électricité par voie thermodynamique : la conversion de l'énergie solaire en électricité n'est pas directe mais passe par l'intermédiaire de centrales thermiques solaires de différents types.

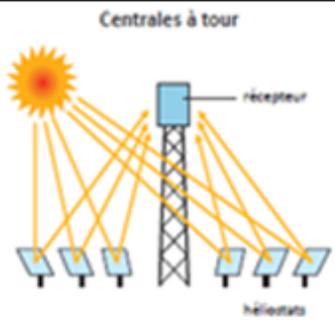
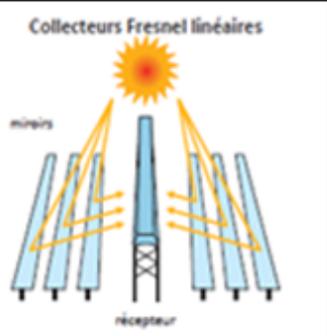
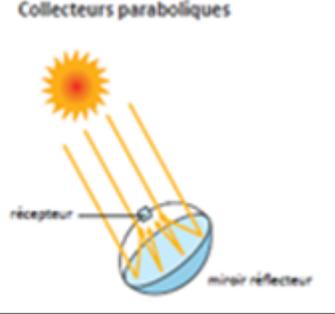
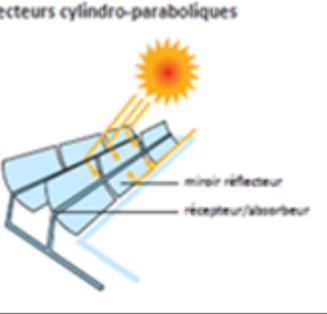
Le principe de base utilisé, connu depuis l'antiquité, est l'obtention de température élevée par la concentration du rayonnement solaire, au moyen d'une grande quantité de miroirs réfléchissants (capteurs), en un seul foyer. Cela rend possible le réchauffement de fluides caloporteurs à des températures allant de 250 à 1 000 °C ; ces fluides transportent la chaleur vers un réservoir d'eau, il y a alors production de vapeur d'eau qui entraînera un turbo alternateur pour produire de l'électricité comme dans les centrales thermiques conventionnelles.

Le fluide chauffé ayant une certaine inertie thermique, la production d'électricité thermodynamique sera moins « saccadée » que la production photovoltaïque. De plus, des systèmes de stockage dynamique de la chaleur peuvent être intégrés pour permettre une production d'électricité pendant plusieurs heures sans ensoleillement.

Il existe quatre types de centrales solaires thermiques : les centrales à capteurs cylindro-paraboliques, les centrales à miroirs de Fresnel, les centrales à tour et les centrales à capteurs paraboliques.

Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques

La technologie aujourd'hui considérée comme la plus mûre est celle des capteurs cylindro-paraboliques grâce à l'expérience acquise en Californie (désert de Mojave) où sont opérationnelles depuis 1984 neuf centrales totalisant 354 MW.

Fixes	Concentration ponctuelle	Concentration linéaire
	Centrales à tour 	Collecteurs Fresnel linéaires 
Mobiles	Collecteurs paraboliques 	Collecteurs cylindro-paraboliques 

Ces centrales utilisent des miroirs cylindro-paraboliques de 100 à 800 m² (voir figure 1) qui concentrent les rayons du soleil sur des tubes placés à l'axe focal du concentrateur et dans lequel circule un fluide caloporteur.

Le Concentrateur suit la course du soleil en tournant sur un axe. Le fluide caloporteur (fluide de synthèse) chauffé lors du passage dans les tubes circule à travers une série d'échangeur de chaleur pour produire de la vapeur surchauffée (390 °C).

Un stockage thermique de plusieurs heures dans des sels fondus permet de mieux adapter la production à la demande et de produire de l'électricité en continu de jour et de nuit.

Figure 3 : Centrales à capteurs cylindro-paraboliques

Le rendement solaire-électrique maximal est d'environ 25 %.

Liste des centrales à capteurs cylindro-paraboliques de plus de 200 MW opérationnelles en 2024 :

- SEGS (9 unités totalisant 354 MW), Désert de Mojave, Californie, États-Unis, depuis 1984-90
- Solana (250 MW) Est de Gila Bend, désert de Mojave, Arizona, depuis octobre 2013
- Mojave (250 MW), Désert de Mojave, Californie, États-Unis, depuis fin 2014 (Figure 5)
- Genesis (250 MW), Désert du Colorado, Californie, États-Unis, depuis avril 2014
- Solaben (200 MW), Logrosán, Province de Cáceres, Espagne, depuis avril 2014
- Noor II (200 MW), Ouarzazate, Maroc, depuis avril 2018 (Figure 4)

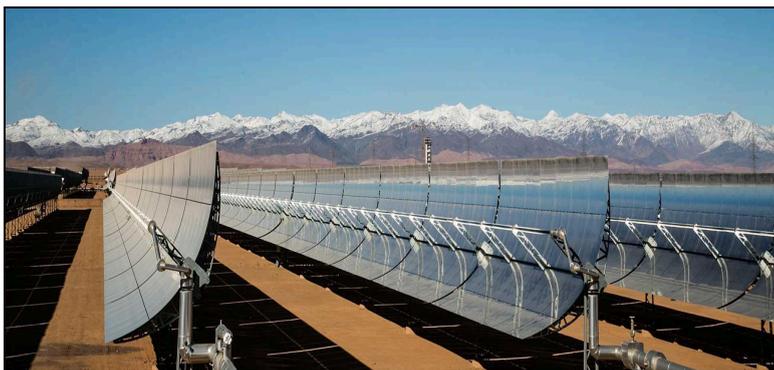


Figure 4 : Centrale de NOOR II



Figure 5 : Centrale de MOJAVE

Les centrales solaires à miroirs de Fresnel

Dans ce type de centrales, un ensemble de miroirs réflecteurs mobiles capturent le rayonnement direct du soleil et le redirige à tout moment vers une cible unique le récepteur. Chacun des miroirs agit selon le principe des lentilles de Fresnel, possède sa propre courbure et une position spécifique afin d'optimiser la réflexion et la concentration du flux solaire. Le récepteur conserve la chaleur ainsi collectée grâce à un dispositif isolant composé de tubes peints en noir entourés d'une vitre entraînant un effet de serre.



Cette énergie thermique est transférée à un fluide caloporteur (huile, eau, sels fondus) qui peut atteindre 500 °C ; la chaleur peut être stockée. Le stockage le plus abouti (au CEA-Liten aujourd'hui) consiste à faire passer le fluide caloporteur dans un réservoir thermique où il cède sa chaleur à des matériaux (lits de roches) qui la restituent dans le circuit en cas de passage nuageux ou la nuit.

Il existe peu de centrales de ce type (4) et elles ont des puissances inférieures à 15 MW.

En France Alba Nova 1 (située en Corse) est la première centrale solaire à miroirs de Fresnel de grande puissance avec 12 MW.

Figure 5 : Centrale Alba Nova (Corse)

Les centrales à tour

Les centrales à tour à effet de concentration :

Dans cette filière, une multitude de miroirs orientables (héliostats) suivent le soleil et concentrent l'énergie sur une chaudière unique contenant le fluide caloporteur et située en haut d'une tour. Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures de 600 à 1000 °C . L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement génératrice de vapeur entraînant une turbine soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur envoyé dans une chaudière, la vapeur générée actionnant des turbines.

Compte tenu de ces très hautes températures il est difficile de trouver un fluide caloporteur organique suffisamment résistant et l'on fait appel à des sels fondus qui permettent à ces centrales de fonctionner lors des passages nuageux ou la nuit.

La première centrale industrielle ayant été mise en service est située en Espagne (Séville) ; il s'agit de la centrale solaire à tour PS10 (115 m de haut), d'une capacité de 11 MW opérationnelle depuis 2008 (Figure 6). Elle produit plus de 23 GWh d'électricité par an et fournit de l'électricité à 5 500 foyers ; c'est la première d'une série dans la même région, elle a été suivie de PS20 (en 2009) de capacité supérieure 22 MW (tour de 165 m de haut) dont le champ de miroirs atteint 85 ha avec de nouveaux aspects techniques conduisant à une meilleure captation du rayon incident.

Le 13 février 2014 vient d'entrer en service la plus grande centrale solaire thermique du monde, la centrale D'IVANPAH dans le désert de Mojave (Californie) ; elle est formée de 3 tours de 140 m de haut sur lesquelles 173 500 miroirs héliostats contrôlés par ordinateurs concentrent l'énergie solaire chauffant l'eau située dans les chaudières à 538 °C. La centrale aura une capacité de 392 MW. L'ensemble occupe 14 km² de désert et fournit l'électricité pour 140 000 habitants. L'eau utilisée est en circuit fermé.

La plus grande centrale d'Asie se situe en Chine (site de Shouhang Dunhuang, dans le désert de Gobie). Elle occupe une surface d'environ 9 km² et produisait 10 MW en 2009 (Figure 8). Sa capacité a été portée à 100 MW en 2021.



Figure 6 : Centrales PS10 (Séville)



Figure 7 : Centrale Shouhang Dunhuang (Chine)

En France, l'ancienne centrale à tour Thémis (Targassonne, Pyrénées orientales) a repris du service avec le projet PEGASE (EDF/CNRS : Production d'électricité par turbine à gaz et énergie solaire). Ce projet a pour but la mise en place et l'expérimentation d'un prototype de centrale solaire à haut rendement basé sur un cycle hybride à gaz à haute température constitué d'un récepteur solaire à air pressurisé et d'une turbine à gaz de 2 MWe ; un appoint de chaleur par combustion permet de maintenir le fonctionnement de la turbine quelque soit l'ensoleillement (Figure 8).

Pour cela on a remis en état la centrale à tour : une centaine d'héliostats concentrent les rayons de soleil sur la tour de 101 m de haut, là où circule l'air comprimé qui entraîne une turbine partiellement assistée par une combustion de gaz afin d'augmenter la température et assurer la production d'électricité pendant les périodes de moindre ensoleillement.

Ce concept expérimenté représente l'un des types de centrale solaire de troisième génération.

Si l'on veut augmenter les rendements énergétiques, des voies sont ouvertes avec les composants des caloporteurs, l'optimisation des miroirs et du revêtement sélectif. On envisage ainsi un potentiel d'amélioration de 20 à 30 %.



Figure 8 : Centrale Thémis (France)

Liste des centrales à tour de plus de 100 MW opérationnelles en 2022 :

- Ivanpah (Désert de Mojave, Californie, USA) : 3 tours totalisant 377 MW
- Noor III (Ouarzazate, Maroc) : 1 tour développant 150 MW
- Ashilim 3 (Désert du Néguev, Israël) : 1 tour développant 150 MW
- Crescent Dunes (Nevada, USA) : 1 tour développant 150 MW
- Cerro Dominador (ex Atacama) (Chili) : 1 tour développant 150 MW
- Shouhang Dunhuang (100 MW) Chine : 1 tour développant 100 MW

Les centrales à tour à effet de cheminée :

Les rayons solaires ne sont plus ici concentrés sur un récepteur : l'air est chauffé par effet de serre par une surface de captage solaire formée d'une couverture transparente (verre, plastique) au centre de laquelle s'élève

une tour très haute (voir figure 10). L'air chauffé monte ainsi dans la tour ; la différence de température entre la partie basse et la partie haute de la tour provoque, par effet de convection, un déplacement continu de l'air qui permet à des turbines (placées à la base de la tour) de produire de l'électricité.



Figure 9 : Centrale de Manzanares

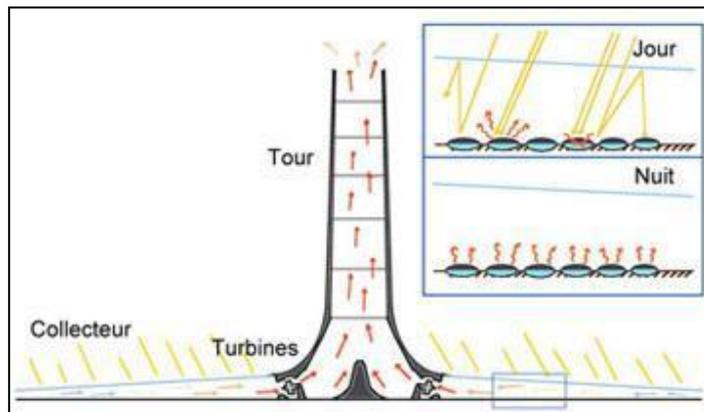


Figure 10 : Principe d'une centrale à effet de cheminée

Le principal avantage de ce système est qu'il peut fonctionner sans discontinuer en utilisant le rayonnement du soleil le jour et la chaleur emmagasinée dans le sol la nuit. Un prototype de 194 m de haut, sur une surface de captation de 46 000 m², d'une puissance de 50 kW a fonctionné en Espagne (Manzanares) entre 1981 et 1989 (voir Figure 9). Cette centrale a été arrêtée à cause d'un coût trop élevé du kilowatt-heure.

Aujourd'hui le projet le plus ambitieux est australien (projet Buronga) dans le désert de New South Wells. La tour atteindrait environ 1000 m et 70 m de diamètre, la surface occupée par la « serre » serait de 5 km² ; la puissance électrique attendue est de 200 MW mais ce projet qui aurait dû démarrer en 2010 se heurte à des problèmes technologiques et de de financement.

Les centrales à capteurs paraboliques

Dans ce type de centrale, une parabole s'orientant automatiquement concentre le rayonnement en son foyer qui est le récepteur du système : il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant un gaz qui est monté en température par l'effet de concentration.

Cela actionne un moteur qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique

Aujourd'hui une seule centrale industrielle de ce type fonctionne (depuis 2010) : la centrale de Maricopa (USA), elle a une puissance de 1,5 MW mais a été arrêtée en 2011 pour faillite (voir Figure 11).



Figure 11 : Centrale de Maricopa

Dans contexte, le projet européen DESERTEC, lancé par des industriels Allemands le 13 Juillet 2009, devait utiliser cette filière : des dizaines de centrales solaires tout autour du SAHARA enverront une partie de leur électricité vers l'Europe ; la technologie sera classique : des séries de miroirs paraboliques capables de suivre la course du soleil concentrent la lumière vers une structure cylindrique échauffant un fluide jusqu'à 400° C. Mais le gouvernement Algérien a annulé la réalisation de ce projet en 2020.

En France, un système expérimental a été développé dans la cadre du projet international EnviroDish (site d'Odeillo, Font-Romeu). Il consiste en une centrale solaire à réflecteur parabolique. Son miroir parabolique de 8,5 m de diamètre et son moteur Stirling qui permet d'obtenir une puissance électrique de 10 kW. Le site d'Odeillo est un des 7 sites de référence du projet EnviroDish auquel participent le consortium des constructeurs et les exploitants. Les autres sites étant la Plateforme Solaire d'Almeria (Espagne), à Vellore (Inde), à Milan (Italie), à Séville (Espagne) et à Würzburg (Allemagne).

Cette technologie de coût très élevé n'est cependant pas adaptée à une production de masse, par contre c'est la seule qui puisse être mise en œuvre dans des sites isolés de petites tailles.

3. STOCKAGE

Le stockage d'énergie est un atout majeur de certaines technologies solaires thermodynamiques. Cela leur permet de fonctionner en continu. En effet une centrale solaire thermodynamique ne produit de l'électricité que lorsqu'il y a du soleil, le stockage permet donc à cette même centrale de produire pendant les périodes d'ensoleillement faibles ou nulles. Plusieurs procédés de stockage peuvent être utilisés ; par exemple :

Le stockage à sels fondus : dans ce cas au lieu d'utiliser l'eau comme fluide caloporteur on utilise des sels fondus placés à l'intérieur d'un tube récepteur. Le rayonnement concentré chauffe les sels fondus jusqu'à 550 °C qui sont ensuite stockés dans un réservoir. Quand c'est nécessaire les sels fondus chauds passent par un échangeur thermique pour fournir la vapeur nécessaire à la production d'électricité puis retournent dans le réservoir froid.

Le système à sels fondus a été utilisé pour la première fois dans une centrale de taille commerciale à la centrale de Gemasolar, en Espagne, (puissance 19,9 MW, entrée en service : octobre 2011) permettant le record de production d'électricité 24 heures sur 24 pendant 36 jours consécutifs.

Le stockage sur lit de roche : ce procédé (étudié au CEA) consiste à faire passer le fluide caloporteur dans un réservoir thermique vertical contenant un lit de roches (cailloux, galets) ; le fluide chauffe progressivement le lit de roches de haut en bas. Le lit de roche conserve la chaleur pour la réinjecter dans le circuit en cas de passage nuageux ou la nuit.

Le fluide caloporteur qui sort froid du réservoir est ensuite renvoyé vers le récepteur pour être de nouveau chauffé. Cette capacité de chauffage permet un fonctionnement continu de la centrale.

4. CONCLUSION

L'énergie solaire thermique est aujourd'hui bien maîtrisée en termes technologiques et économiques et a l'avantage d'être propre, abondante et gratuite mais elle est intermittente puisqu'elle dépend de l'ensoleillement. Pour le chauffage elle est stockée dans un cumulus mais l'appoint d'autres formes d'énergie est nécessaire pour les périodes climatiques les plus défavorables.

Les technologies solaires thermodynamiques présentent un avantage majeur par rapport au photovoltaïque : elles permettent de prolonger la production d'électricité au-delà de la période d'irradiation solaire, moyennant un investissement additionnel, en stockant le fluide caloporteur dans des réservoirs pour pouvoir en extraire la chaleur plusieurs heures après le coucher du Soleil.

De plus, la production d'électricité par centrale solaire thermodynamique a l'avantage par rapport à celle produite par la filière photovoltaïque, qui produit directement l'électricité, d'être moins saccadée du fait de l'inertie thermique du fluide chauffé.

La durée de vie d'une installation est estimée entre 25 et 40 ans ; certaines technologies de la concentration bénéficient déjà d'un retour d'expérience important.

À ce jour, le solaire thermodynamique n'est plus considéré comme un concurrent du photovoltaïque, mais comme une solution de stockage d'énergie permettant de compenser les variations des énergies intermittentes. Ainsi, l'Afrique du Sud a organisé un appel d'offres qui donnait aux centrales solaires thermodynamiques un bonus de 270 % en plus du tarif de base pour produire de l'électricité en fin d'après-midi et en soirée.

Plus récemment, à Dubaï, la centrale hybride Noor Energy 1, combinant solaire thermodynamique et photovoltaïque, est en construction et doit comprendre un stockage de 550 000 tonnes de sels fondus, le plus grand jamais réalisé, pour fournir de l'électricité nocturne à 92 \$/MWh, alors que l'électricité produite pendant la journée par la partie photovoltaïque de la centrale coûtera 24 \$/MWh.

Par ailleurs, le Plan national 2021-2030 pour l'énergie et le climat de l'Espagne, soumis en 2019 à l'Union européenne, envisage l'installation de 5 GW de solaire thermodynamique en plus des 2,5 GW existants. Ces 5 GW supplémentaires seraient entièrement consacrés à stocker de l'énergie pour les usages nocturnes, les usages diurnes étant couverts par du photovoltaïque.

À titre d'exemple donnons la comparaison en termes de puissance et d'énergie électrique entre les trois filières éolienne, solaire thermodynamique et nucléaire, par unité productrice :

- Une grande centrale éolienne récente : puissance = 5 MWc¹ énergie = 16 GWh/an
- Une centrale solaire thermodynamique type Andasol : puissance = 50 MWc, énergie = 182 GWh/an
- Un réacteur nucléaire de Flamanville : puissance = 1300 MW, énergie = 9000 GWh/an

Ces comparaisons doivent cependant être modulées en fonction des facteurs de charges (ou rendement) respectifs ; ils sont de l'ordre de 80% pour le nucléaire et entre 30 et 40 % pour le solaire thermique qui est une énergie intermittente fortement dépendante du temps d'ensoleillement.

Enfin, l'utilisation de la chaleur résiduelle après génération électrique pour produire de l'eau dessalée ou du froid augmente l'intérêt des installations solaires thermodynamiques.

5. RÉFÉRENCES

- [1] CEA de la recherche à l'industrie, Clefs CEA n°49/50/51
- [2] CEA jeunes : l'énergie (les docs des incollables)
- [3] ADEME
- [4] 13^{ème} journées internationales de thermiques d'ALBI (Ecole des Mines), août 2007 (*un nouveau concept de centrale solaire thermodynamique basé sur un récepteur à lit fluidisé. 12^{ème} rencontres scientifiques de la région Centre*)
- [5] Syndicat des énergies renouvelables (www.enr.fr)
- [6] desertec.org/
- [7] Connaissance des Énergies (CDE)
- [8] direns.mines-paristech.fr
- [9] [Fiche argumentaire GAENA "Energie solaire photovoltaïque"](#)
- [10] [Fiche argumentaire GAENA "Effet de serre"](#)

¹ Wc = Watt crête. Puissance maximale fournie par la centrale dans les conditions optimales d'ensoleillement.