

# Chapitre 2 Les énergies intermittentes

## 2<sup>ème</sup> partie

### L'énergie solaire

C'est aussi une énergie intermittente, puisque les installations solaires, par définition, ne fonctionnent que pendant la journée, et bien sûr seulement quand il y a du soleil, mais... Les centrales solaires ont un profil de production beaucoup plus attractif que celui des parcs éoliens, car les consommateurs ont besoin d'énergie surtout pendant la journée (lorsque le soleil brille), alors que le vent qui peut aller et venir à tout moment de la journée est très aléatoire.

L'énergie solaire bénéficie d'un jugement plutôt favorable. Mais surtout, la plus usitée, le photovoltaïque (PV), est vue, par les particuliers, comme une alternative à l'achat de l'électricité à EDF, puisqu'on peut en installer en autoconsommation et donc tendre vers l'autonomie, en couplant cette production avec des moyens de stockage : batterie, ballon d'eau chaude. Et l'Etat leur alloue aussi de larges subventions.

Cette énergie, à l'utilisation, ne pollue pas, n'émet de gaz à effet de serre, mais il n'en est pas de même pour la fabrication et le démantèlement.

Elle a le grand avantage cependant d'être immobile et surtout non bruyante, elle n'a pas d'effets négatifs sur l'environnement pendant son utilisation, contrairement à l'éolien.

L'énergie solaire permet de répondre à deux types de besoins, à savoir essentiellement la production d'électricité et la production de chaleur.

### Le solaire thermique

Le plus simple pour récupérer la chaleur du soleil est encore l'utilisation de baies vitrées dans les bâtiments ; elles peuvent apporter une chaleur non négligeable surtout en intersaison.

Fondé sur l'ensoleillement, le solaire thermique utilise les rayons du soleil de manière directe : c'est une énergie renouvelable consistant à produire de la chaleur ou de l'eau chaude à partir de capteurs solaires, le plus souvent posés sur toiture. Le rendement des panneaux est intéressant : il dépasse aisément 50 %.

Donc, pour la production d'eau chaude sanitaire, chacun peut installer chez soi un chauffe-eau solaire qui peut remplacer pendant une bonne partie de l'année un ancien chauffe-eau électrique (ou à gaz). C'est intéressant. Cependant l'installation est encore coûteuse au départ et nécessite une quinzaine d'années d'amortissement.

De plus, il est possible de raccorder cette production au circuit d'un chauffage central (dans ce cas, c'est un système solaire combiné), en relève d'une chaudière quelle qu'elle soit, ce qui permet d'économiser l'électricité (ou le fuel, ou le gaz...). Dans ce cas, le panneau solaire thermique chauffe aussi l'eau d'un ballon au travers duquel passe l'eau du chauffage (*sur le circuit retour*). L'économie d'énergie réalisée dépend de la quantité d'eau stockée dans le ballon, c'est-à-dire de la capacité du réservoir.

Ce qui est possible dans un logement individuel l'est aussi dans des immeubles ou des locaux commerciaux, voire industriels, de quelque taille qu'ils soient...

Il est possible d'utiliser aussi le solaire thermique pour des réseaux de chaleur.

Dans certains pays, le stockage inter saisonnier (voir dans notre chapitre sur le stockage de l'énergie) et la relève par gaz ou pompe à chaleur permet d'assurer plus de 60 % des besoins d'un réseau. Il offre l'avantage d'un coût de la chaleur compétitif grâce aux économies d'échelles réalisées.

## **Les panneaux photovoltaïques** (ou capteurs solaires) **pour la production d'électricité**

Ils sont utilisables à la ville comme à la campagne, en petites (sur un camping-car ou un bateau) ou en grandes installations (au sol, ou sur toitures et parkings de grandes surfaces, sur des ombrières, des toits d'usines ou de bâtiments agricoles...).

Ils résistent au froid et aux intempéries et ont une durée de vie de 20 à 35 ans. Si on ajoute à cela que le coût des installations a fortement baissé du fait de la surproduction en Chine, il ne faut pas s'étonner que beaucoup de particuliers aient adopté cette solution pour leur propre maison, pour leur propre consommation, avec éventuellement revente du surplus de production à EDF, ce qui permet d'amortir les investissements réalisés lors de l'installation.

Cette énergie bénéficie aussi d'aides de l'Etat, ce qui la rend très attractive pour des particuliers.

De plus, c'est une énergie silencieuse, contrairement à l'éolien par exemple. Ce tableau serait quasi idyllique s'il n'y avait quelques inconvénients dont le plus important est l'intermittence.

### **Inconvénients**

Le premier est que les panneaux photovoltaïques voient leurs performances se dégrader avec l'élévation de leur température de surface : la chaleur détériore leurs performances. Plus la température est élevée, plus les photons traversent les cellules photovoltaïques arrachant au passage des électrons aux atomes de silicium et réduisant la production d'électricité. Sous des températures ambiantes de 35 degrés, les cellules peuvent atteindre 80 degrés en surface et perdre jusqu'à 30% de leur rendement. Un panneau photovoltaïque dont la température de surface dépasse 25 degrés perd 0,45% de rendement par degré supplémentaire.

De plus, le soleil ne brille pas de la même manière à Oslo qu'à Ouagadougou. La production n'est possible que pendant la journée (courte ou longue, selon l'endroit où on se trouve et selon les saisons). L'énergie non consommée le jour doit être stockée pour la nuit et pour les moments où le ciel se voile de nuages. C'est un problème récurrent qui concerne toutes les énergies intermittentes. La solution individuelle de stockage est la batterie, qui est source et occasion de pollution (voir à ce sujet la partie de ce livre qui y est consacrée) et est très chère. D'autres solutions existent (production et stockage de chaleur dans des ballons par exemple), mais restent très partielles et demandent encore des efforts sérieux de recherche et de développement en raison du coût et des problèmes de sécurité.

Pour l'instant, même s'il y a eu des progrès importants, les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 %, ce qui constitue un handicap important encore en raison de la surface nécessaire pour leur implantation.

Mais la recherche en cours en Pologne, en Grande-Bretagne et en Suisse permet d'espérer de meilleurs rendements ainsi qu'une baisse des coûts de production grâce à la perovskite (matériau plus écologique (qu'on ne chauffe qu'à 100 °C et pas à 900 !), moins cher que le silicium et donnant de meilleurs rendements), ce qui aurait pour conséquence la miniaturisation progressive des panneaux et un gain appréciable pour la surface d'installation (voir plus loin).

Ce qui est certain, c'est qu'il y a une grande marge de progrès et que contrairement à l'éolien qui, lui, est arrivé à maturité et ne peut gagner en puissance qu'avec l'augmentation de la taille des mâts et des pales, on peut s'attendre à une très grande amélioration dans les années qui viennent. Par ailleurs, si pendant le temps d'exploitation, le photovoltaïque (PV) n'entraîne pas de pollution, il n'en est pas de même avant et après. Les conditions d'extraction, en Chine ou en Afrique, du silicium

et autres métaux lourds (cuivre, chrome, cadmium et tellure) qui sont utilisés pour la fabrication des panneaux photovoltaïques, sont très souvent épouvantables. En outre, ce sont surtout les centrales au charbon chinoises (très polluantes, rappelons-le) qui sont utilisées pour traiter le silicium qu'il faut chauffer à des températures de 900°C, voire davantage. Enfin, les déchets toxiques des panneaux en fin de vie nécessitent un traitement particulier. Une usine est programmée à cet effet en France, mais combien de temps aura-t-il fallu attendre ?

## **Les centrales solaires thermodynamiques (appelées aussi « four solaires à concentration »)**

### **Le fonctionnement de ces centrales**

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température. Pour ce faire, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et de concentrer les rayonnements tout au long du cycle solaire 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, dont les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et leur variante à miroirs de Fresnel, les centrales à tour et enfin les concentrateurs paraboliques Dish-Stirling (du type Font-Romeu, Odeilho dans les Pyrénées Orientales qui est un système de concentration par foyer.

Nous développerons ce seul exemple : les « **systèmes de concentration par foyer** » : le rayonnement solaire est concentré environ 1 000 fois à destination d'un foyer unique de taille réduite. La température peut atteindre de 500 à 1 000°C. **Dans ces centrales à tour**: des centaines de miroirs suivant la course du soleil (les « héliostats ») réfléchissent et concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur central situé au sommet d'une tour, dans lequel circule le fluide caloporteur. La chaleur du fluide est alors transférée à un cycle classique à vapeur pour générer de l'électricité. L'électricité produite grâce à l'énergie solaire thermodynamique devrait être compétitive économiquement face aux énergies fossiles d'ici 10 à 15 ans. L'avantage pour ces installations qui peuvent durer de 25 à 40 ans, c'est qu'elles peuvent aussi utiliser la cogénération, c'est-à-dire l'utilisation de la chaleur résiduelle après génération électrique. De plus, la capacité à stocker de la chaleur rend la production d'électricité moins « saccadée » que la production d'électricité photovoltaïque. C'est le cas à Ouarzazate (au Maroc) où la chaleur stockée permet de produire de l'électricité pendant 6 à 7 heures la nuit.

Mais... il faut un ensoleillement direct, pas une irradiation diffuse. Or l'ensoleillement direct français n'est pas suffisant pour envisager des projets substantiels en métropole. C'est donc plus indiqué pour les zones équatoriales et tropicales, encore que pour celles-ci, le manque d'eau peut constituer un handicap : certaines technologies requièrent une grande quantité d'eau à disponibilité, essentiellement pour nettoyer les miroirs. Selon les estimations, une centrale à concentration thermodynamique à tour d'une puissance de 50 MW consomme 300 000 m<sup>3</sup> d'eau par an. Cette double contrainte soleil/eau rend délicat le choix de la localisation de ce type de centrales.

En France, c'est tout de même réalisable dans les régions les plus ensoleillées, mais de fait, il y a très peu de réalisations : une à Llo dans les Pyrénées Orientales, et une à Aspres-sur-Buech dans les Hautes Alpes, qui sont en fait des installations expérimentales.

**L'avenir du photovoltaïque** : Parmi les solutions solaires, le photovoltaïque est le principal atout, malgré son actuel faible facteur de charge ( 20 %) : d'une part, c'est assez simple d'installation, d'autre part, cette solution devrait dans un avenir proche devenir plus rentable et plus simple. Plus simple, parce que les panneaux deviennent de plus en plus performants (les plus récents au silicium en sont à 25 % de rentabilité) et pourront se miniaturiser.

L'abondance de l'énergie issue du Soleil est telle que couvrir 0,05 % de la surface terrestre avec des cellules solaires ayant 20 % seulement de rendement suffirait à couvrir les besoins actuels de l'humanité. Ou encore, est-il dit, 100 km sur 100 km de panneaux dans un désert comme le Sahara.

Mais reste le problème de l'intermittence.

Le silicium n'est pas directement exploitable puisqu'il n'est pas présent à l'état pur. Il doit donc être extrait de différents minéraux, comme la silice (ou dioxyde de silicium  $\text{SiO}_2$ ), avant d'être exploité. Pour ce faire, il faut chauffer la matière première dans de puissants fours à arcs (jusqu'à 35 MW) afin d'atteindre des températures en moyenne de 1700 °, mais qui peuvent être parfois supérieures à 3.000 °C, ce qui rend la production onéreuse. Cependant, compte tenu de la surproduction (due à la Chine), les panneaux sont devenus plus accessibles. De plus, la recherche continue et rend les panneaux au silicium de plus en plus rentables.

Mais il semble bien qu'on pourra se passer, peu ou prou, du silicium, dans un délai assez court, puisqu'une autre matière pourrait bien le supplanter rapidement : la pérovskite. Initialement considérée comme un minéral, la pérovskite (du nom d'un minéralogiste russe, Perovski) désigne aujourd'hui une structure atomique particulière, répandue dans la nature et facile à obtenir en laboratoire.

En 2013 une jeune Polonaise, Olga Malinkiewicz, crée une cellule photovoltaïque en posant une couche de pérovskites par évaporation, et finalement par simple impression à jet d'encre. Du coup, plus besoin de hautes températures pour mettre une couche photovoltaïque, sur tout type de support.

Au bout du compte, cela finit par donner des panneaux solaires légers, souples, efficaces, à taux de transparence et à teinte variables, qu'on peut poser facilement sur un ordinateur, une voiture, un drone, un vaisseau spatial ou un bâtiment, même à l'intérieur... et bon marché. Les handicaps des débuts de la matière (manque de stabilité, sensibilité à l'humidité) semblent bien avoir été résolus puisque la production industrielle est sur le point de démarrer. Bientôt, une usine, à Wroclaw (Pologne), fabriquera 180 000 m<sup>2</sup> de panneaux solaires en pérovskite. Et d'autres doivent suivre en Suisse et en Allemagne.

**Les cellules tandem** : l'idée d'associer le silicium et la pérovskite a abouti aux cellules « tandem » qui apportent des performances supérieures

## Autres développements du photovoltaïque

### Vitrage photovoltaïque :

Il s'agit dans des bâtiments à énergie positive, de vitrage opacifiant alimenté par une surface **photovoltaïque**, qui sert de fenêtre, mais aussi de brise-soleil et de store.

Le vitrage s'opacifie en fonction de la luminosité ambiante, tout en conservant la transparence attendue d'une fenêtre. Les cellules photovoltaïques captent la lumière et la transforment **en électricité**. L'énergie produite alimente le système d'occultation ainsi que l'électronique intégrée dans un boîtier de contrôle installé sur la menuiserie.

Le rendement de ces panneaux est moindre que ceux, classiques, des toits, mais cela apporte d'autres avantages, entre autres celui de ne pas avoir à rechercher des surfaces d'implantation.

### Les films photovoltaïques organiques flexibles.

Dans le même ordre d'idées, cette solution – qui se distingue des cellules photovoltaïques classiques au silicium – dispose de solides atouts : sa légèreté, sa souplesse (films flexibles), sa portabilité et le fait qu'elle ne contienne aucun métal rare notamment. Ces films solaires captent l'énergie du soleil sur toutes

les surfaces disponibles, comme les bâtiments, serres, mobiliers urbains, parkings, textiles, sacs. Il existe même un prototype de bâche qui recharge la batterie d'une voiture électrique et peut lui donner une autonomie supplémentaire de 8000 km / an : (voiture électrique La Gazelle). En laboratoire, on est allé jusqu'à intégrer des cellules à des tissus et à des vêtements.

### **Les nano-particules**

Par ailleurs, l'utilisation de plus en plus fréquente de nano-particules combinées aux autres matériaux renforce toutes ces possibilités et augmente sensiblement le rendement des panneaux.

### **L'agrivoltaïsme :**

Les étés étant de plus en plus chauds et secs, les raisins ayant tendance à trop « cuire », quelques viticulteurs ont décidé d'utiliser des panneaux photovoltaïques pour leur faire de l'ombre. C'est une solution avantageuse puisque, en même temps, ils peuvent vendre l'électricité produite. Mais l'inconvénient, c'est que toutes les zones viticoles risquent d'être couvertes de panneaux bleus, ce qui nuirait sensiblement à la beauté des sites. La solution des panneaux sur les toits et les zones « délaissées » comme les friches industrielles nous paraît bien préférable, d'autant plus qu'il existe une autre solution, expérimentée par l'INRA de Montpellier, qui consiste à créer des haies d'arbres pour faire de l'ombre dans les vignes.

D'autre part, la couverture des serres peut être exploitée, grâce à des panneaux translucides, pour capter la chaleur en même temps qu'on produit de l'électricité.

Mais s'il s'agit de panneaux classiques, sur champ ou sur serre, il y a souvent dévoiement par rapport aux besoins agricoles, en raison des loyers généreux accordés par les opérateurs. Les serres restent trop souvent vides et les cultures abandonnées. On a même assisté parfois à des abus : des agriculteurs ont construit des hangars inutiles, uniquement pour faire poser des panneaux PV. Résultat : des serres solaires gigantesques mais vides depuis des années de toute production, sont devenues le symbole de l'artificialisation des terres agricoles sous des prétextes énergétiques.

### **Un prolongement du photovoltaïque : Pour la ressource en eau, la collecte de l'eau**

**atmosphérique** pour répondre aux besoins en eau potable (l'atmosphère préserve en permanence plus de 12 900 milliards de tonnes d'eau potable). Le dispositif consiste donc à : capturer la vapeur d'eau de l'air avec de l'hydrogel, généralement la nuit ou le soir ; utiliser la chaleur du panneau pendant la journée, pour entraîner l'évaporation de l'eau atmosphérique capturée hors de l'hydrogel afin de refroidir ce même panneau ; recueillir la vapeur d'eau ainsi formée pour générer de l'eau douce et arroser les cultures. Piste intéressante et, semble-t-il déjà utilisée aux Etats-Unis dans les régions qui subissent des pénuries d'eau.

### **Eléments de conclusion**

On voit donc que l'énergie solaire photovoltaïque (que ce soit avec des panneaux au silicium ou à la perovskite, combinés ou non avec des nano-particules) est en pleine évolution et qu'on peut attendre, grâce à elle, une très forte progression en matière de production d'électricité. Elle n'est pas arrivée à maturité, loin s'en faut, ce qui n'est pas le cas de l'éolien qui lui, étant arrivé à maturité, risque fort d'ici une décennie ou deux, de tomber dans l'obsolescence.

Il reste que cette source d'énergie électrique, plus intermittente encore que l'éolien, dépend des possibilités de stockage de l'électricité qui sont impossibles à réaliser à grande échelle.

Cependant, une grosse augmentation de producteurs d'électricité privés en auto-consommation très subventionnée aura pour conséquence d'augmenter la somme globale des aides que l'Etat octroie et ainsi le TURPE, évoqué plus haut, que tous les contribuables paient **dans** leur facture d'électricité pour la financer, risque de peser de plus en plus lourd en faveur de ceux qui sont équipés de PV et au détriment des autres qui ne le sont pas.

Au total, le solaire photovoltaïque reste donc handicapé par l'impossibilité de stocker à grande échelle l'électricité produite. Seul le solaire thermique est capable de stocker l'énergie et peut contribuer localement à économiser l'électricité par son utilisation dans les réseaux de chaleur (chauffage de logements, bâtiments et locaux divers et eau chaude sanitaire= ECS).

La chaleur est stockable, ce qui constitue un avantage pour le solaire thermique par rapport au photovoltaïque.

Cependant, en matière de photovoltaïque, le développement des solutions individuelles, à savoir des installations en toiture avec autoconsommation (et stockage éventuel par batterie) intéresse beaucoup les particuliers. Il peut jouer en quelque sorte un rôle de délestage pour le réseau national. Il suffirait que le prix des batteries soit divisé par deux (et c'est, paraît-il, ce qu'on peut espérer pour dans quelques années) pour que cette solution décolle. Mais pour l'instant, elle reste peu développée en raison du coût des investissements nécessaires, qui ne sont pas à la portée de tous les particuliers, loin s'en faut.

Selon certains spécialistes, le coût des cellules solaires pourrait baisser de 20 % pour chaque doublement de la production d'électricité photovoltaïque. Si cela se confirme, la part de l'électricité solaire pourrait atteindre les 20 % en 2030 (contre 2,8 % fin 2018), mais en intermittence, rappelons-le.

Notons aussi que les panneaux photovoltaïques actuels contiennent pas moins de dix métaux rares.

Par ailleurs, nous ne sommes pas favorables aux vastes champs photovoltaïques sur le sol, notamment sur des terres agricoles et des garrigues tels qu'ils commencent à apparaître un peu partout en France. Cela dénature les paysages d'une part, et d'autre part diminue les surfaces cultivables. Le photovoltaïque doit être réservé aux toitures ainsi qu'à certaines zones délaissées (friches industrielles entre autres) et à des parkings de zones commerciales par exemple (ombrières). L'ADEME a fait un calcul des possibilités qui, selon le rendement actuel des panneaux, permettrait d'installer une puissance de plus de 400 gigawatts (pour mémoire, puissance installée actuelle : 8,7 GW).

Au total, le solaire photovoltaïque est critiqué comme l'éolien, pour son intermittence et la forte consommation de métaux rares.

Cependant, il a plus d'arguments en sa faveur à faire valoir, à cause de la plus grande variété de ses usages possibles, de ses possibilités d'améliorations plus importantes, de ses moindres inconvénients pour ses riverains et surtout dans les pays du Sud : il est très rentable à partir du Sud de l'Espagne.