

ENERGIES RENOUVELABLES

Une **énergie renouvelable** est une énergie renouvelée ou régénérée naturellement à l'échelle d'une vie humaine. Elles sont issues de phénomènes naturels, réguliers et constants, provoqués par les astres. Elles proviennent :

- Principalement du Soleil : Rayonnement, cycle de l'eau, vents, photosynthèse,...
- De la chaleur interne de la Terre : La géothermie
- De la rotation propre de la Terre et du système Terre-Lune : L'énergie marémotrice.

Le bois, l'hydraulique et l'éolien sont issus de l'énergie solaire.

Seules la géothermie et l'énergie marémotrice échappent à cette règle.

Le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont des énergies fossiles. De même, l'énergie nucléaire issue de la fission des atomes d'uranium, ne peut pas être considérée comme une énergie renouvelable, l'extraction de l'uranium étant limitée.

La fusion nucléaire pourra être considérée comme une énergie inépuisable.

Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Ainsi, le bois est-il une énergie renouvelable tant qu'on abat moins d'arbres qu'il n'en pousse, et que la forêt continue à jouer ses fonctions écologiques vitales. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans cette définition.

Énergie éolienne

L'exploitation de la force propulsive du vent est ancienne, et utilisée depuis l'Antiquité pour se déplacer sur l'eau avec des bateaux à voile. Elle a été exploitée ensuite à l'aide de moulins à vent équipés de pales en forme de voile. Ces moulins permettaient de pomper l'eau ou d'actionner des meules pour moudre le grain.

Énergie hydraulique

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. La plus connue est celle des moulins à eau, placés le long des rivières. Par le passé de nombreux sites avaient été parfaitement équipés. De nos jours l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages et sert principalement à la production d'électricité.

En 1961, l'hydraulique - donc le renouvelable - représentait 51% de la production d'électricité en France. Ce qui est loin du pourcentage actuel.

Énergie géothermique

Les Grecs et les Romains de l'antiquité connaissaient déjà l'usage de l'énergie géothermique, dans des villes d'eau comme Aix-en-Provence, Aix-les-Bains, ..., mais également les puits provençaux qu'ils construisaient pour climatiser leurs habitations.

Technologies environnementales

Énergie des végétaux : La biomasse.

Il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Cette énergie est exploitée par combustion. Cette énergie est considérée comme renouvelable si on admet que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. On peut citer notamment le bois et les biocarburants.

Énergie de l'eau : Les futures énergies hydrauliques.

- Énergie des vagues : utilise la puissance du mouvement des vagues,
- Énergie marémotrice : issue du mouvement de l'eau créé par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée),
- Énergie hydrolienne : Les hydroliennes utilisent les courants sous marins,
- Énergie maré-thermique : produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans,

Énergie osmotique : La diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer est source d'énergie.

Énergie interne de la Terre



Centrale géothermique de Nesjavellir en Islande

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. La plus grande partie de la chaleur de la Terre est produite dans la croûte terrestre : c'est l'énergie produite par la lave contenue dans le magma.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.

Cas particulier de l'hydrogène

L'hydrogène n'est pas une source d'énergie, mais un vecteur d'énergétique. car il pourrait à l'avenir remplacer les vecteurs d'énergie produits à partir du pétrole (essence, kérosène, diesel, etc.).

Vecteur énergétique : réservoir d'énergie, permettant de stocker cette énergie (et si possible de la transporter) pour une utilisation future.

De nombreuses recherches sont actuellement faites pour développer la pile à combustible, qui permet de créer de l'énergie électrique à partir d'énergie chimique stockée dans des composés chimiques, dont l'hydrogène. En revanche, cela ne résout pas le problème des approvisionnements, puisque la fabrication de cet hydrogène requiert par construction exactement autant d'énergie qu'elle va en dégager.

Dans le cadre du présent article sur les énergies renouvelables, il faut préciser que la production d'hydrogène nécessite de l'énergie. Par exemple: énergie électrique pour électrolyser l'eau en hydrogène et oxygène.

Si l'énergie électrique est fournie par des centrales à combustibles fossiles, nucléaire ou non renouvelables, la pile à combustible n'est pas une énergie renouvelable.

En revanche, si la production d'électricité est renouvelable (hydroélectricité, photo voltaïque, éolien), la pile à combustible fournit une énergie renouvelable, le cycle de l'eau, le gisement solaire et le vent sont renouvelables. L'hydrogène est un vecteur de transport et de stockage d'énergie.

Plusieurs projets sont à l'étude concernant le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène. Un exemple de projet de ce type est le Projet Pure (dans les îles Shetland), où des éoliennes sont associées à un électrolyseur pour produire de l'hydrogène en continu et de manière totalement propre.

Énergie solaire



Modules photovoltaïques

Article détaillé : [Énergie solaire](#).

L'énergie solaire provient de la fusion nucléaire d'atomes (ou plutôt de *noyaux* d'atomes) d'hydrogène qui se produit au cœur du Soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'Univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique de photons selon la théorie corpusculaire.

La Terre est illuminée par le Soleil en permanence. L'une des deux faces du globe terrestre se trouve privée d'énergie solaire pendant la nuit en raison de la rotation de la Terre. La puissance

solaire reçue en un point du globe varie en fonction de l'heure de la journée, de la saison et de la latitude du lieu considéré.

- Énergie solaire thermique, production de chaleur, par conversion de l'énergie contenue dans le rayonnement solaire, très rentable pour le chauffage dans les régions ensoleillées.
- Énergie solaire thermodynamique héliothermodynamique ou encore thermo solaire production de vapeur (ou chauffage d'un gaz) à partir de la chaleur du soleil par concentration, puis conversion de la vapeur en électricité,
- Énergie photovoltaïque, production d'électricité à partir de la lumière, notamment à l'aide de panneaux solaires.
- Énergie solaire passive, utilisation directe de la lumière pour le chauffage.
- Voile solaire, également nommée *photo-voile*, pour les zones spatiales pas trop éloignées du soleil.

Énergie solaire passive

L'énergie solaire passive a depuis longtemps été utilisée comme source d'énergie dans l'architecture. Les technologies ont récemment évolué, permettant la réalisation de maisons solaires passives totalement optimisées d'un point de vue thermique. Les performances peuvent plus ou moins s'approcher de l'autonomie énergétique selon l'investissement. Certains projets, comme à Gennevilliers, visent à construire des immeubles de bureaux produisant plus d'électricité qu'ils n'en consomment.

Énergie éolienne

 Article détaillé : Énergie éolienne.



Une éolienne moderne dans un paysage rural

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur .

- Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique .

Énergie solaire



Rayonnement solaire direct.

L'**énergie solaire** est l'énergie du Soleil par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère. Notre étoile date de 5 milliards d'années, la température de cette fournaise thermonucléaire en son centre est approximativement de 15 millions de degrés et sa taille est d'un million de fois celle de la terre. Elle tire son énergie de la fusion, en transformant à chaque seconde 600 millions de tonnes d'atomes d'hydrogène en hélium ce qui produit une puissance colossale.

Dans l'espace, l'énergie des photons peut être utilisée, par exemple pour propulser une voile solaire.

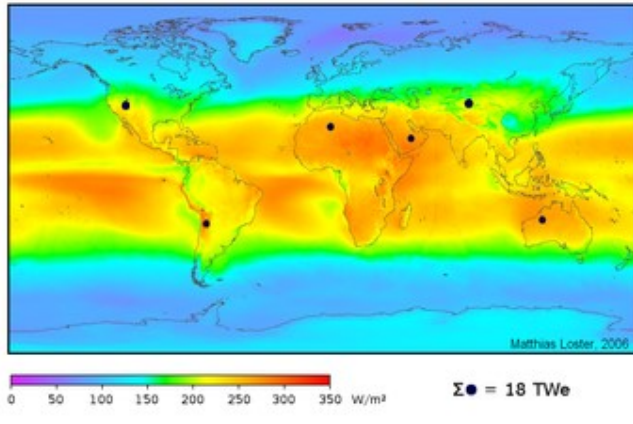
Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse créée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via la chaîne alimentaire. L'énergie solaire est donc à l'origine de toutes les énergies sur Terre à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice.

L'Homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie alimentaire, énergie cinétique, énergie thermique, électricité ou biomasse. L'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de cette dernière.

Nature de l'énergie solaire

La Terre qui est située à une distance raisonnable est illuminée par le Soleil en permanence. La puissance solaire reçue en un point du globe varie en fonction de l'heure de la journée, de la saison et de la latitude du lieu considéré. Elle est en moyenne de 1000W/m^2

Géographie terrestre



Répartition de l'**énergie solaire** reçue au sol.

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- la latitude, vers l'équateur l'angle d'incidence est proche de 90° donc la surface éclairée est plus petite et l'énergie est plus concentrée.
- la nébulosité (nuages), qui est importante à l'équateur et plus faible en milieu intertropical.
- l'énergie solaire envoyée par le Soleil (fluctuations décennales, saisonnières, et ponctuelles).

Le désert des Mojaves dans le sud-ouest des États-Unis est l'une des régions du monde les plus ensoleillées, elle possède une centrale solaire d'une puissance totale de 354 MW¹.

Techniques pour capter l'énergie solaire

Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont constamment améliorées. On peut distinguer le *solaire thermique*, le *solaire passif* et le *solaire photovoltaïque* :

Énergie solaire thermique

On désigne par **énergie solaire thermique** la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique).

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit.

Centrales solaires thermodynamiques



Projet de recherche à Font-Romeu, site d'Odeillo, France

Dans le domaine de la recherche industrielle, certains systèmes permettent de concentrer l'énergie solaire en un point précis qui peut alors atteindre une température considérable. Une production électrique est alors possible via, entre autres, des turbines à vapeur ou d'autres moteurs thermiques.

Des collecteurs paraboliques chauffant un fluide caloporteur circulant dans des tuyaux placés au niveau de leur foyer géométrique ont aussi été développés.

La solution la plus réaliste économiquement à l'heure actuelle, pour la production d'électricité solaire à l'échelle industrielle, consiste à chauffer un fluide caloporteur (eau, sels fondus, huiles synthétiques, ou directement vapeur) en y concentrant le rayonnement solaire. L'irrégularité propre de l'énergie solaire peut être contournée, soit en stockant de la chaleur (avec un réservoir de fluide chaud) soit en hybridant les concentrateurs solaires avec une centrale thermique classique (la chaudière et la chaleur solaire nourrissant la même turbine à vapeur).

La centrale de Mojave en Californie vers 1980, avait fait figure de projet pionnier. Quelque peu oubliée depuis, cette filière revient d'actualité (les inquiétudes sur le réchauffement climatique et sur les réserves d'hydrocarbures aidant), avec de nombreux projets pilotes dans une dizaine de pays. La centrale thermo solaire Nevada Solar One est en construction depuis le 11 février 2006 à Boulder City. À terme, elle développera une puissance de 64 mégawatts et sera la troisième du monde. L'un des principaux projets à venir est celui de Pacific Gas and Electric qui annonça en novembre 2007 la construction d'une centrale solaire de 177 Mw de puissance à San Luis Obispo ; elle générera de l'électricité pour 120 000 foyers².

La Centrale solaire Thémis en France a également produit de l'électricité dans les années 1980, puis a été mise en sommeil faute de rentabilité. Elle est en cours de reconversion.

Le 31 mars 2007, à 25 km de Séville a été officiellement inaugurée une centrale solaire nommée PS10 d'une puissance de 11 MW électrique, dont la production prévue est d'environ

23 GWh par an (soit la production à pleine puissance de 2000 h/an)³. D'autres centrales similaires sont prévues ⁴.

La tour solaire de 1 000 mètres de hauteur, est l'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative. Ce serait une usine d'énergie renouvelable qui fournirait la même puissance qu'un petit réacteur nucléaire tout en étant plus sûre et plus propre.

Un moteur Stirling relié à une génératrice peut aussi bien utiliser un système de concentrateurs paraboliques ou des capteurs plats à fluide caloporteur, selon son gradient thermique de fonctionnement.

Dans les scénarios les plus optimistes, la European Solar Thermal Electricity Association et Greenpeace anticipent une capacité installée de 1 500 GW au niveau mondial. Ces perspectives supposent le développement rapide d'une filière industrielle solaire thermodynamique à concentration, sachant qu'en 2014, le parc de centrales en service comporte une quarantaine de sites au niveau mondial.

Chauffe-eau et chauffage solaire

Un **chauffe-eau solaire** est un dispositif de captation de l'énergie solaire pour fournir de l'eau chaude pour différents usages : sanitaire, appoint chauffage, piscine, ...

Ce type de chauffage permet habituellement de compléter les types de chauffage de l'eau exploitant d'autres sources énergétiques (électricité, énergies fossiles, biomasse, ...) dans certaines conditions il permet de les remplacer totalement.

En Europe occidentale, un chauffe-eau solaire permet de réaliser environ deux tiers (66 %) d'économie sur les besoins en eau chaude, qu'il s'agisse de maisons individuelles (chauffe-eau solaire individuel (CESI)) ou de structures collectives (chauffe-eau solaire collectif (CSC)).

Cela correspond au taux de couverture solaire, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie fournie par la partie solaire d'une installation et la consommation totale de l'installation



chauffe-eau solaire

A l'échelle d'une habitation individuelle ou collective, il est possible d'installer un chauffe-eau solaire, ou un chauffage solaire : il s'agit de capteurs vitrés installés le plus souvent sur la toiture, dans lesquels circule un liquide caloporteur réchauffé par le rayonnement solaire, qui

transmet ensuite la chaleur à un chauffe-eau et éventuellement à un plancher chauffant basse température.

Ce procédé permet de couvrir environ 50 % en moyenne en France des besoins en eau chaude, et d'apporter éventuellement un complément de chauffage.

Technologie des panneaux solaires thermiques

Il existe 3 types de panneaux solaires thermiques :

- *les capteurs plans non-vitrés* : de l'eau circule dans un absorbeur généralement noirs, ouvert à l'air.
- *les capteurs plans vitrés* : un fluide caloporteur circule dans un absorbeur à l'intérieur d'un panneau vitré sur l'une de ses faces et isolé sur les autres.
- *Les collecteurs à tubes sous vide* : un fluide caloporteur circule dans plusieurs tubes à double parois sous vide qui leurs garantissent une très bonne isolation thermique. Le vide étant le meilleur isolant connu, ceci donne un avantage en hiver ou dans des climats froids. Les tubes ont un revêtement interne permettant de capturer plus de 95% de l'énergie solaire.

Constitution

Un chauffe-eau solaire est constitué de plusieurs organes :

- des panneaux solaires (ou capteurs solaires thermiques) qui captent l'énergie du rayonnement solaire en chauffant un fluide caloporteur (eau ou antigel) dans un circuit primaire. Ce dernier est chargé d'acheminer les calories récupérées jusqu'au circuit secondaire ;
- un réservoir d'eau chaude (ou ballon d'eau chaude) dans lequel un volume d'eau est chauffé par le liquide caloporteur à travers d'un échangeur thermique, souvent un serpentin de cuivre ;
- un dispositif de chauffage d'appoint est souvent intégré au réservoir, sous forme d'une résistance électrique ou de liaison à une chaudière à gaz/fioul/bois. L'énergie solaire ne suffit pas en permanence aux besoins. On peut éviter l'appoint avec une plus grande installation pour pallier les creux ou en adaptant la façon dont on utilise l'eau chaude.
- un vase d'expansion sur le circuit primaire, assure la sécurité du matériel, il permet de compenser la dilatation du fluide. Il prend la forme d'un petit réservoir métallique; une soupape de sécurité est impérative dans un circuit fermé, dans le cas ou elle ne serait pas intégrée à celui-ci. Un vase d'expansion à l'air libre (simple bidon en plastique) placé en point haut résout les problèmes de dilatation et de sécurité en cas de surchauffe (pas de vidange de fluide caloporteur).
- on adjoint un circulateur sur le circuit primaire, une pompe mue par un moteur électrique, lorsqu'il s'agit de matériel en « circulation forcée ». Autrement, si le réservoir est placé plus haut que le panneau il n'y a pas besoin de pompe, régulateur etc. La circulation du fluide caloporteur se fait par thermosiphon si sa température en sortie de capteur est supérieure à celle de l'eau du ballon; elle s'arrête en cas d'égalité et infériorité.

Trois types d'installation

- la moquette solaire consiste simplement en un tapis de couleur noir posé à plat dans lequel circule l'eau à chauffer, à travers des tuyaux ou rainures. Elle est généralement souple et amovible. On l'utilise quand le volume d'eau requise est faible ou une température basse suffit. Ça peut être efficace en été mais en hiver le rendement est insuffisant. Ce capteur simplifié à l'extrême est donc parfaitement adapté au réchauffage des piscines, ou des douches de camping. Un ballon d'eau noir dans un arbre fait également une bonne douche de camping.
- le thermosiphon est un effet physique exploité en plaçant le réservoir au-dessus du capteur solaire. Les petits modèles commerciaux sont souvent ce qu'on dit monobloc. La circulation du fluide caloporteur dans le capteur se fait par convection naturelle grâce à la différence de température (le liquide chaud, étant moins dense, monte). L'avantage est le prix généralement moins cher et le format compact. Les inconvénients sont les pertes de chaleur importantes pendant les périodes froides.

Ce type de système est surtout utilisé dans les zones au climat chaud (Caraïbes, bassin méditerranéen, etc.). En hiver il peut y avoir un risque de gel de la réserve.

- Un système à circulation forcée avec une pompe est un système qui offre un meilleur rendement. Le débit plus élevé du fluide caloporteur assure des températures plus basses dans tout le circuit primaire réduisant ainsi les pertes thermiques. Le réservoir aussi peut-être placé à l'abri. Généralement, le réservoir (ou ballon) est alors posé à l'emplacement du chauffe-eau électrique ou à côté de la chaudière. Ce système est plus cher mais plus efficace et peut s'adapter plus facilement aux contraintes du bâtiment.

Note sur l'utilisation du système d'appoint au chauffage

Le système de chauffage d'appoint est nécessaire pour pouvoir disposer d'eau chaude même pendant les périodes de très peu d'ensoleillement. Il est possible de s'en passer, mais cela conduit à une installation plus importante, principalement d'un réservoir beaucoup plus gros, puisque il doit être capable de fournir de l'eau chaude durant des périodes grises. Un système de chauffage d'appoint, de type chaudière à gaz ou électrique, est une solution plus intéressante d'un point de vue économique.

Il existe alors des possibilités pour placer ce chauffage d'appoint :

- avec un échangeur de chaleur secondaire dans l'accumulateur, afin de chauffer l'eau de celui-ci, ce qui évite un fonctionnement intermittent à chaque demande d'eau. Cette solution est plutôt favorable pour le chauffage au gaz ou avec une pompe à chaleur.
- avec une résistance électrique d'appoint placée dans le ballon comme pour un chauffe-eau

Rafraîchissement solaire

Il existe des types de machines frigorifiques qui utilisent, paradoxalement, une source de chaleur : le réfrigérateur à absorption de gaz par exemple. Cette chaleur peut être fournie par

le soleil, avec des capteurs comparables à ceux des autres applications. La dépendance au soleil n'est pas tant lorsqu'il s'agit justement d'assurer l'évacuation d'un excès de chaleur solaire, et pour d'autres applications il reste possible d'assurer le fonctionnement à l'aide d'un système d'appoint par combustion.

Cuisinières et sécheurs solaires



Cuiseur solaire

Les cuiseurs solaires sont très répandus en Chine et en Inde. Outre le cuiseur-boîte et le cuiseur à panneaux, des cuiseurs paraboliques ont été développés.

Des cuiseurs-boîtes avec un couvercle vitré sont assez faciles à fabriquer avec des matériaux locaux (coquilles vides et sèches pour l'isolation thermique, etc.).

Énergie solaire passive

La plus ancienne utilisation de l'énergie solaire consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie solaire passive. Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du Soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, orientation vers le sud, surfaces vitrées, etc.). L'isolation thermique joue un rôle important pour optimiser la proportion de l'apport solaire passif dans le chauffage et l'éclairage d'un bâtiment.

Dans les bâtiments dont la conception est dite bioclimatique, l'énergie solaire passive permet aussi de chauffer tout ou partie d'un bâtiment pour un coût proportionnel quasi nul.

Aspect économique

Sur le long terme, les prix du charbon, du gaz et du pétrole augmentent avec l'épuisement de la ressource. Le solaire apporte une source inépuisable d'énergie et la commission européenne pour les énergies renouvelables prévoit que l'énergie solaire représentera une part de 20 % dans les énergies renouvelables, celles-ci devant apporter 20 % de l'énergie en 2020 et 50 % en 2040.

Question de la rentabilité du solaire [modifier]

Les investissements initiaux nécessaires à l'équipement en panneaux solaires restent encore bien souvent rédhibitoires. Les recherches se concentrent donc dans cette direction. La tendance actuelle est une utilisation moindre du silicium pour réduire les coûts², l'utilisation de toits en acier et la recherche sur les méthodes de stockage d'énergie des plantes³.

Systèmes de production d'énergie solaire [modifier]

Les systèmes de production d'énergie solaire ont un coût proportionnel quasi nul : une fois l'installation de l'appareil effectuée, l'énergie est produite par le Soleil, ce qui ne coûte rien. Il faut cependant tenir compte des coûts d'investissement et de l'entretien de l'appareil.

L'usage de panneaux solaires thermiques se justifie pour produire de l'eau chaude sanitaire à moindre coût. Une fois l'installation réalisée, l'entretien est très peu coûteux et permet de faire des économies substantielles de combustible fossile ou d'électricité.

Énergie solaire thermodynamique



Le four solaire d'Odeillo.

Types et filières

On distingue :

- centrale à tour
- centrale constituée de capteurs cylindro paraboliques
- centrale constituée de capteurs paraboliques

Une centrale à tour est constituée d'un champ de capteurs solaires spéciaux appelés héliostats qui concentrent les rayons du soleil. Les miroirs sont concentrés sur des tubes où un liquide caloporteur est porté à haute température. Ce liquide caloporteur envoyé dans une chaudière transforme de l'eau en vapeur. La vapeur fait tourner des turbines qui entraînent des alternateurs produisant de l'électricité.

Parmi les plus anciennes installations on trouve celle d'Albuquerque aux États-Unis d'une puissance de 5 MW (1976), celle de *Luz Solar Energy* en Californie d'une puissance de 354 MW (1985), *Solar 2* en Californie (1996) d'une puissance de 10 MW et celle de *Kramer jonction* également située en Californie d'une puissance de 150 MW. En février 2006, une nouvelle installation de 64 MW a été mise en service à Boulder City, Nevada aux États Unis.

Avec les États-Unis, d'autres pays ont des projets ou des réalisations en cours :

- *Solar 3*, à Almería en Espagne (15 MW)
- *La Cassacia*, à proximité de Rome (20 MW)
- Andasol I Aldeire près de Grenade en Espagne (50 MW)
- *Sanlucar la Major* à proximité de Séville en Espagne (302 MW) ; dont 11 MW mis en service en 2007
- Victorville en Californie (500 MW)
- à proximité de Los Angeles dans le désert de Mojave (500 MW)
- Phoenix en Arizona (300 MW)
- Abou Dhabi (500 MW)
- Beni Mathar , Oujda , Maroc (470 MW)

La centrale solaire Américaine Solar 2 présente la caractéristique de pouvoir encore fonctionner 3 heures une fois que le soleil n'est plus là. Au lieu d'utiliser des batteries pour stocker l'énergie, le stockage se fait dans des cuves contenant une saumure. L'énergie est stockée sous forme de chaleur (500/600 degrés Celsius) dans la saumure ce qui permet à la centrale de continuer à fonctionner en l'absence de soleil.

Cette technique est reprise dans la centrale Solar 3 en construction à Almería en Espagne, mais cette fois l'autonomie sans soleil va passer à 16 heures, ce qui lui permettra de fonctionner nuit et jour lors des périodes de fort ensoleillement. Ce type d'installation est destiné aux régions à fort ensoleillement comme la Californie ou le sud de l'Espagne.

En dehors des centrales solaires hélio-thermodynamiques, une entreprise Américaine (Stirling Energy Systems) a mis au point des capteurs cylindro-paraboliques de forte puissance qui suivent le soleil dans sa course et sont en fait des mini centrales hélio-thermodynamiques.

Un projet surprenant mais néanmoins sérieux est en cours en Australie, c'est le Projet de Buronga sur le principe d'une Tour Solaire. Dans une tour géante de 1000 mètres, l'air chauffé par un procédé solaire thermique, montera en tourbillonnant et entraînera des turbines situées à son sommet. Il s'agit ici de déclencher et de domestiquer le phénomène de la tornade (ou de l'ouragan, comme on veut) pour produire de l'électricité. Comme la puissance fournie par une hélice entraînée par le vent dépend du cube de la vitesse du vent, on voit que ce procédé peut faire rêver. Pour l'instant ce n'est qu'un projet, même si la réalisation est décidée officiellement et les budgets votés. Il va falloir attendre 2010 (et peut être même un peu plus) pour connaître le résultat.

Des initiatives originales d'installations collectives se situent en Suède et au Danemark. À partir de capteurs thermiques, le stockage de la chaleur d'été se fait dans des gisements granitiques souterrains pour être récupérée l'hiver.

Le solaire thermodynamique est une technique solaire qui utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité, ou éventuellement directement du travail mécanique, sur le même principe qu'une centrale électrique classique (production de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée).

Énergie solaire photovoltaïque

Le terme *photovoltaïque* désigne indifféremment le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - et/ou la technologie associée.

Une **cellule photovoltaïque** (ou « photo-galvanique ») est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu.

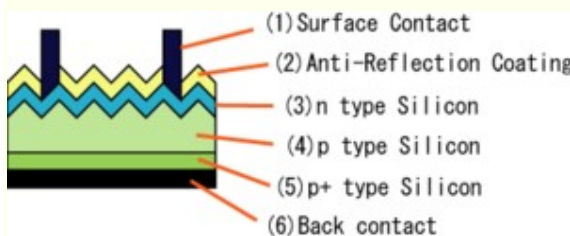
Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si). Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques, rondes ou carrées, d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques (ou "panneaux solaires"), en fonction de la puissance recherchée.

Principe de fonctionnement

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un "trou". Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se re combiner simplement en son sein : ainsi, il apparaîtra une tension entre les deux faces, comme une pile.

Pour cela, on s'arrange pour créer un champ électrique permanent au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N :



Structure d'une cellule photovoltaïque

- La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé N. Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge positive.
- La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé P. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P).

Au moment de la création de la jonction P-N, les électrons libres de la région N rentrent dans la couche P et vont se recombinaer avec les trous de la région P. Il existera ainsi, pendant toute la vie de la jonction, une charge *positive* de la région N au bord de la jonction et une charge

négligable dans la région P au bord de la jonction; l'ensemble forme la Zone de Charge d'Espace (ZCE) et il existe un champ électrique entre les deux, de N vers P. Ce champ électrique fait de la ZCE une diode, qui ne permet le passage du courant que dans un sens : les électrons peuvent passer de la région P vers la région N, mais pas en sens inverse ; inversement les trous ne passent que de N vers P.

En fonctionnement, quand un photon arrache un électron à la matrice, créant un électron libre et un trou, sous l'effet de ce champ électrique ils partent chacun à l'opposé : les électrons s'accumulent dans la région N (qui devient le pôle "-"), tandis que les trous s'accumulent dans la couche dopée P (qui devient le pôle "+"). Ce phénomène est plus efficace dans la ZCE, où il n'y a pratiquement plus de porteurs de charges (électrons ou trous) puisqu'ils se sont annihilés, ou à la proximité immédiate de la ZCE : lorsqu'un photon y crée une paire électron-trou, ils se séparent et ont peu de chance de rencontrer leur opposé.

En somme, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode.

Il faut ajouter des contacts électriques (qui laissent passer la lumière en face éclairée : en pratique, on utilise un contact par une grille), une couche antireflet pour assurer une bonne absorption des photons, etc.

Technique de fabrication

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets ou d'un gisement filonien (la technique de production industrielle ne permet pas de partir du sable). Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999%, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium.

Le silicium est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques mises au carré (si nécessaire) de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers ». Après un traitement pour obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont « métallisés » : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des **cellules photovoltaïques**.

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner environ 2 à 3 ans suivant sa technologie pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication (retour énergétique du module).

Les techniques de fabrication et les caractéristiques des principaux types de cellules sont décrits dans les 3 paragraphes suivants. Il existe d'autres types de cellules actuellement à l'étude, mais leur utilisation est pratiquement négligeable.

Les matériaux et procédés de fabrication font l'objet de programmes de recherches ambitieux pour réduire les coûts de possession et de recyclage des cellules photovoltaïques. En 2006 et 2007, la croissance de la production mondiale de panneaux solaires a été freinée par manque

de silicium, et les prix des cellules n'ont pas baissé autant qu'espéré . L'industrie cherche à faire baisser la quantité de silicium utilisé. Les cellules monocristallines sont passées de 300 microns d'épaisseur à 200 et on pense maintenant atteindre rapidement les 180 puis 150 microns, diminuant la quantité de silicium et d'énergie nécessaire, mais aussi les prix.

Cellule en silicium amorphe

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

- avantages :
 - fonctionne avec un faible éclaircissement (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment),
 - moins chère que les autres technologies,
 - moins sensible aux températures élevées que les cellules mono ou polycristallines.
- inconvénients :
 - rendement faible en plein soleil, de 60 Wc/m^2 ,
 - performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

Cellule en silicium mono cristallin



Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

- avantage :
 - très bon rendement, de 150 Wc/m^2 ou plus (2007).
- inconvénients :
 - coût élevé

Cellule en silicium poli cristallin



Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

- avantages :
 - cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si mono cristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module
 - bon rendement de conversion, environ 100 Wc/m^2 , mais cependant un peu moins bon que pour le mono cristallin,
 - lingot moins cher à produire que le mono cristallin.
- inconvénient :
 - rendement faible sous un faible éclairement.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix).

Utilisation

Les cellules photovoltaïques sont parfois utilisées seules (éclairage de jardin, calculatrice, ...) ou bien regroupées sur des panneaux solaires photovoltaïques.

Elles sont très utilisées en remplacement des piles (dont l'énergie est de loin la plus chère pour l'utilisateur ; même pour le fabricant, un compartiment pile et la pile éventuellement fournie peuvent coûter plus cher qu'une cellule), pourvu que le dispositif ne réclame pas trop d'énergie par rapport à la surface qu'on peut accorder au générateur photovoltaïque, et qu'il y ait assez de lumière pendant l'usage : les cellules ont envahi calculette, montres, gadgets, etc.

Il est possible d'augmenter leur gamme d'utilisation avec un stockage (condensateur ou batterie). Lorsqu'elles sont utilisées avec un dispositif de stockage de l'énergie, il est indispensable de placer une diode en série pour éviter la décharge du système pendant la nuit.

Elles sont utilisées pour produire de l'électricité pour de nombreuses applications (satellites, parc-mètres, ...), ainsi que pour alimenter des habitations ou un réseau public de distribution dans le cas d'une centrale solaire photovoltaïque.

Recherche et développement

La technique n'a pas atteint la maturité et de nombreuses pistes de recherches sont explorées ; il s'agit d'abord de faire baisser le prix de revient de l'électricité produite, mais aussi d'obtenir des progrès en matière de rusticité, de souplesse d'usage, de facilité d'intégration dans des objets, de durée de vie, etc.). Toutes les étapes des procédés de fabrication peuvent être améliorées, par exemple :

- la société « Evergreen Solar » a éliminé l'étape du sciage, remplacée par le dépôt de silicium encore liquide sur un film où il se cristallise directement à l'épaisseur du "wafer"
- la société « NanoSolar » industrialise la production de cellules CGIS par une technique d'imprimerie, en continu, en espérant des coûts de 1 \$/W en 2010.
- toutes les sociétés annoncent successivement des accroissements du rendement de leurs cellules
- la taille des wafers croît régulièrement, ce qui diminue le nombre de manipulations
- On cherche à mieux valoriser toutes les longueurs d'onde du spectre solaire (dont l'infrarouge, ce qui ouvrirait des perspectives très intéressantes : transformation directe de la lumière d'une flamme en électricité, rafraîchissement).
- Des « *concentrateurs* » (déjà utilisés sur les satellites) sont testés sur terre. Via des miroirs et des lentilles incorporées dans le panneau, ils focalisent le rayonnement sur l'élément essentiel et coûteux qui est la cellule photovoltaïque et ses semi-conducteurs. Fin 2007, Sharp a annoncé disposer d'un système concentrant jusqu'à 1100 fois le rayonnement solaire (contre 700 fois pour le précédent record en 2005); début 2008, Sunrgi a atteint 1600 fois. La concentration permet de diminuer la proportion du panneau consacré à la production de l'électricité, et donc leur coût. De plus ces nouveaux matériaux supportent très bien l'échauffement important dû à la concentration du flux solaire.
- On étudie aussi la possibilité d'associer les siliciums amorphe et cristallin par « *hétéro jonction* », dans une même cellule photovoltaïque à plus de 20 % de rendement. Projet de 2 ans annoncé début 2008, associant le *Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et des nano matériaux* du CEA-Liten et la société coréenne *JUSUNG* (fournisseur d'équipements pour les fabricants de semi-conducteurs), avec l'INES (Savoie) où le CEA-Liten a concentré ses activités concernant l'énergie solaire.
- Les panneaux solaires capables de récupérer les infrarouges et de les transformer en électricité. Ce qui permettrait une production d'énergie électrique à partir de n'importe quelle source de chaleur, même la nuit. Pour l'instant, seule une partie de la lumière visible, principalement les rayonnements verts et les bleus, est transformée en électricité et le rayonnement infrarouge n'est utilisé que par les panneaux thermiques pour chauffer de l'eau. La transformation des infrarouges en électricité constituera une véritable percée.

La pénurie de silicium accroît encore l'incitation à l'innovation sur un marché en forte croissance qui s'annonce colossal, surtout si on parvient à baisser le prix de revient de l'électricité produite et à le rapprocher de celui des combustibles fossiles.

Module solaire photovoltaïque



Module solaire photovoltaïque



Module PV vue de près

Un **module solaire photovoltaïque** (ou *panneau solaire photovoltaïque*) est un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement, qui sert de module de base pour les installations photovoltaïques et notamment les Centrales solaires photovoltaïques.

Caractéristiques

Les panneaux sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont la longueur et la largeur sont de l'ordre du mètre, pour une surface de l'ordre du m², et une masse de l'ordre de la dizaine de kg. Divers éléments (branchements électrique, fixations, éventuellement cadre pour assurer une étanchéité) sont inclus.

Il existe également des modules sous forme de membranes souples et résistantes, ainsi que des panneaux à concentration, plus complexes mais exploitant mieux l'élément le plus cher du panneau (la cellule photovoltaïque).

Leur rendement est un peu moindre que celui des cellules qui les constituent, du fait des pertes électrique internes et des surfaces non couvertes, mais reste d'environ 10 à 18%. La puissance "crête"¹ d'un panneau photovoltaïque est de l'ordre de 100 à 200 watts par mètre carré (soit un rendement de 10 à 20%, les fabricants annonçant environ 17 % pour leurs meilleurs panneaux), ce qui donne une puissance crête de 50 à 250 W par panneau, selon sa taille et ses autres caractéristiques. Cette puissance est livrée sous forme de courant continu, ce qui est parfait pour un branchement sur une batterie et pour de nombreuses applications, mais implique une transformation en courant alternatif par un onduleur s'il s'agit de l'injecter dans un réseau de distribution. La tension dépend du type des panneaux et du branchement des cellules, elle est de l'ordre de 10 à 300 volts.

Outre sa puissance et sa surface, un panneau a trois caractéristiques importantes

- l'écart à la puissance nominale, de l'ordre de +/- 5%
- la variation de puissance avec la température (en effet si la température est trop importante le rendement décroît)
- la stabilité dans le temps des performances (les fabricants garantissent généralement au moins 80% de la puissance de départ au bout de 20 à 25 ans)

Enfin le prix : comptez environ 5 €/Wc (ce prix baisse régulièrement, la cible étant de 1 €/Wc, prix où l'énergie photovoltaïque devient compétitive avec les ressources fossiles.

L'énergie réellement captée par un module dépend, de la surface et de la puissance nominale du panneau mais aussi de l'ensoleillement, variable selon la latitude, la saison, l'heure de la journée, la météo, le masquage subi. En Europe, chaque Wc permet la production d'environ 1kWh d'énergie sur l'année, le double dans des zones bien ensoleillées.

Un module photovoltaïque ne génère aucun déchet en fonctionnement, son coût de démantèlement est très faible et ses coûts d'exploitation sont quasi nuls. Étanche, il peut servir de couverture à un toit, sous réserve de bien maîtriser l'écoulement d'eau aux bords avec un montage adapté. La durée de vie d'un tel module est supérieure à 20 ans.

La technologie évolue rapidement, le prix du kWc (kilo-watt crête) étant beaucoup plus important que le rendement du panneau : un rendement deux fois plus faible signifie seulement qu'il faudra équiper deux fois plus de surface pour collecter la même énergie, ce qui n'est gênant que si la surface disponible est limitée par rapport à la puissance nécessaire (sur un satellite, par exemple...). Par conséquent, si une nouvelle technologie permettait de produire des panneaux de faible rendement, mais bon marché, elle aurait de bonnes chances de s'imposer. Le rendement reste néanmoins une composante du prix, ne serait-ce que pour les frais de manutention et d'installation, d'autant plus faible que le module est petit et léger.

Production et pertes

Les principales sources de pertes énergétiques sont :

- *Pertes par ombrage* : L'environnement d'un module photovoltaïque peut inclure des arbres, montagnes, murs, bâtiments, etc... Il peut provoquer des ombrages sur le module ce qui affecte directement l'énergie collectée.
- *Pertes par "poussière ou saletés"* : Leur dépôt occasionne une réduction du courant et de la tension produite par le générateur photovoltaïque.(~3-6%)
- *Pertes par dispersion de puissance nominale* : les modules photovoltaïques issus du processus de fabrication industrielle ne sont pas tous identiques. Les fabricants garantissent des déviations inférieures de 3% à 10% autour de la puissance nominale.
- *Pertes de connexions* : La connexion entre modules de puissance légèrement différente occasionne un fonctionnement à puissance légèrement réduite. Elles augmentent avec le nombre de modules en série et en parallèle.(~3%)
- *Pertes angulaires ou spectrales* : Les modules photovoltaïques sont sélectifs, la variation du spectre solaire affecte le courant généré par ceux-ci. Les pertes angulaires augmentent avec l'angle d'incidence des rayons et le degré de saleté de la surface.
- *Pertes par chute ohmique* : Les chutes ohmiques se caractérisent par les chutes de tensions dues au passage du courant dans un conducteur de matériau et de section

donnés. Ces pertes peuvent être minimisées avec un dimensionnement correct de ces paramètres.

- *Pertes par température* : En général, les modules perdent 0,4 % par degré supérieur à sa température standard (25°C en conditions standard de mesures STC). La température d'opération des modules dépend de l'irradiation incidente, la température ambiante et la vitesse du vent.(5% a 14%)
- *Pertes par rendement DC/AC de l'onduleur* : L'onduleur peut se caractériser par une courbe de rendement en fonction de la puissance d'opération.(~6%)
- *Pertes par suivi du point de puissance maximum* : L'onduleur dispose d'un dispositif électronique qui calcule en temps réel le point de fonctionnement de puissance maximum.(3%)

A partir de là, il est possible d'estimer une productivité électrique annuelle. Les valeurs qui suivent sont indicatives et approximatives, car ce type de mesure est très sensible aux conditions et conventions adoptées : avec ou sans héliostat, avec ou sans les pertes de l'onduleur, en moyenne sur une région ou sur un lieu-dit particulièrement propice, etc. en kWh/Wc/an ; ici le coefficient de performance PR (*Performance Ratio*) adopté est de 0,75 et pour une surface inclinée de manière optimale.

- Sud de l'Allemagne: ~0,9
- France : : ~1.
- Espagne : ~1,4.
- Îles Canaries: ~2,0
- Île d'Hawaii: ~2,1
- Déserts (Sahara, Moyen-Orient, Australie...) : ~2,3
- Maximum pratique terrestre : ~2,4 (Désert d'Atacama, proche de l'équateur et particulièrement sec)

Toutefois, les valeurs réelles peuvent être bien plus faibles.

Applications



Horodateur alimenté par un panneau solaire photovoltaïque

Les modules solaires photovoltaïques se sont d'abord développés dans des applications très variées non connectées au réseau électrique, soit parce qu'il n'y a aucun réseau disponible (satellites, mer, montagne, désert..), soit parce que le raccordement reviendrait trop cher par rapport à la puissance nécessaire (balises, horodateur, abris-bus, ...); dans ce cas, on utilise des appareils électriques adaptés au courant continu livrés par les modules.

Pour alimenter en électricité une habitation ou un réseau public de distribution, on intercale un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif adapté aux appareils classiques. Plusieurs modules sont intégrés dans une centrale solaire photovoltaïque qui peut être soit un système photovoltaïque autonome soit un système photovoltaïque raccordé au réseau. Ce type d'application n'est rendue possible que par des subventions massives existant dans certains états, car l'énergie ainsi produite reste encore environ 10 fois plus chère (voir infra) que l'électricité nucléaire ou à partir d'hydrocarbures fossiles : la source solaire est certes gratuite, mais l'investissement requis est très élevé.

Économie

Les cinq plus grandes firmes fabriquant des cellules photovoltaïques se partagent 60 % du marché mondial. Il s'agit des sociétés japonaises Sharp et Kyocera, des entreprises américaines BP Solar et Astropower, et de l'allemande RWE Schott Solar. Le Japon produit près de la moitié des cellules photovoltaïques du monde, mais c'est en Chine que la grande majorité des panneaux sont assemblés.

Le Japon est lui-même un des plus grand consommateur de panneaux solaires, mais largement dépassé par l'Allemagne.

Prix des équipements (hors taxes)

- Modules poly cristallins (fabrication): ~2.000 \$ / kWc
- Modules poly cristallins (du grossiste au détaillant): de 3.490 \$ à 5.100 \$ / kWc (8 m²/kWc)
- Installation: de 600 \$ à 2.000 \$ / kWc (en auto construction de 100 \$ à 400 \$/ kWc)
- Onduleur pour injection réseau : ~400 \$/kWc

La cible de 1 \$ par Wc (au niveau des cellules) correspond à un prix de 0,1 \$ par kWh (Cf. infra), qu'il faut rapporter au prix actuel du kWh à la consommation par les sources classiques (nucléaire, charbon, gaz, ...) : environ 0,06 \$ CAN au Québec, (un des moins cher, voire le moins cher du monde grâce à leur production hydroélectrique), 0,15 en France, 0,25 \$ au Japon, etc. Le prix cible est donc celui qui rend la solaire photovoltaïque compétitif et même susceptible de rendre inutile les sources fossiles et nucléaires, voire les réseaux de distribution classique, sous réserve de disposer des surfaces nécessaires pour le déployer.

Prix du kWh: Énergie solaire photovoltaïque # Prix du kWh.

Le prix du kWh produit par un équipement solaire, actualisé sur la durée de vie de l'équipement, peut s'estimer à partir de trois paramètres :

- le prix d'achat de l'équipement, en euros par W de puissance crête (W_c)
- la productivité (en kWh produit par W_c par an), en fonction de l'insolation du lieu ;
- la dépréciation annuelle du capital. Pour ce paramètre, on utilisera 10% (correspondant, par exemple, à des frais de fonctionnement et maintenance de 1%, une actualisation financière de 4%, et un amortissement du matériel sur 20 ans soit 5%).

Comparaison du prix de l'électricité photovoltaïque avec le prix d'autres énergies

L'électricité photovoltaïque est moins chère que celle des piles (qui est la plus chère de toutes les électricités) : c'est la raison pour laquelle les modules sont si répandus dans les calculettes, montres, gadgets, etc. Elle est également compétitive pour des petits équipements autonomes (horodateur, balises marines...).

Pour les autres utilisations courantes, en revanche, elle est actuellement beaucoup plus chère, de 2 à 10 fois, que l'électricité actuellement produite à partir d'énergie fossile (environ 3 centimes par kWh à la production), d'énergie éolienne, et même d'électricité solaire *thermodynamique*.