



SEMAINE 2 : L'ENERGIE SOLAIRE

Ce document contient les retranscriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « Production d'électricité » de la semaine 2 du MOOC « Énergies renouvelables ».

Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs. Des figures choisies par les intervenants ont été ajoutées afin d'illustrer leurs propos.

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

Daniel LINCOT

Directeur de recherche – CNRS

Directeur de l'IRDEP et Directeur scientifique de l'IPVF

Je vais vous parler de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire et la première chose c'est de considérer l'énergie qui nous arrive du Soleil et ses caractéristiques.

- C'est donc une énergie de type électromagnétique sur laquelle on a une distribution qui se centre dans le visible - autour de 0,55 microns -, et qui est caractérisée par une puissance énergétique qui, à l'extérieur de l'atmosphère est de 1360 Watts par mètre carré et qui, au niveau de la Terre, est considérée autour de 1000 Watts par mètre carré.

Alors, cette puissance solaire, elle se répartit partout dans le monde, dans tous les territoires, tous les pays et sur la mer et en fait vous avez une distribution qui est comprise entre 0,9 MWh par mètre carré et par an dans les pays du nord de l'Europe et ça peut aller à autour de 2 à 3 MWh par mètre carré par an dans les zones les plus ensoleillées du monde.

- A Paris par exemple, c'est autour de 1 MWh par mètre carré et par an, ce qui correspond en juillet, journalièrement, autour de 5,5 kWh par mètre carré et par jour.

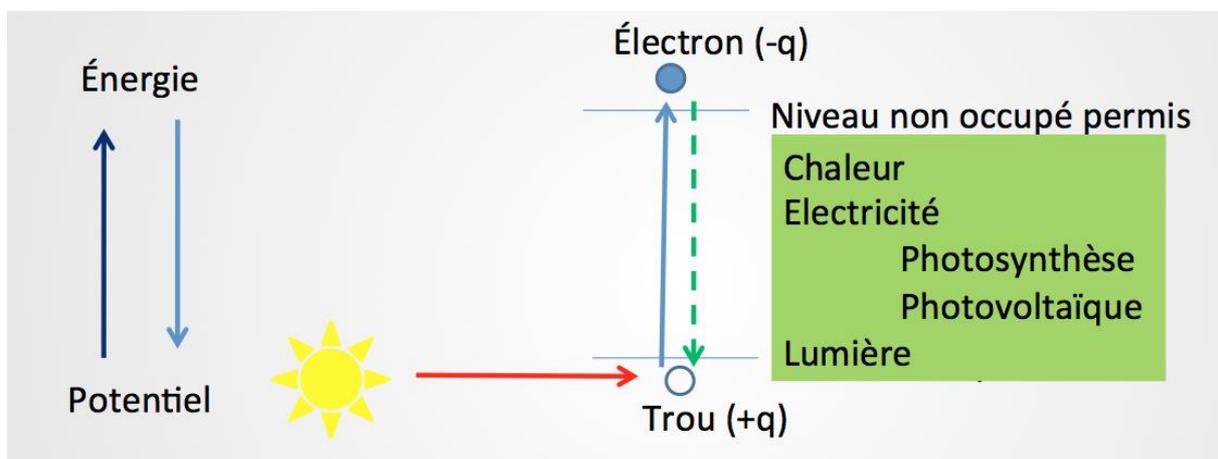
Alors, comment se passe ce processus de conversion, de transformation de l'énergie solaire en énergie électrique ?

- Et bien, il se passe grâce à l'absorption des photons par la matière. Et dans la matière, ce qui va absorber les photons ce sont des électrons qui constituent les liaisons chimiques et en fait, le photon transfère son énergie à un électron d'une liaison et cet électron va changer de niveau d'énergie (on dit qu'il est excité) et à ce moment-là, il se crée une paire électron trou et la particularité c'est que l'électron, son énergie est déjà sous forme électrique.
- Alors en fait, pour revenir à l'équilibre, il va échanger son énergie et faire la plupart du temps de la chaleur mais, dans le cas de la photosynthèse, il passe par un intermédiaire qui est déjà un intermédiaire photovoltaïque grâce à la chlorophylle et ça lui permet ensuite de faire la photosynthèse.

Sur le plan du photovoltaïque, ce que l'on cherche à faire, c'est trouver le moyen d'avoir l'énergie électrique par un circuit extérieur et c'est tout l'objet des cellules solaires, du développement des cellules solaires.

Alors, les cellules solaires qui sont développées, ont commencé à se développer en 1954 autour du silicium et très rapidement, dès 58, les premiers satellites étaient équipés en énergie solaire photovoltaïque pour leur alimentation électrique.

Alors, comment fonctionne une cellule solaire ?



- Et bien, ce qu'on a fait, c'est qu'on a mis un semi-conducteur de type N. et un semi-conducteur de type P. juxtaposés et ces semi-conducteurs, on appelle ça une homojonction - si c'est le même semi-conducteur -, sont accolés l'un à l'autre et c'était du silicium.
- En fait, quand ils sont accolés, ce qui se produit c'est qu'à l'interface entre ces deux zones N. et P., se crée un champ électrique très fort. Or, un électron est chargé négativement et le trou par opposition est chargé positivement. Donc, dès que l'électron se trouve dans le champ électrique, il va subir une force qui va le déplacer en sens contraire du champ. Par contre le trou va aller dans le sens du champ.

⇒ Donc on voit que, finalement, la jonction P. / N., la cellule solaire, permet de séparer les paires électrons trou grâce à cet effet de champ et donc de récupérer de la puissance dans le circuit extérieur.

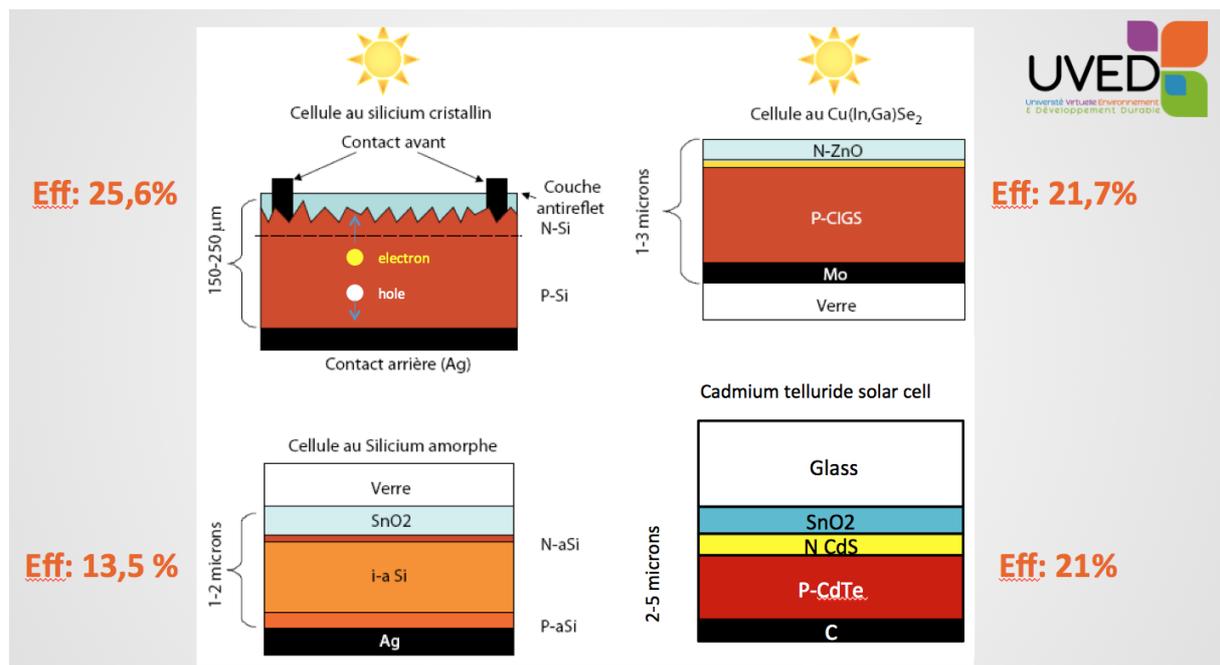
➤ Là vous avez un exemple de caractéristique dite courant - tension qui montre la façon dont on peut récupérer cette puissance électrique.

Alors, aujourd'hui, il y a plusieurs types de filière photovoltaïques, en particulier, toutes sont basées sur des jonctions P./N.. Il y a celles au silicium qui est issu de plaquettes qui sont découpées et il y a aussi trois filières qui sont montrées ici qui sont des filières couches minces :

- La première, c'est la filière au silicium amorphe, qui sont déposés sur verre, de quelques microns d'épaisseur ;

Et deux autres filières :

- Celle au tellurure de cadmium, le CDTe ;
- Celles dite au CIGS, qui est un alliage de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium ;



⇒ Et l'intérêt de ces cellules solaires en couche mince, c'est que les rendements sont un peu moins élevés que le silicium en record, 25,6 pour le silicium et autour de 20 % pour ces dernières cellules solaires en couche mince mais la capacité de production et les caractéristiques sont différentes.

➤ Alors, voilà maintenant l'exemple de cellules solaires classiques au silicium poly cristallin et vous voyez les différentes étapes de fabrication de la cellule jusqu'à la grille de collecte et les rendements.

- Voici l'exemple, l'archétype de ce qu'on attend sur des cellules solaires en couche mince, c'est la possibilité de faire des très grandes surfaces et vous avez ici des cellules solaires en couches minces qui sont déposées directement par des technologies issues des écrans plats jusqu'à 5 mètres carrés de surface.

Alors, il existe aujourd'hui un nouveau type de cellules solaires à deux niveaux qui sont les cellules solaires à base de composés moléculaires, dites organiques, hybrides et la particularité c'est qu'avec ces cellules solaires on arrive directement à connecter pratiquement la molécule comme c'était le cas pour la chlorophylle et à extraire les électrons et les trous dans le circuit extérieur.

Alors il y a trois catégories :

- Il y a les cellules solaires dites à colorant, qui ont été développées par leur inventeur, Michaël Graetzel ;
 - Il existe ce qu'on appelle les cellules solaires organiques, toutes organiques ;
 - Et il existe aujourd'hui un nouveau type qui vient d'apparaître et dont les rendements sont très élevés qui sont des cellules à base de pérovskite hybride dont les rendements atteignent 20 % mais dont la stabilité reste à travailler.
- Alors, la particularité de ce type de cellules c'est d'être en fait multicolores. On a des processus différents et on peut avoir des cellules multicolores et dans ce cas vous voyez là, la matrice, une matrice d'oxyde de titane sur laquelle on vient greffer des molécules de colorant. C'est ce qui leur donne cette couleur rouge - bleu - vert. Et c'est aussi très bien pour du souple, pour du flexible.

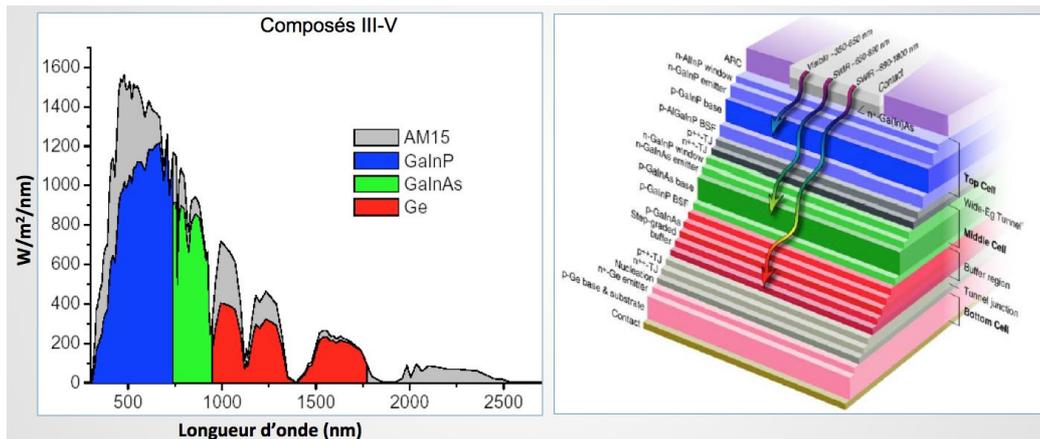
Alors, là vous avez un point essentiel, c'est que toutes les cellules dont je vous ai parlé jusqu'à présent étaient avec des rendements pour les meilleurs autour de 25 % et on montre théoriquement que le rendement limite est autour de 33 % pour ce type de cellules qu'on dit à deux niveaux. Pourquoi ?

- Parce que les photons rouges ne sont pas absorbés, ils n'ont pas l'énergie nécessaire et les photons bleus qui sont dans l'UV ont trop d'énergie et seulement une petite fraction de cette énergie est récupérée, le reste étant perdu thermiquement.
- ⇒ Or, il se trouve que si on fait des calculs théoriques, normalement le rendement de conversion pourrait aller jusqu'à 85 %.

Donc, la question posée c'est est-ce qu'on peut faire des systèmes pouvant aller au-delà de cette barrière des 30 % ? Et en fait, il en existe dès aujourd'hui qui sont finalement de mettre des multi jonctions, c'est-à-dire qu'on va à chaque longueur d'onde, mettre une jonction qui est parfaitement adaptée aux photons et puis les superposer de telle façon que les photons qui traversent soient récupérés dans une autre et finalement on peut avoir des doubles jonctions, des triples jonctions dont le rendement peut aller théoriquement largement supérieur à 50 % voire plus.

Alors, concrètement comment ça se passe ?

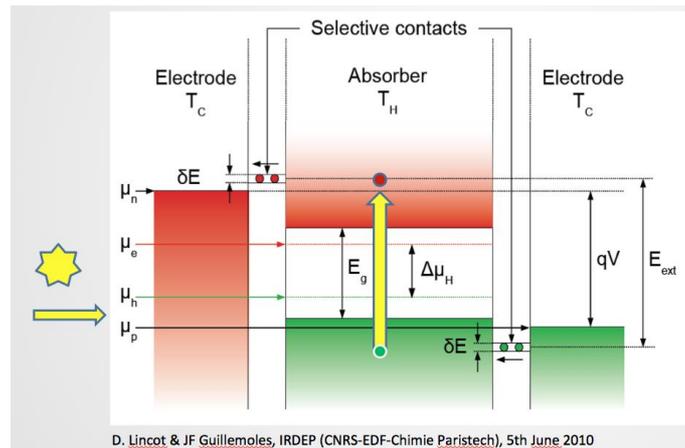
- Et bien vous avez pour les triples jonctions, une jonction qui prend du bleu, une autre qui prend le visible et une autre qui prend l'infrarouge. Et pour faire ça, on superpose, vous voyez, une structure d'une trentaine de couches qui vont avoir des jonctions, ces trois jonctions, qui sont faites pour aller à des rendements élevés et le rendement vraiment maximum aujourd'hui obtenu est de 45 % sous concentration, avec des triples jonctions.



Alors, la question c'est que vous voyez vous avez 32 couches ou une trentaine de couches, ça fait beaucoup, c'est compliqué. Et ce qu'il existerait d'autres façons d'aller faire les hauts rendements ?

Et bien il existe des concepts qui aujourd'hui sont explorés et qui pourraient permettre de le faire.

- Le premier d'entre eux dont je voulais vous parler, c'est le concept de la conversion de photons, c'est-à-dire que le photovoltaïque, on fait de la photonique et on convertit des photons bleus en photons visibles ou des photons rouges en photons visibles en utilisant des matériaux dont la propriété est finalement de faire monter l'électron à des niveaux supérieurs grâce à de multiples photons ou au contraire de les faire descendre avec réémission de photons et ce dans une cellule de très bonne qualité comme le silicium, le CIGS et autres.



⇒ Alors, bien entendu ces trois derniers concepts sont encore à l'état d'étude dans les laboratoires.

Donc la caractéristique finalement du domaine du photovoltaïque c'est un développement accéléré de ce domaine, un foisonnement et une créativité et une innovation très grande et enfin un foisonnement des recherches - je voudrais vous le montrer ici -, en fait c'est un peu les jeux olympiques de toutes les filières du photovoltaïque où vous voyez que ces dernières années en particulier ont été particulièrement fécondes au niveau des développements et des rendements et cela est lié aussi dans une certaine mesure au fait qu'il y a un grand développement industriel qui aujourd'hui suscite et permet d'aller plus loin dans les recherches que ce qu'on faisait il y a une quinzaine ou une vingtaine d'années.

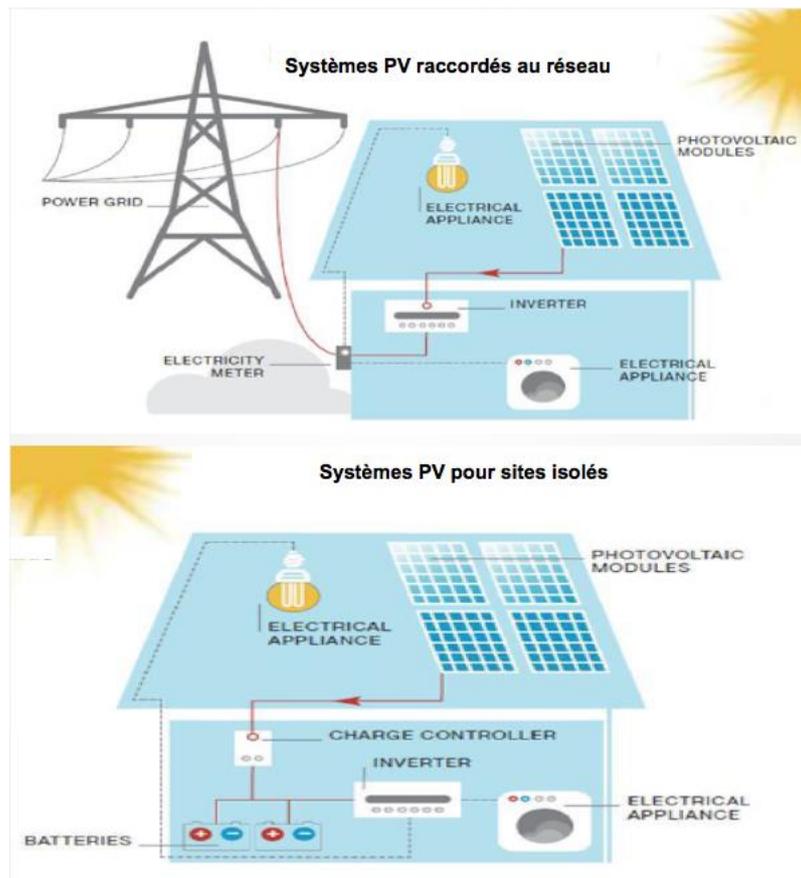
Photovoltaïque : Performance du système

Didier MAYER

Professeur – Mines PARITECH

Le module photovoltaïque est l'élément de base des systèmes photovoltaïques. Un générateur solaire est composé de modules photovoltaïques connectés en séries parallèles qui déterminent la puissance, la tension de fonctionnement et le courant qui sera délivré par l'ensemble.

De manière générale, il existe deux types de systèmes photovoltaïques :



- Ceux raccordés au réseau dont l'énergie y sera injectée via un onduleur.
 - Par exemple des systèmes qui sont intégrés dans l'environnement urbain ou des grandes centrales de puissance ;
- Et les systèmes dont l'objectif est d'alimenter en électricité des sites isolés et qui nécessiteront une batterie pour pouvoir adapter l'offre à la demande.
 - ⇒ En fonction du type de charge, des convertisseurs seront aussi nécessaires.
 - Donc on peut prendre pour exemple une résidence secondaire dans un site isolé ou alors un système professionnel de type protection cathodique des pipelines dans un désert.

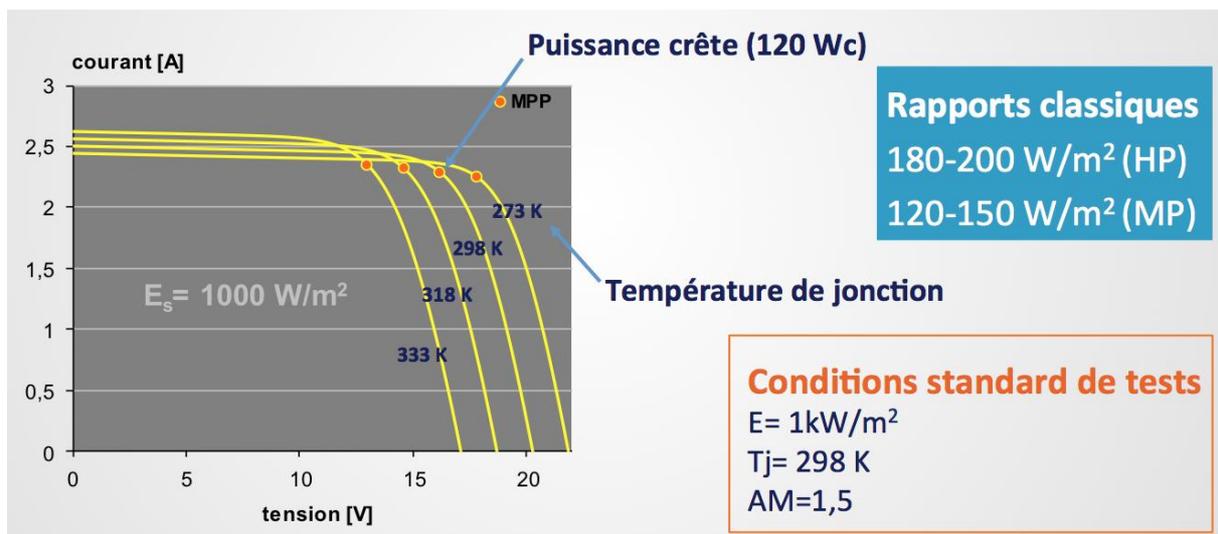
Au niveau du marché du photovoltaïque, les siliciums en modules cristallins représentent près de 90 % des modules installés donc, dans mon exposé, je me concentrerai sur cette technologie.

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est représenté par sa courbe caractéristique, celle-ci varie selon l'ensoleillement dans le plan du module et sa température.

- Donc la puissance du module photovoltaïque sera fonction des conditions météorologiques.

Pour une température donnée, la puissance du module est presque proportionnelle à l'ensoleillement (donc la tension d'ailleurs y étant très peu sensible), et pour un ensoleillement donné, la puissance va décroître en fonction de la température et cette décroissance est matérialisée par un coefficient qui est spécifique d'une technologie donnée.

Dès lors que la puissance du module photovoltaïque est variable, il faut définir des conditions de référence dans lesquelles on pourrait considérer une puissance nominale.



- Ces conditions de référence sont dites conditions standards de test avec un ensoleillement à 1 kW par mètre carré, une température du module à 25°C et un coefficient air/masse de 1,5.
- Alors ce coefficient air/masse est relatif à un trajet optique dans l'atmosphère pour une hauteur de soleil de l'ordre de 40°.
- ✓ Donc cette puissance nominale est dite puissance crête et elle correspond aux puissances installées.

L'évaluation des performances d'un système photovoltaïque, dans notre cas un système photovoltaïque raccordé réseau, peut-être différente selon les échelles temporelles.

- C'est-à-dire que si l'on s'intéresse au suivi précis d'un système photovoltaïque, donc il sera peut-être effectivement possible de faire des mesures en temps réel.
- Mais dès lors que l'on s'intéresse à des productivités globales voire à des comparatifs entre systèmes, une évaluation de type macro peut-être suffisante. Quand on entend macro, on peut penser à un niveau horaire mensuel voire annuel.

Donc dans l'exemple ci-dessus, pour un système raccordé réseau, donc il est décrit par des grandeurs de type surface de captation, puissance crête mais également par les niveaux d'énergie convertie et injectée au réseau donc on peut calculer des productions rapportées à la puissance, production au niveau de la conversion et au niveau du système qui va

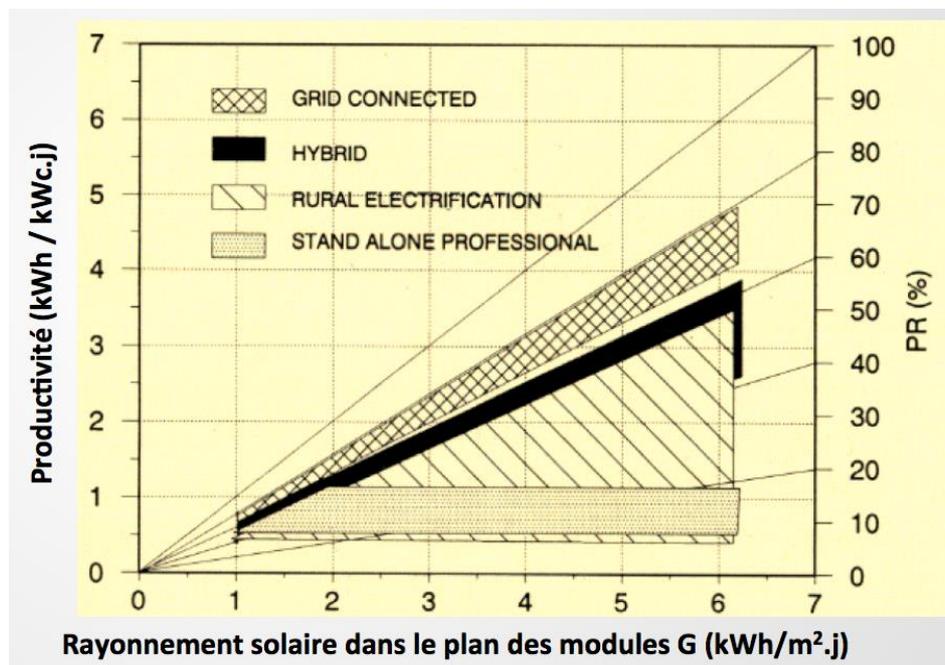
permettre de pouvoir faire des comparatifs entre systèmes. Donc les rendements à différents niveaux du système sont également calculables.

La productivité du système est calculée par le rapport entre l'énergie injectée au réseau et sa puissance crête. Ceci nous permet de nous affranchir de la taille du système mais par contre, elle est dépendante des conditions d'ensoleillement et donc de l'endroit (ou du site) sur lequel il est installé.

Cette productivité peut-être aussi exprimée en nombre d'heures de fonctionnement de notre système photovoltaïque dans des conditions de puissance nominale.

La relation qu'il y a avec les conditions d'ensoleillement donc indique tout de suite que cette productivité sera plus importante dans les régions ensoleillées de type sud de l'Europe que des régions de type nord de l'Europe.

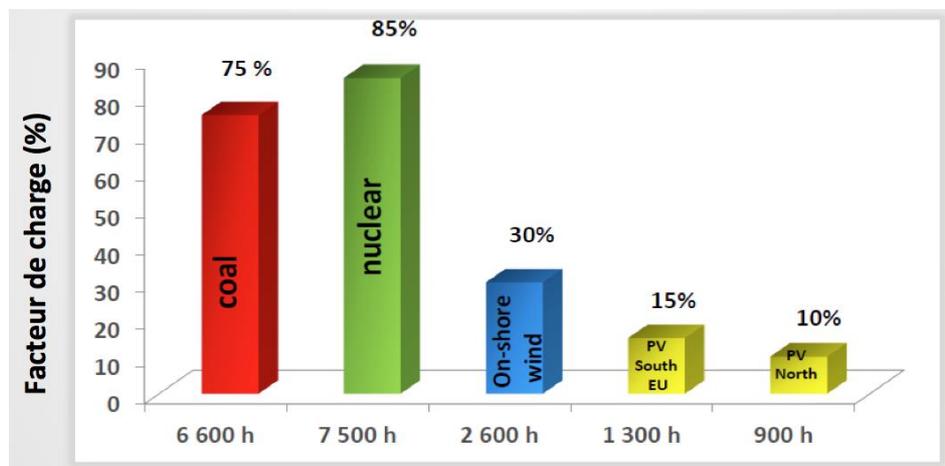
- Afin de s'affranchir des conditions d'ensoleillement, et de pouvoir comparer les systèmes directement entre eux et identifier des systèmes qui pourraient avoir des performances moins intéressantes, on introduit le coefficient de performance qui en fait reflète ou calcule l'énergie réellement fournie par une énergie potentielle de s'il fonctionnait dans les conditions de puissance nominale.
- Alors, ce coefficient de performance, on le voit sur le graphique, est le plus important pour les systèmes raccordés réseau puisque ces systèmes utilisent toute l'énergie qu'ils produisent, alors que pour les systèmes isolés l'intervalle de variation est beaucoup plus important puisqu'il dépendra de l'adaptation de la production et de la charge.



Les énergies renouvelables et l'énergie solaire en l'occurrence sont des technologies qui sont maintenant installées dans certains pays de manière significative et il convient donc de pouvoir déterminer de façon réaliste quel est réellement l'apport, quel est réellement leur

apport au niveau énergétique, national - voire international si on considère l'Europe -, par rapport à ce que peuvent faire les énergies dites traditionnelles ou conventionnelles.

- Le facteur de charge qui est en fait lié à la productivité qui a été présentée précédemment, correspond à un nombre d'heures de fonctionnement du système, à sa puissance nominale et si l'on divise par le nombre d'heures de l'année à un pourcentage de fonctionnement à la puissance nominale.
 - On remarque sur le graphique que les systèmes solaires ont des facteurs de charge qui sont inférieurs à 20 %, ce qui veut dire que ces systèmes ont fonctionné moins de 20 % du temps à leur puissance nominale.
- ⇒ Donc, 1 gigawatt solaire n'a pas la même valeur qu'un gigawatt d'une centrale conventionnelle.



- De plus, ces systèmes solaires vont produire durant le cœur de la journée et donc, je dirais, il va falloir adapter cette puissance notamment avec des unités de stockage pour éviter de perturber les réseaux.

Alors, pour terminer, quelques chiffres-clés sur les systèmes photovoltaïques :

- Déjà un module en silicium cristallin, son rendement varie entre 13 et 20 % en fonction des technologies.
 - Le rendement du système donc qui prend en compte les conversions, les différentes conversions au niveau du système donc sera entre 10 et 17 %.
 - La durée de vie d'un générateur de type silicium cristallin peut être évaluée à environ 30 ans de fonctionnement avec une dégradation inférieure à 10 % ;
 - Et au niveau du coût d'investissement - ça dépendra de l'application -, pour un système je dirais installé en toiture, ça peut varier entre 2200 et 4000 euros le kilowatt crête en fonction de cette intégration.
- C'est-à-dire que si on le pose sur la toiture ou si on le considère comme un composant du bâtiment.

- Les grandes centrales arrivant entre 1500 et 2500 € le kilowatt crête.
- Le facteur de charge, on l'a dit, dans les zones plutôt nord européennes, on aura 900 heures de fonctionnement en puissance nominale alors que dans le sud de l'Europe, pas loin de 1500 heures. Donc du simple au double presque.

Le retour énergétique donc, le retour énergétique correspond à la durée qu'un système photovoltaïque va mettre pour rembourser l'énergie qu'on lui a donnée pour le créer donc c'est de l'ordre de 2 à 5 ans.

Conversion thermodynamique de l'énergie solaire sous concentration

Quentin FALCOZ

Maître de Conférences – Université de Perpignan Via Domitia

Pour bien comprendre le principe de fonctionnement des centrales solaires à concentration, il faut tout d'abord rappeler comment fonctionne une centrale thermique de production d'électricité.

- ✓ Le principe fondamental d'une centrale thermique traditionnelle, c'est l'utilisation d'un cycle thermodynamique à vapeur qu'on appelle aussi cycle de Rankin.
- Le cycle à vapeur est composé de trois éléments importants qui sont :
 - un évaporateur,
 - une turbine
 - et un condenseur.
- ✓ Donc le principe, on prend de l'eau liquide, on la transforme en vapeur d'eau grâce à un apport de chaleur, on envoie ensuite cette vapeur d'eau dans une turbine à vapeur, et c'est cette turbine qui est reliée à un générateur qui va produire de l'électricité l'envoyer sur le réseau.
- ✓ La vapeur d'eau est ensuite condensée dans le condenseur pour retourner à l'état liquide et ensuite recommencer le cycle à son début.

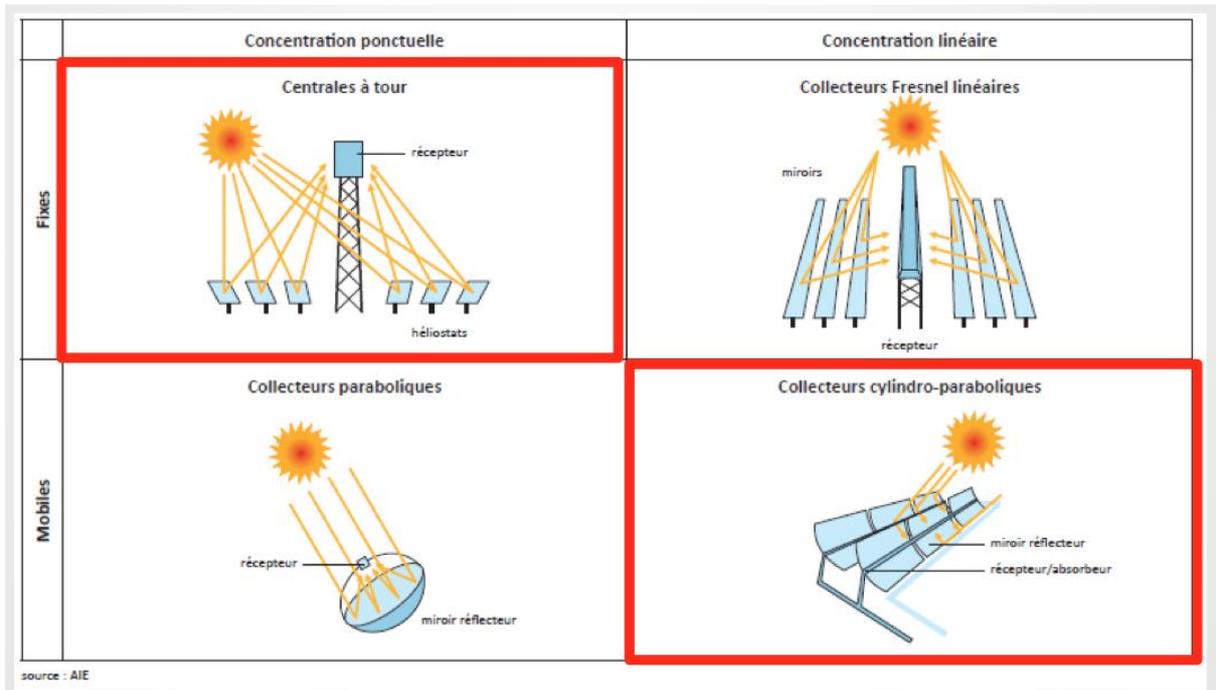
Ce qui différencie les types de centrales thermiques, c'est la méthode utilisée pour produire la vapeur d'eau, autrement dit, la façon dont on va apporter de la chaleur dans l'étage de l'évaporateur.

- Dans une centrale à charbon, on va brûler du charbon.
 - Dans une centrale à gaz, on va brûler du gaz.
 - Dans une centrale nucléaire, on va utiliser une réaction thermonucléaire qui va produire énormément de chaleur.
-
- ⇒ Et bien dans une centrale solaire à concentration, on va utiliser les rayons du soleil et on va les concentrer afin d'obtenir suffisamment de chaleur et ainsi pouvoir produire de la vapeur.

Pour concentrer les rayons du soleil, on va utiliser un système optique, le plus souvent composé d'un jeu de miroirs un peu comme on le ferait avec une loupe lorsqu'on essaie de brûler un morceau de papier au soleil.

Il y a plusieurs types de centrales solaires et on peut les classer selon leur système optique, c'est-à-dire en fonction de la méthode utilisée pour concentrer les rayons du soleil.

Il existe quatre grandes familles de centrales solaires à concentration :



- On peut faire une différence entre les systèmes qui concentrent les rayons du soleil sur un point ou les systèmes qui concentrent les rayons du soleil sur une ligne.
 - Dans le premier cas, on parlera de concentration ponctuelle ;
 - Dans le second cas on parlera de concentration linéaire.
- Ensuite, pour chaque cas, on peut faire une distinction entre les technologies à récepteurs fixes ou les technologies à récepteurs mobiles.
 - Ce qu'on appelle récepteur, c'est la partie de la centrale qui reçoit directement le rayonnement solaire concentré.

Les quatre grandes familles de centrales solaires se répartissent donc comme ceci :

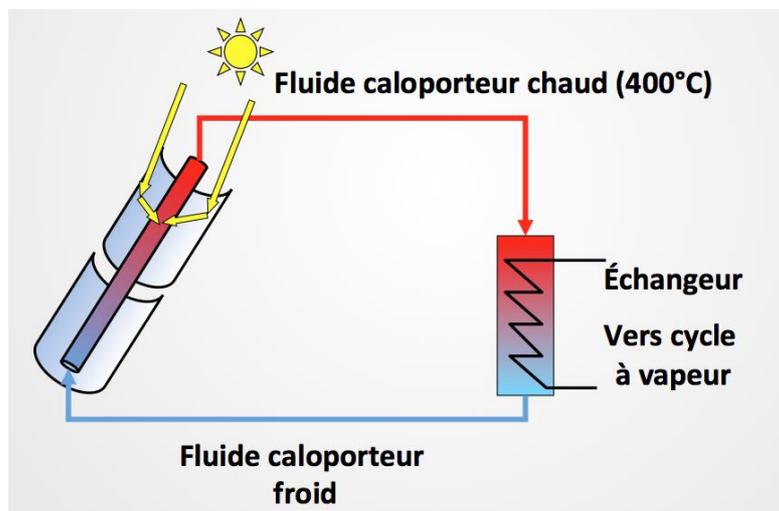
- Dans la catégorie des systèmes à concentration ponctuelle, on trouve les centrales à tour et les collecteurs paraboliques.

- Dans la catégorie des systèmes à concentration linéaire, on trouve les collecteurs linéaires de Fresnel et les systèmes cylindro-paraboliques.

Parmi ces quatre types de centrales solaires, il y en a deux qui sont largement développés à travers le monde et qui sont aujourd'hui des technologies reconnues matures par le monde industriel : ce sont les centrales à tour et les centrales cylindro-paraboliques.

On va donc se pencher un peu plus en détail sur ces deux types de centrales.

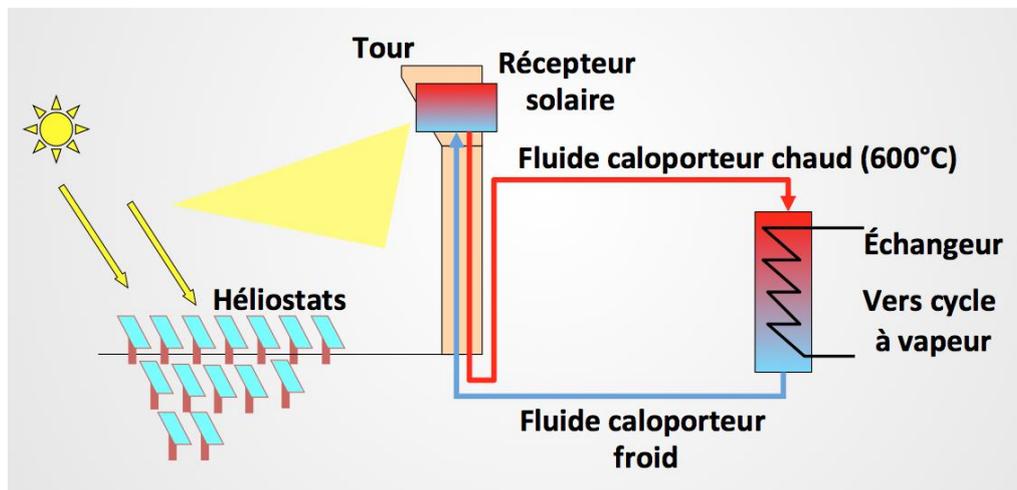
- Une centrale cylindro-parabolique est composée :



- d'un réflecteur parabolique qui est en fait un grand miroir en forme de gouttière ;
 - une structure métallique qui sert à supporter le miroir ;
 - un tube récepteur et ;
 - le système de poursuite du soleil.
- Le rôle du système de poursuite du soleil est d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que les rayons en provenance du soleil soient toujours perpendiculaires au réflecteur.
 - Ainsi, quelle que soit la position du soleil dans la journée, les rayons sont donc réfléchis en permanence vers le tube récepteur.
 - L'énergie thermique reçue est ensuite absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide.
 - ✓ Le fluide qui circule à l'intérieur du tube est chauffé à une température aux alentours des 400°C, ce fluide que l'on appelle plus souvent fluide de transfert ou fluide caloporteur, est la plupart du temps de l'huile synthétique.

- Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs conventionnels afin de produire de la vapeur d'eau à haute température et cette vapeur d'eau va ensuite être intégrée à un cycle thermodynamique pour produire de l'électricité comme on l'a vu précédemment.

Donc maintenant on va parler des centrales à tour. Dans une centrale à tour, plusieurs centaines ou milliers de miroirs sont positionnés autour d'une tour centrale.



- ✓ On appelle ces miroirs des héliostats, qui vient du grec *hélios* et *stat*, qui veut dire qui fixe le soleil.
- Situés au sol, ces héliostats sont orientables selon deux axes. Les rayons en provenance du soleil sont ainsi en permanence réfléchis en direction d'un point unique, qui est situé au sommet de la tour.
- Le rayonnement solaire est directement concentré sur un absorbeur qui transforme le rayonnement solaire en chaleur à haute température.
- ✓ Généralement, dans ce type de technologie, le fluide caloporteur utilisé est composé de sel fondu, les sels fondus sont chauffés par les rayons solaires aux alentours de 600°C et vont, comme précédemment, transférer leur énergie à de la vapeur d'eau pour pouvoir produire de l'électricité.

Enfin, pour finir sur ces généralités à propos des centrales solaires à concentration, je voudrais dire quelques mots sur les centrales actuelles sur la planète.

Un point très important à prendre en compte est que pour fonctionner, une centrale solaire à concentration a besoin d'ensoleillement direct, c'est-à-dire de rayons qui viennent directement du soleil.

- ✓ Au passage, ce point est une différence fondamentale avec l'énergie solaire d'origine photovoltaïque qui, elle, peut se contenter d'ensoleillement diffus pour pouvoir fonctionner.

- La conséquence de ça, c'est que pour être efficace, une centrale solaire à concentration doit être installée dans une région du globe où l'ensoleillement direct est jugé suffisant.
- Sur cette carte, à gauche, on voit quelles sont les régions de la planète pour lesquelles la ressource, donc l'ensoleillement direct, est jugée suffisante pour nos centrales solaires à concentration.
- On voit évidemment que ça correspond plus ou moins aux zones des grands déserts de notre planète telle que le Sahara, le sud-ouest américain ou encore l'Australie.

Pour illustrer cette contrainte et la mettre en perspective, on peut comparer la carte de gauche avec celle de droite qui répertorie et situe l'ensemble des centrales solaires sur la planète.

- On s'aperçoit donc que les sites sur lesquels sont implantées les centrales solaires correspondent effectivement aux zones géographiques où la ressource solaire directe est jugée très bonne.

Enfin, pour finir, on peut dire que le développement de ce type d'énergie renouvelable que sont les centrales solaires est très prometteur puisque le nombre de centrales opérationnelles a presque triplé en trois ans passant ainsi de 42 à 118 entre 2011 et 2014.