

Cellules solaires photovoltaïques : un condensé d'optique et d'électronique

Pere Roca i Cabarrocas
LPICM, CNRS, École polytechnique
pere.roca@polytechnique.edu

L'électricité d'origine solaire photovoltaïque (PV) a connu des progrès spectaculaires, au point qu'elle est en train de devenir compétitive par rapport aux sources conventionnelles. Cette réussite est le résultat de la convergence de plusieurs domaines (matériaux, physique, chimie, optique et électronique) sur un objectif commun : l'augmentation du rendement de conversion et la réduction des coûts de production. Nous présentons ici l'état de l'art au niveau de la recherche et de la production industrielle, ainsi que les défis à résoudre, pour lesquels beaucoup d'attentes reposent sur l'optique.

Électricité et photovoltaïque

L'énergie est l'un des défis majeurs du XXI^e siècle. En effet, notre société, basée sur l'information et la communication, a besoin de plus en plus d'énergie. Imaginez ne serait-ce qu'un jour sans électricité... Or sa production est basée sur la combustion de ressources fossiles : charbon, gaz et pétrole (la France avec 75 % de nucléaire est l'exception). Leur combustion a comme conséquence le rejet de quantités massives de CO₂ dans l'atmosphère, qui contribuent au réchauffement climatique. Tout le monde est d'accord, nous consomons de plus en plus d'énergie et nous aimerions qu'elle soit produite de façon propre et durable. Quelles sont les possibilités ? Le lecteur qui voudra en savoir plus peut se référer à l'ouvrage « L'énergie à découvert » [1]. Ici, nous allons nous focaliser sur l'énergie solaire photovoltaïque. Le soleil nous envoie en permanence une puissance lumineuse de l'ordre de 175×10^6 GW, une puissance énorme comparée à la puissance d'une centrale nucléaire (de l'ordre de 1 GW). De façon plus concrète, en plein soleil nous recevons environ 1 kW/m². Cette puissance est répartie sur un large domaine spectral (depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge) et elle est fortement « diluée » à la surface de notre planète. Comment capter l'énergie solaire de façon efficace et économique ?

La conversion directe lumière/électricité peut se faire de façon élégante avec des cellules solaires photovoltaïques (figure 1). Le principe est basé sur l'effet photoélectrique découvert par Edmond Becquerel en 1839, mais il a fallu attendre les années 1950 pour que la première cellule solaire à base de silicium cristallin voie le jour. La brique de base est la jonction P-N en silicium cristallin. Dans cette structure, l'absorption des photons d'énergie supérieure à l'énergie du gap crée des paires électron-trou qui sont séparées par le champ électrique interne de la jonction vers les contacts P (positif) et N (négatif). Chaque cellule fournissant une tension de l'ordre de 0,6 V, il faut en assembler un grand nombre (environ 72) pour avoir une puissance de 200 à 300 W par module, chaque module mesurant à peu près 1,5 m². Ces modules sont installés sur les toits des maisons (installations de quelques kW) ou dans des grandes centrales au sol (quelques dizaines voire centaines de MW). La simplicité du procédé de fabrication des jonctions P-N à base de silicium mono- ou multicristallin a conduit à une augmentation spectaculaire des capacités de production et à l'explosion du marché (quelques dizaines de MW dans les années 1990) à une trentaine de GW en 2012 (augmentation d'un facteur 1000). C'est cette augmentation de

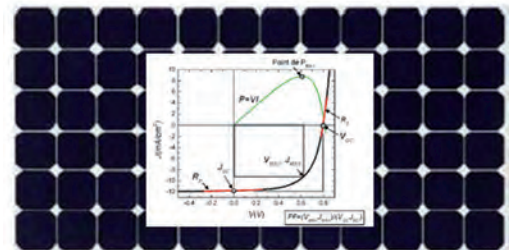
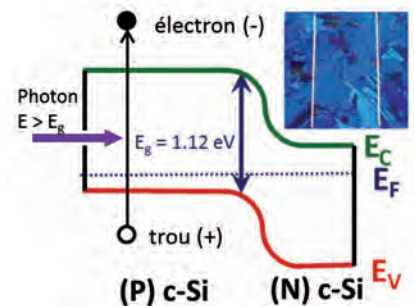
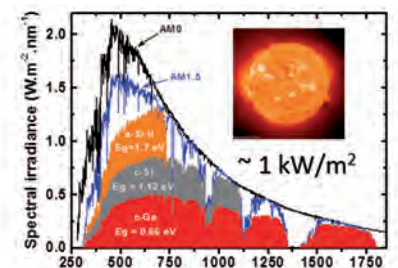


Figure 1. La chaîne de l'électricité solaire photovoltaïque. L'objectif est de produire des kWh à un prix compétitif par rapport à l'électricité du réseau. La jonction P-N est la brique élémentaire permettant la conversion de l'énergie des photons en électricité. L'assemblage des cellules en modules conduit à des générateurs d'une puissance de quelques centaines de watts.

la capacité de production qui, par des économies d'échelle, a permis de réduire de façon spectaculaire les coûts des modules PV (en dessous de 1 €/W). Au coût des modules, il faut ajouter celui de leur installation (montage, onduleurs, connexion au réseau) qui compte aussi pour 1 €/W. La chaîne du PV s'intéresse donc à la ressource (spectre solaire), son couplage à la cellule solaire, la production d'énergie dans la cellule, l'assemblage de cellules en modules, leur installation et connexion au réseau, et enfin leur recyclage en fin de vie (20 à 30 ans).

On peut aujourd'hui réaliser des installations PV pour 2–3 €/Wc. Le Watt crête (Wc) est une unité de puissance, directement reliée au rendement de conversion des modules qui est mesuré dans des conditions standard d'ensoleillement (1 kW/m² sous un spectre AM1.5) et de température (25 °C). Or les modules vont rarement fonctionner dans ces conditions. Ce qui compte est l'énergie produite c'est-à-dire le nombre de kW h que le module va produire dans l'année. On comprend aisément qu'il ne suffit pas de fabriquer des cellules avec un fort rendement, il faut aussi les installer de façon à maximiser leur production d'électricité.

Le marché PV en 2013 est stable par rapport à 2012, de l'ordre de 30 GW. Cette industrie s'est développée grâce aux tarifs de rachat incitatifs et aux économies d'échelle. Le cheval de bataille a été la jonction P-N en silicium cristallin, qui combine un matériau de haute pureté (cher) avec une technologie bien établie et fiable. Cela assure aujourd'hui des modules à 15–21 % de rendement qui constituent 90 % du marché. Mais il n'y a pas que le silicium cristallin dans le monde du PV. L'augmentation du marché a favorisé l'apparition de plusieurs filières, caractérisées par leurs méthodes de production et les matériaux utilisés.

Filières du photovoltaïque : la course au rendement

Les recherches sur les cellules solaires ont démarré dans les années 1950 avec les premières jonctions P-N ayant un rendement de 5 %. Mais, comme on peut voir sur

la figure 1 de l'article de Jean-Pierre Joly (pages 40 à 43 de ce numéro), l'activité dans ce domaine s'est fortement développée à partir des années 1970, suite au premier choc pétrolier. Depuis, la course ne s'est pas arrêtée : c'est un marathon avec de multiples victoires d'étapes et une progression soutenue dans l'amélioration des performances et des ruptures technologiques, associées à l'importance des efforts de recherche consentis.

La filière silicium massif (mono et multicristallin) a connu des progrès la menant à une cellule record de 25 %. Cette filière est aussi connue comme la première génération. Nous arrivons aujourd'hui aux limites de ce qu'une cellule constituée d'un seul matériau peut atteindre (un rendement de l'ordre de 30 %) et la principale perspective dans cette filière est de réduire les coûts de production sans perdre en rendement. Aujourd'hui l'épaisseur des plaquettes de silicium est de l'ordre de 180 µm. Or, le coût du silicium représente à lui seul la moitié du coût de la cellule. Cela s'explique par le grand nombre d'étapes nécessaires à la production d'une plaquette de silicium de grande pureté, indispensable pour la fabrication de cellules à haut rendement (figure 2). Il faut donc trouver des moyens de produire des plaquettes de plus en plus fines, ce qui implique aussi de trouver

des astuces pour augmenter l'absorption optique.

Les cellules de deuxième génération à base de matériaux en couches minces (couches d'épaisseur de l'ordre de 1 µm), directement déposés sur un substrat, permettent de court-circuiter un certain nombre d'étapes nécessaires aux cellules de première génération. Ces cellules ont réalisé des progrès spectaculaires, pour atteindre des rendements de 20,4 % pour le Cu(In,Ga)Se₂, 18,7 % pour le CdTe et 13,4 % pour des cellules tandem à base de silicium amorphe et microcristallin. Ces filières de deuxième génération ont réussi à prendre des parts du marché significatives (de l'ordre de 10 %) mais suite à la crise du secteur elles subissent un certain ralentissement.

Dans cette profusion de filières, on trouve aussi des cellules à colorant et des cellules à base de matériaux organiques qui ont connu un progrès fulgurant sur la dernière décennie, pour atteindre des rendements autour de 11 %. Les rendements sont modestes mais les promesses de faible coût de production rendent ces filières attractives. À l'autre extrême, on trouve les cellules multi-jonctions qui combinent des matériaux avec des énergies de gap différentes. Cette approche a connu un fort succès avec des matériaux

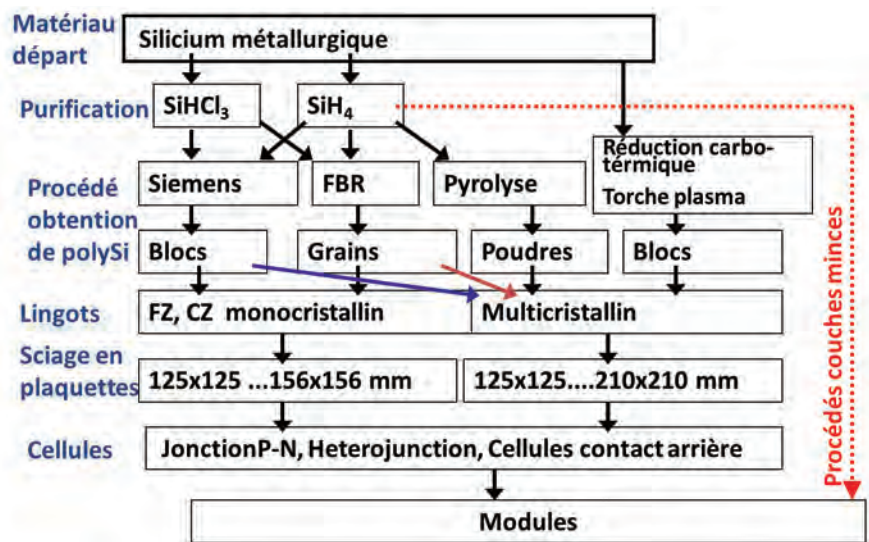


Figure 2. Étapes de production de modules PV de première génération à base de silicium cristallin et de deuxième génération à base de couches minces de silicium (amorphe, microcristallin...). À noter le grand nombre d'étapes entre les précurseurs liquides (purs) et la cellule en silicium cristallin. Dans les procédés couches minces de silicium, le silane est utilisé dans des réacteurs de dépôt plasma pour produire directement des modules.

III-V (GaAs, GaAlAs), au point que l'on a atteint en 2013 des rendements de 44 % pour une cellule triple jonction sous forte concentration (de l'ordre de 500 soleils). Mais les procédés de production font que les coûts sont trop élevés. Ces filières ont du mal à prendre une place significative sur le marché.

Optique et défis du PV

Dans la conversion photon-électron il y a deux aspects fondamentaux : l'absorption totale de la lumière émise par le soleil, que l'optique peut nous aider à optimiser, et la récupération de l'énergie de ces photons, ce qui va se refléter sur la tension de circuit ouvert et le facteur de forme de la cellule. Concentrons-nous sur ce que l'optique peut nous apporter. Les différentes thématiques sont montrées au tableau 1.

Optimisation de la source

Dans une jonction P-N à base de silicium cristallin, le gap optique du silicium est de 1,1 eV. Cela veut dire que les photons d'énergie inférieure à cette valeur ne sont pas absorbés, tandis que ceux de plus grande énergie le sont. Par contre l'énergie que l'on pourra récupérer est limitée au produit du courant de court-circuit (J_{sc}) par la tension de circuit ouvert (V_{oc}). Avec une tension de circuit ouvert (V_{oc}) de l'ordre de 0,6 volts, on ne pourra récupérer qu'environ 20 % de l'énergie des photons dans le bleu (énergie de l'ordre de 3 eV) (pertes par thermalisation).

Pour réduire ces pertes, des solutions existent : l'une d'elles consiste à convertir les photons d'énergie supérieure au gap en photons avec une énergie proche du gap (on minimise la thermalisation), il s'agit de la *down-conversion*. On peut aussi imaginer des matériaux qui combinent deux photons d'énergie inférieure au gap pour produire un photon d'énergie supérieure (*up-conversion*), ce qui réduit les pertes par transmission. Une autre solution

consiste à augmenter la tension de circuit ouvert, ce qui peut être obtenu en travaillant sous concentration (le V_{oc} augmente avec le logarithme du courant de court-circuit, proportionnel à la concentration). C'est l'approche des cellules multi-jonctions sous concentration. Dans cette thématique, le défi est de trouver des systèmes de concentration efficace (rendement optique supérieur à 90 %), avec une grande durée de vie et à faible coût.

Couplage de photons dans la cellule

Afin de maximiser le nombre de photons absorbés par la cellule, il faut absolument réduire la réflectivité de sa surface. C'est ce que permettent les couches antireflet. En optimisant leur indice de réfraction et leur épaisseur, on sait réduire les pertes par réflexion dans une certaine gamme spectrale. Mais l'objectif est de réduire cette réflexion dans la gamme spectrale allant de 300 à 1100 nm. Pour cela on structure la surface en produisant des pyramides, des nanofils, des réseaux métalliques (photonique), des nanoparticules métalliques (plasmonique)...

Réduction de la quantité de matériaux nécessaires à l'élaboration des cellules

Ceci est d'autant plus important que

l'on vise une production d'énergie à l'échelle planétaire (TW.h). Réduire les quantités de matériaux peu abondants et donc chers (In, Ag, Te...) est une nécessité. Ceci veut dire travailler avec des cellules de plus en plus minces, dans lesquelles on attend de l'optique des solutions pour continuer à absorber le maximum de photons avec le moins de matière possible.

Élaboration de nouveaux procédés pour les cellules

Il s'agit de trouver des moyens d'augmenter le rendement grâce à une amélioration des performances électriques. En effet, nous l'avons dit, une fois que tous les photons ont été absorbés, il faut encore empêcher la recombinaison des paires électron-trou photo-générées. Des solutions telles que des contacts localisés, et le dopage sélectif, rendues possibles avec des techniques laser, sont de plus en plus populaires et commencent à sortir du laboratoire pour trouver leur place dans les usines de production. La *figure 3* montre un exemple de cellule solaire à base de nanofils de silicium qui combine les avantages des couches minces par la technique d'élaboration, le piégeage optique efficace grâce à la forêt de nanofils (*black silicon*) et la collecte efficace grâce à la structure radiale de la jonction.

Tableau 1. Défis posés par l'augmentation du rendement de conversion et la réduction des coûts de l'énergie solaire photovoltaïque, et solutions que l'optique peut apporter.

Thématique	Défis	Solutions apportées par l'optique
Le soleil (source) Système PV	Adapter le spectre à la cellule Concentration Suivi du soleil	Conversion de photons (up and down) Lentilles Fresnel, lentilles planes, ... Tracking
Couplage des photons à la cellule	Réduire la réflectivité	Texturation de surface Couches antireflet Black silicon, nanofils
Matériaux	Réduire la quantité de matériaux	Plasmonique, photonique Piégeage efficace Cellules à base de nanofils
Procédé cellule	Optimiser le rendement Réduire la recombinaison Contacts localisés face arrière Collecte efficace	Dopage localisé par laser Jonction radiale
Caractérisation matériaux et dispositifs	Comprendre le fonctionnement Réduire les pertes	Imagerie optique : photo et électroluminescence

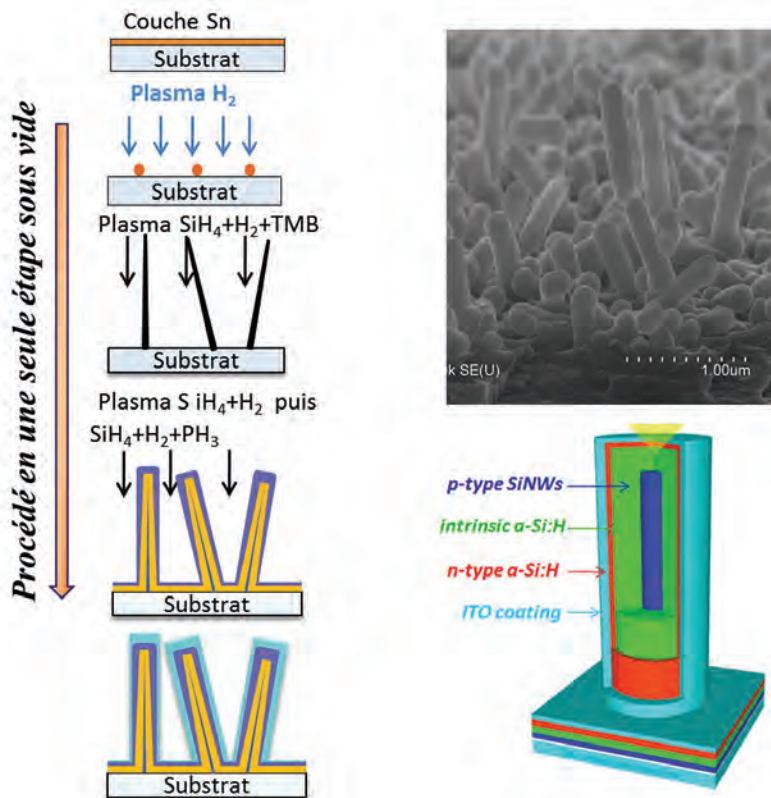


Figure 3. Cellules solaires à jonction radiale à base de nanofils de silicium. Elles combinent les avantages des couches minces : production en une seule étape sous vide avec la structure cristalline des nanofils, le fort piégeage optique par la forêt de nanofils et une excellente collecte des porteurs photo-générés grâce à la jonction radiale.

Caractérisation des matériaux et dispositifs

La cellule solaire est un convertisseur photon-électron que l'on veut le plus efficace possible. Depuis quelques années la caractérisation optique, en particulier par des mesures de photoluminescence et d'électroluminescence, est de plus en plus utilisée, aussi bien comme un moyen d'analyse et d'optimisation en recherche, que comme un outil de contrôle au niveau de la production.

Perspectives

Le bref aperçu des apports de l'optique montre l'étendue des possibilités d'amélioration des cellules solaires. Dans cette course au rendement, il est très difficile de faire des pronostics quant à la filière qui va l'emporter. Probablement n'y aura-t-il pas un seul gagnant mais plutôt une spécialisation des filières par rapport aux différents segments du marché : installations

de puissance, intégration bâtiment, petite puissance. Dans tous les cas de figure, la course au rendement va continuer. La filière du silicium cristallin a le bénéfice d'une technologie sûre, efficace et ayant fait ses preuves. Pour réduire les coûts, elle a entamé une cure d'amaigrissement, avec des plaquettes de plus en plus fines. On peut parier que cette filière et celle des couches minces de silicium vont finir par se rejoindre (c'est déjà le cas avec les cellules à hétérojonction) et intégrer les avantages des cellules multi-jonctions pour aller au-delà de 25 % de rendement tout en réduisant les coûts de production.

Références



- [1] L'énergie à découvrir. CNRS Éditions, Paris 2013. Sous la direction de Rémy Mosseri et Cathérine Jeandel.
- [2] Linwei Yu, Lorenzo Riguti, Maria Tchernycheva, Soumyadeep Misra, Martin Foldyna, Gennaro Picardi, P. Roca i Cabarrocas. Nanotechnology 24 (2013) 275401.



ATTENTION!
Haute performance



Diodes Laser

FLEXPOINT® - Modules Laser

Du Visible à l'Infrarouge
Nombreuses configurations
Selon vos besoins
Fiables et robustes