

L'électricité, fille du Soleil

Silicium sous toutes ses formes, couches minces, polymères... Les matériaux sollicités pour l'élaboration des cellules photovoltaïques sont d'une diversité étonnante et le solaire commence à devenir compétitif par rapport aux autres sources d'énergie.



L'ESSENTIEL

→ L'énergie de la lumière éclairant un carré de 25 kilomètres de côté correspond à l'électricité consommée en France pendant un an.

→ Pour l'exploiter, on doit concevoir des cellules photovoltaïques qui convertissent l'énergie lumineuse en électricité.

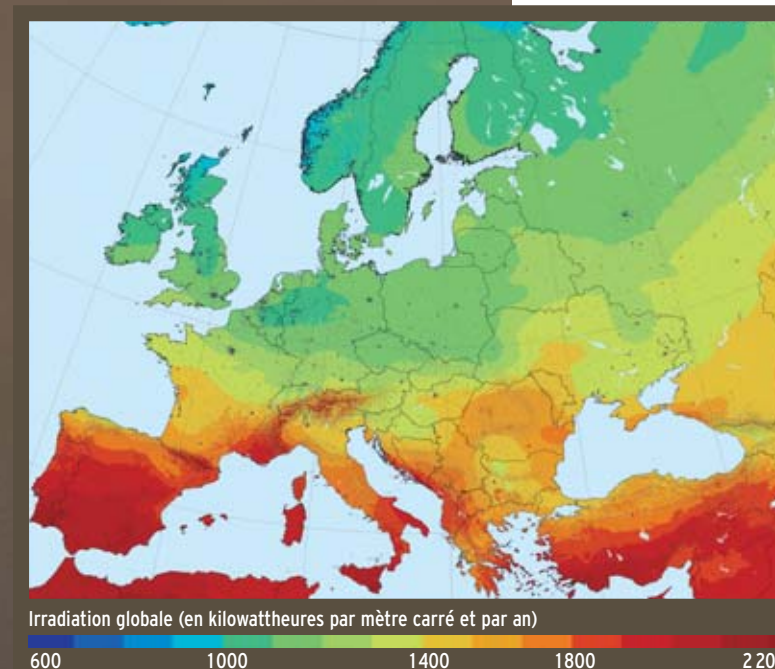
→ Les rendements sont aujourd'hui compris entre 10 et 20 pour cent, le record en laboratoire étant de 41 pour cent.

En 1839, le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la conversion de la lumière en électricité. Mais ce n'est qu'en 1954 qu'apparaissent, dans les Laboratoires *Bell*, des cellules solaires efficaces. Elles furent utilisées dès 1958 pour alimenter les premiers satellites. Les applications terrestres connaissent un nouvel essor dans les années 1970 avec le choc pétrolier, puis un ralentissement dans les années 1990, avant une reprise spectaculaire depuis les années 2000. Ce rebond s'explique par l'épuisement annoncé des ressources fossiles et le problème du changement climatique. En effet, l'énergie solaire représente une ressource immense et renouvelable qui ne demande qu'à être utilisée de façon plus importante. L'industrie photovoltaïque connaît un développement accéléré associé à d'intenses recherches visant à augmenter les rendements

de conversion et diminuer les coûts de production afin de rendre cette source d'énergie de plus en plus compétitive. Nous ferons dans cet article l'état de l'art des recherches sur le photovoltaïque, des techniques les plus établies aux perspectives les plus avancées.

La conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque correspond à la conversion directe de la lumière en électricité. Elle se fait dans des cellules solaires, assemblées en modules eux-mêmes réunis en unités de production. Celles-ci contiennent de quelques modules, par exemple en toiture, à plusieurs dizaines de milliers dans le cas de fermes solaires. La production d'énergie solaire peut donc être décentralisée et répartie dans le monde entier à l'inverse du mode actuel d'approvisionnement énergétique fondé sur les énergies fossiles.



VENT, SOLEIL, MER...

RÉPARTITION DE L'ÉNERGIE solaire incidente en Europe, exprimée en kilowattheures par mètre carré et par an. Un carré de 25 kilomètres de côté près de Perpignan reçoit chaque année l'équivalent de la production totale d'électricité en France (environ 550 milliards de kilowattheures).

puissance totale reçue, sur la Terre, hors atmosphère, est de 1 350 watts par mètre carré. Cet éclairage est noté AM0. Au sol, après la traversée de l'atmosphère, la puissance diminue et l'on définit de nouveaux standards : AM1 au niveau de l'équateur, AM1,5 et AM2 sous les plus hautes latitudes, où la lumière doit traverser 1,5 ou 2 fois l'épaisseur de l'atmosphère. La puissance AM1,5 standard (1 000 watts par mètre carré) est la référence dans les calculs de rendements énergétiques.

Séparer les électrons des trous

Pour convertir les photons en électricité, on utilise des cellules solaires constituées de semi-conducteurs. Ces matériaux sont dotés d'une bande d'énergie interdite, nommée *gap*, dont la largeur dépend de la nature chimique et de la structure du matériau. Ce *gap*, exprimé en électronvolts (eV), vaut 1,1 eV pour le silicium cristallin, de 1,7 à 1,9 eV pour le silicium amorphe hydrogéné, 1,5 eV pour l'arséniure de gallium (GaAs)...

Un photon est absorbé par un semi-conducteur quand son énergie (également exprimée en eV) est supérieure au *gap*, sinon il le traverse. Lorsque le photon est absorbé, il cède son énergie à un électron qui passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant derrière lui un « trou » : il crée une paire électron-trou. Pour créer une puissance électrique, on doit séparer les électrons et les trous. Pour cela, on utilise une jonction *p-n* constituée par le contact entre un semi-conducteur de type *p* et un semi-conducteur de type *n*. Ces deux types sont obtenus en introduisant dans le silicium de petites quantités respectivement de bore et de phosphore. Chaque atome de bore capte un électron et se charge négativement en créant un trou positif dans la bande de valence, tandis que chaque atome

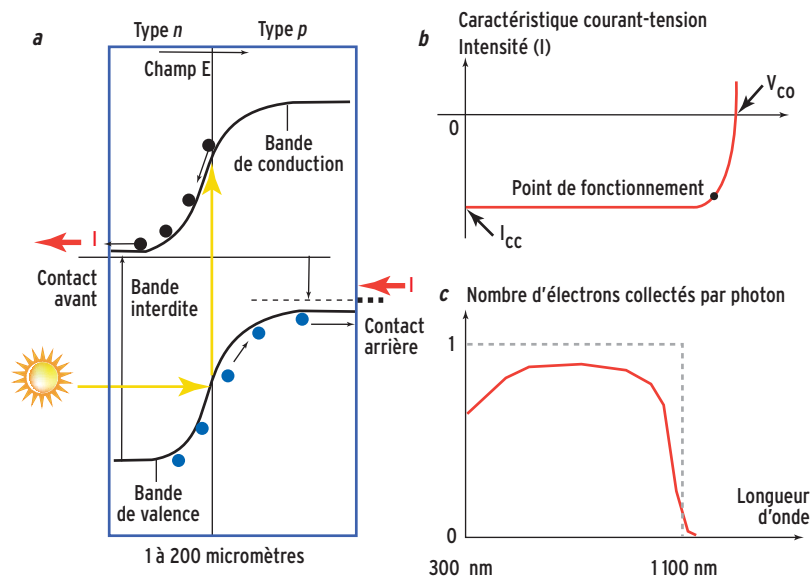
Daniel LINCOT est directeur de recherche CNRS et directeur de l'Institut de recherche et développement sur l'énergie photovoltaïque (IRDEP/CNRS/EDF/chimie Paristech).

Jean-François GUILLEMOLES est directeur de recherche à l'IRDEP.

Pere ROCA i CABARROCAS est directeur de recherche CNRS au Laboratoire de physique des interfaces et couches minces (LPICM-CNRS, École polytechnique).

Ludovic ESCOUBAS est professeur à l'Institut matériaux microélectronique nano-sciences de Provence (IM2NP-CNRS, Université de Marseille).

Abdellilah SLAOUI est directeur de recherche CNRS à l'Institut d'électronique du solide et des systèmes (INESS-CNRS, Université Louis Pasteur).



DANS UNE JONCTION P-N (a), un semi-conducteur de type p et un de type n sont accolés. Elle est caractérisée par une bande interdite (un gap) qui sépare la bande de valence de celle de conduction. Quand un photon (en jaune) est absorbé, les électrons (en noir) et les trous (en bleu) qui apparaissent sont attirés dans des directions opposées. Il en résulte un courant dont on peut représenter la caractéristique (b, l'intensité I en fonction de la tension V). On distingue les deux paramètres fondamentaux de la jonction, la tension de circuit ouvert V_{co} et le courant de court-circuit I_{cc} . La réponse spectrale de la cellule (c) montre l'influence de la longueur d'onde sur le rendement quantique (le nombre d'électrons collectés par photon absorbé).

de phosphore libère un électron dans la bande de conduction et se charge positivement.

Au contact des zones n et p, un champ électrique important s'installe, dirigé de la zone n vers la zone p. Grâce à ce champ, les paires électron-trou créées par les photons sont séparées : les électrons se dirigent vers la zone n, alors que les trous vont vers la zone p. Il en résulte un courant électrique, on parle de photocourant, qui peut circuler dans le circuit extérieur. La jonction fournit également une tension, dont la valeur idéale est proche de celle correspondant au gap (exprimé en volts).

Pour une telle cellule, on peut définir deux grandeurs fondamentales, la tension de circuit ouvert V_{co} , qui correspond à la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule, et le courant de court-circuit I_{cc} correspondant à l'intensité du courant pour une tension nulle. Cependant, pour créer de la puissance, on doit maximiser le produit (tension par intensité) entre les conditions de court-circuit et celle de circuit ouvert, ce qui définit un point de fonctionnement optimal.

Outre les matériaux de la cellule, le courant créé dépend de la longueur d'onde, comme le montre la réponse spectrale, c'est-à-dire la représentation du nombre d'électrons collectés dans le circuit extérieur par photon absorbé, en fonction de la longueur d'onde (voir la figure ci-dessus). Dans la zone la plus efficace, ce rapport, nommé rendement quantique, tend vers un, les pertes étant dues à la réflexion de la lumière. La longueur

d'onde λ des photons (en nanomètres) est liée à leur énergie E (en eV) par la relation $\lambda E = 1241$.

Ces principes de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque sont exploités par quasiment la totalité des cellules aujourd'hui commercialisées ! Quand on s'intéresse à ces cellules en termes de rendement, on se rend compte que le paramètre fondamental est la largeur du gap : plus elle est faible et plus l'intensité du photocourant est élevée et... plus la phototension est faible. On calcule que l'on a un optimum de la puissance pour des valeurs de gap situées autour de 1,4 eV. Le rendement, correspondant au rapport entre la puissance électrique et la puissance lumineuse, possède alors un maximum théorique d'environ 30 pour cent sous un éclairage standard et peut atteindre près de 40 pour cent quand la lumière est concentrée. Notons que le rendement maximum obtenu expérimentalement sous éclairage standard est de 25 pour cent dans le cas d'une cellule au silicium. Voyons maintenant les différentes filières photovoltaïques.

La principale est celle du silicium cristallin, qui représentait 80 pour cent de la production en 2009. On distingue le silicium monocristallin qui a conduit au rendement record précédent, et le silicium multicristallin. Avec celui-ci, la présence de joints entre les grains, qui introduisent des défauts, pénalise le rendement (valeur record de 20 pour cent). Cependant, l'intérêt du silicium multicristallin réside dans des coûts de production notablement inférieurs à ceux du silicium monocristallin.

Vers du silicium moins pur

Des travaux importants sont menés sur les procédés de purification du silicium et visent à s'affranchir des techniques de distillation utilisées pour préparer du silicium ultrapur pour la microélectronique, toujours afin d'abaisser les coûts de production. On peut citer en particulier ceux dont l'objectif est d'utiliser directement le silicium métallurgique (99 pour cent de pureté) en le purifiant grâce à des techniques de solidification contrôlée, et à l'emploi de traitements sous plasma. Des résultats encourageants ont été récemment obtenus en France à l'Institut national de l'énergie solaire (INES) à Chambéry, avec des rendements de 15 pour cent.

D'un point de vue fondamental, on étudie notamment les interactions des impuretés et des défauts cristallographiques. On s'intéresse aussi au développement de procédés particuliers, telle la diffusion de dopants, sur ces matériaux et les conséquences sur les performances des cellules. Les améliorations obtenues pour un matériau multicristallin laissent présager un rapprochement avec les propriétés du monocristal.

Un progrès récent majeur a conduit au remplacement du procédé de diffusion thermique du phosphore classiquement utilisé pour fabriquer la zone n à la surface des zones de type p, par le dépôt d'une couche de silicium amorphe déjà dopée au phosphore. Les jonctions qui en résultent sont plus performantes et plus simples. Elles atteignent près de 22 pour cent de rendement. D'autres améliorations, sur les contacts par exemple, conduisent aussi à des rendements supérieurs à 20 pour cent. On retrouve ces améliorations au niveau des modules (un ensemble de cellules) qui approchent aussi les 20 pour cent de rendement.

On doit également citer l'amélioration du tirage des lingots et surtout le remplacement de leur découpe en tranches, synonyme de pertes importantes de matière, par le tirage de rubans directement ou la découpe par laser.

La filière qui a beaucoup progressé est celle des couches minces (rendement de 20 pour cent en 2009 contre six en 2005). Elle est fondée sur l'utilisation de couches d'épaisseur micrométrique au lieu de plusieurs dizaines, voire centaines, de micromètres pour la filière du silicium classique. Ces couches minces sont déposées sur un support bon marché (verre, feuille métallique, plastique...).

Trois types de couches minces

On distingue trois sous-filières. La première est celle des couches minces de silicium amorphe, dont le rendement maximum est de 13,5 pour cent. La deuxième utilise des couches minces de tellure de cadmium (CdTe) dont le rende-



ment record est de 16,5 pour cent. Enfin, la troisième développe des couches d'un composé à base de cuivre, d'indium et de sélénium, le diséléniure de cuivre et d'indium ($CuInSe_2$, noté CIS), et plus exactement de leur alliage CIGS où une partie de l'indium est remplacée par du gallium. Cette filière atteint des rendements supérieurs à 20 pour cent aujourd'hui, similaires à ceux du silicium multicristallin. Détaillons chacune de ces filières.

Les cellules en silicium amorphe sont constituées de l'empilement d'une couche de type p, d'une couche i non dopée dite intrinsèque et d'une couche de type n. La couche i favorise la création de paires électron-trou dans une zone (cette couche i) où le champ électrique est élevé, ce qui améliore leur séparation. Les cellules solaires au silicium amorphe, à l'origine cantonnées dans

CETTE COUPE d'une cellule CIGS révèle les différentes couches : l'absorbeur (CGIS) constitué de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium ; la couche fenêtre d'oxyde de zinc (ZnO) ; une couche de contact en sulfure de cadmium (CdS) et une autre en molybdène (Mo). L'ensemble est déposé sur du verre. Malgré les irrégularités, les rendements atteignent 20 pour cent.

Un long fleuve... pas tranquille !

Depuis 2006, la France mène une politique volontariste pour développer l'énergie solaire, en particulier photovoltaïque, avec l'instauration des tarifs d'achats, puis avec la mise en place du Grenelle de l'environnement en 2008, qui prévoit une puissance installée photovoltaïque de 5,4 GW en 2020. La France s'est ainsi dotée d'un des contextes les plus incitatifs au niveau mondial pour accélérer la nécessaire montée en puissance de l'énergie photovoltaïque.

La réponse ne s'est pas fait attendre. L'engouement du public a été tel et les projets si nombreux qu'à la fin 2009, la puissance cumulée représentait déjà une bonne partie de l'objectif pour... 2020 ! À ce rythme, ce n'est pas en 2020, mais en 2012 que l'objectif aurait été atteint. Ainsi, nous retrouvons en France l'expérience d'autres pays, comme l'Allemagne et l'Espagne, montrant que dans un contexte incitatif, la transition vers les énergies renouvelables était en mesure de démarrer au quart de tour et qu'il suffisait d'appuyer sur l'accélérateur. Ce qui est à l'évidence, et d'abord, une démonstration spectaculaire de la maturité technologique de ce domaine et de son actualité à curieusement été surtout présenté de façon négative, et a servi de déclencheur à une nouvelle campagne contre le photovoltaïque, qui n'a cessé de monter en puissance dès la fin 2009 et tout au long de 2010. Qui n'a pas entendu parler des « profiteurs » du photovoltaïque, des tarifs d'achat indus, du fait

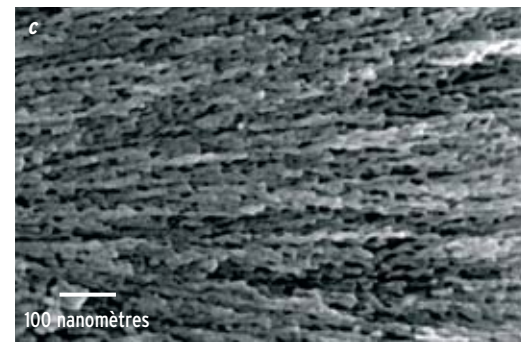
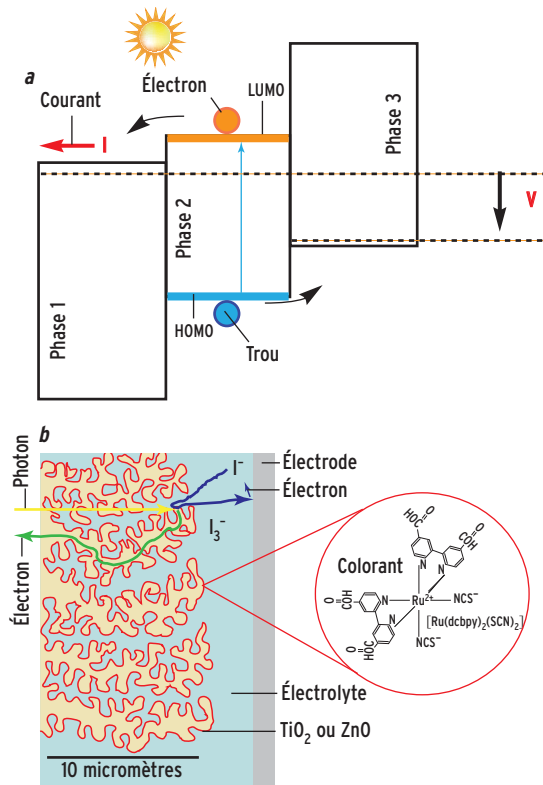
que tout cela remplissait les poches des firmes étrangères, des prélèvements insupportables que cela fait peser sur le budget des Français.

Ainsi, une excellente nouvelle sur le fond était transformée en argument pour remettre en cause le développement du photovoltaïque et son soutien volontariste, à travers les tarifs d'achat. On doit au contraire s'appuyer sur la dynamique créée, rappeler son caractère fondamentalement positif, pour poursuivre le développement du domaine en France à tous les niveaux, de l'industrie à la recherche, et promouvoir un déploiement innovant, tant au niveau des particuliers qu'au niveau des collectivités.

Cela ne veut pas dire qu'il ne faut pas adapter les mesures d'accompagnement, au contraire, à l'évolution du contexte. Les tarifs d'achat sont eux-mêmes un outil de soutien temporaire vers le développement auto supporté du domaine, et doivent donc être régulés, mais sur la base de la raison et non de l'anathème. L'heure n'est pas à se servir de ce prétexte pour remettre en cause l'intérêt même de la conversion photovoltaïque, mais au contraire à affiner les conditions permettant l'accélération de son développement en France, en maîtrisant la création de filières industrielles complètes et en s'appuyant sur une recherche de pointe, comme c'est le cas chez nos voisins allemands, mais aussi aux États-Unis, au Japon, en Corée et bien sûr en Chine.

Daniel LINCOT

DANS UNE CELLULE À COLORANT, l'absorption (a) d'un photon par cette molécule de colorant (phase 2) s'accompagne de la création d'un électron dans le niveau LUMO (en orange) et d'un trou dans le niveau HOMO (en bleu). L'électron est transféré dans la bande de conduction d'un matériau adjacent (phase 1), qui peut être un oxyde transparent poreux tandis que le trou du niveau HOMO est transféré dans un autre matériau adjacent (phase 3). Ce système a été mis en œuvre (b): les électrons photocréés dans la pellicule de colorant (en rouge) diffusent dans la matrice poreuse (en jaune) d'oxyde de titane (TiO₂) ou de zinc (ZnO) tandis que les trous oxydent les ions triiodure (I₃⁻) qui diffusent vers une électrode où ils sont réduits en ions iode (I⁻), ce qui ferme le circuit. En c, un exemple d'une structure nanoporeuse d'oxyde de zinc.



des marchés de niches, par exemple celui des calculettes, suscitent aujourd'hui un engouement important pour l'élaboration de modules souples et de panneaux en verre de grande surface (jusqu'à 5,7 mètres carrés d'un seul tenant). Les rendements plutôt faibles de cette filière sont compensés par des coûts de fabrication avantageux et par la possibilité d'obtenir facilement de grandes surfaces.

En termes de rendement, une rupture majeure est intervenue récemment avec la découverte d'autres formes structurales, intermédiaires entre celle du silicium amorphe et celle du silicium cristallisé. Elles sont obtenues en modifiant les conditions expérimentales de croissance, de façon à favoriser la cristallisation des couches. Au départ, on obtient des couches de nanocristaux de silicium insérées dans une matrice de silicium amorphe (on parle de silicium polymorphe), puis la phase cristalline croît jusqu'à devenir majoritaire (on parle de silicium microcristallin). Lorsque le dépôt a lieu sur un substrat cristallin, on peut même obtenir du silicium cristallin.

Grâce à ces nouvelles formes de silicium en couches minces, les rendements ont progressé. Une des voies d'amélioration des performances consiste à utiliser non plus une seule jonction *p-i-n*, mais deux, voire trois, jonctions empilées afin d'améliorer la collecte des photons. Ce principe, sur lequel nous reviendrons, est déjà à l'œuvre dans les modules commerciaux souples avec une triple jonction, où la valeur du *gap* des jonctions est modifiée par l'ajout de germanium. On étudie également la combinaison de silicium amorphe et microcristallin (nommée micromorphe), qui conduit à des rendements (pour les modules prototypes) de près de dix pour cent. Dans ces nouvelles structures, des progrès spectaculaires ont été accomplis au niveau de l'optique afin de piéger la lumière au sein de la jonction. Le parcours « équivalent » de la lumière peut ainsi être multiplié par 14!

Un succès exemplaire

La filière du tellure de cadmium illustre la place de l'innovation dans l'accélération du photovoltaïque. En effet, inexistante sur le marché il y a cinq ans, cette technique pèse en 2010 près de dix pour cent du marché. L'entreprise associée est devenue numéro un mondial, dépassant les majors précédentes qui développent le silicium cristallin.

Les cellules de tellure de cadmium sont également fondées sur des jonctions *p-n*, mais qui résultent cette fois de la mise en contact de deux matériaux différents. La couche *n* est un semi-conducteur transparent doté d'une grande bande interdite (le sulfure de cadmium). Les photons qui traversent cette couche sont ensuite absorbés par une couche dite absorbeur de tellure de cadmium de type *p*.

Le dispositif est complété par des couches assurant le contact: sur la face exposée, une couche (dite fenêtre) transparente et conductrice constituée d'un OCT, c'est-à-dire un oxyde conducteur transparent, en l'occurrence un oxyde d'étain dopé au fluor; sur la face cachée, une couche de contact métallique ou de carbone. Les cellules en tellure de cadmium ont une structure simple et sont faciles à fabriquer avec un haut débit. Ces avantages expliquent que cette filière ait créé une rupture de coût, en passant pour la première fois sous la barre de un dollar par watt-crête en 2009! Le watt-crête représente la puissance maximale d'un dispositif photovoltaïque fournie dans des conditions standards (ensoleillement de 1 000 watts par mètre carré, une température des panneaux à 25 °C, et un éclairage AM1,5).

Précisons que l'utilisation de cadmium toxique impose des conditions rigoureuses de production, et une utilisation bien encadrée, avec en particu-

lier le recyclage, afin de garantir la sûreté environnementale et sanitaire de la filière.

La filière CIS ressemble à celle du tellure de cadmium: l'absorbeur est remplacé par le CIS tandis que les couches fenêtres et d'OCT sont constituées de sulfure de cadmium, de zinc ou d'indium (en substitution du cadmium) et d'oxyde de zinc, dopé à l'aluminium, tandis que le contact arrière est constitué par une couche de molybdène (voir la figure page 49).

La fabrication des couches de CIS est plus complexe que celle du tellure de cadmium en raison du nombre d'éléments (jusqu'à quatre avec le CIGS). La contrepartie est une grande flexibilité pour optimiser les propriétés, tels le *gap*, l'affinité électronique, etc., par exemple en substituant partiellement l'indium par du gallium, par de l'aluminium ou le sélénium par du soufre. Ces options offrent un terrain de « jeu » considérable pour augmenter les performances des cellules photovoltaïques.

Outre les qualités physico-chimiques remarquables des couches ainsi optimisées, c'est aussi grâce à l'amélioration des interfaces que la filière a progressé et s'est consolidée jusqu'à passer récemment au stade de la production industrielle. Elle est assurée aussi bien par des groupes constitués qui se diversifient que par de nombreuses *start-up*.

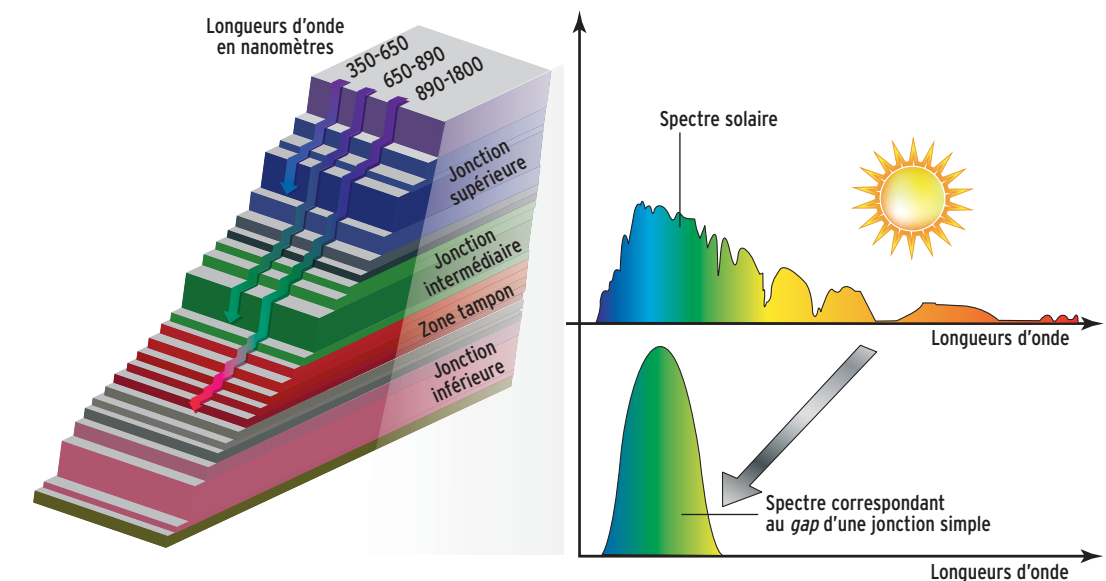
Vers les grandes surfaces

La filière CIS est diversifiée au niveau des matériaux absorbants, mais aussi à celui des méthodes de fabrication. Outre les méthodes sous vide par évaporation, usuelles dans le domaine des semi-conducteurs, qui conduisent aux meilleurs rendements (le record est à 20 pour cent), se développent de nouvelles techniques qui autorisent des revêtements à grande échelle,

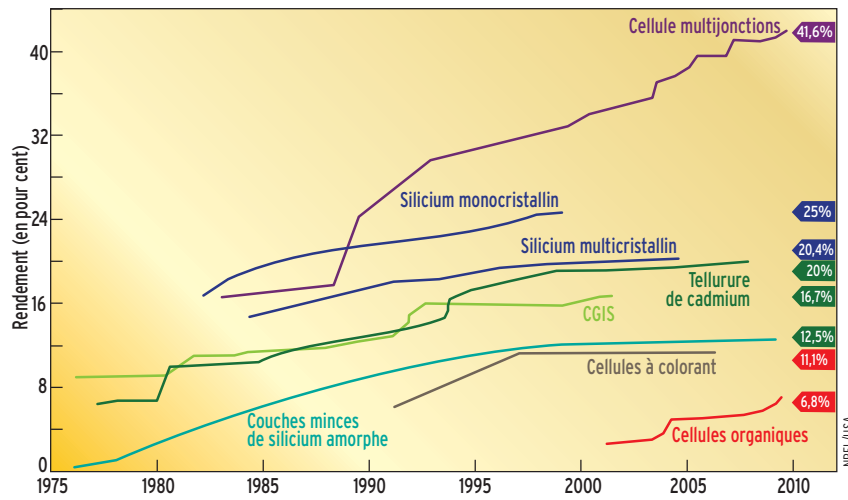


UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE en silicium multicristallin.

à basse température, et qui ne nécessitent pas d'étape contraignante sous vide poussé. On peut citer en particulier les techniques d'impression et d'électrolyse. Les couches de CIS obtenues par ces méthodes n'ont pas initialement de bonnes propriétés photovoltaïques, celles-ci leur sont conférées après un traitement thermique qui améliore leur cristallinité et leurs propriétés électriques: les rendements sont compris entre 10 et 14 pour cent, de quoi conduire aux premiers développements industriels. Nous sommes probablement à la veille d'une rupture majeure dans la diminution des coûts de l'électricité photovoltaïque.



POUR UTILISER LE SPECTRE de la lumière solaire, on peut recourir à des cellules multijonctions (à gauche), où chacune d'elles est dédiée à une gamme de longueur d'onde. On peut également utiliser des matériaux à base de terres rares qui modifient, grâce à des combinaisons de photons, le spectre solaire de façon à s'adapter aux longueurs d'onde utiles (à droite).



LES RENDEMENTS RECORDS en laboratoire de l'ensemble des filières photovoltaïques.

La filière CIS étudie aussi des absorbeurs sans indium, un élément rare qui peut constituer une limitation aux développements à grande échelle. Des premiers résultats encourageants (9,6 pour cent) ont été obtenus en remplaçant l'indium par une association étain-zinc, sous la forme du composé Cu_2SnZnS_2 (des éléments abondants). Étonnamment, ce composé est un analogue du minéral kesterite: le photovoltaïque s'inspire de la minéralogie!

D'autres filières en couches minces émergent. Elles sont fondées sur l'utilisation de matériaux actifs organiques en remplacement des matériaux inorganiques des filières précédentes. L'intérêt des matériaux organiques est leur abondance, qui pourrait conduire à une nouvelle réduction des coûts.

C'est en 1991 qu'ont été présentées pour la première fois des cellules constituées d'une matrice poreuse inorganique rendue fonctionnelle par le greffage de colorants photoactifs à l'échelle de la monocouche moléculaire et imprégnée par un électrolyte liquide contenant un couple oxydo-réducteur. Ce dernier permet de communiquer « électriquement » avec la molécule de colorant. C'était le premier pas – révolutionnaire – vers le photovoltaïque moléculaire, plus proche de la photosynthèse que de la jonction $p-n$ classique!

Dans ce dispositif (voir la figure page 50), la molécule de colorant est dotée de deux niveaux énergétiques nommés HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) et LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*), dont la distance correspond au *gap* des semi-conducteurs. L'absorption d'un photon s'effectue par excitation d'un électron du niveau HOMO vers niveau LUMO, avec la formation d'une paire électron-trou. L'électron est ensuite transféré dans la matrice inorganique, tandis que le trou est neutralisé par le réducteur en solution. Ces charges diffusent ensuite dans leurs phases respectives vers les contacts et

le circuit extérieur. Grâce à la surface importante d'une matrice poreuse, on multiplie les phénomènes d'absorption et on convertit efficacement le rayonnement incident.

Le système de référence est une couche d'oxyde de titane frittée, une molécule de colorant à base de ruthénium et un électrolyte non aqueux (acétonitrile) contenant le couple iode-iodure. Il atteint aujourd'hui près de 11 pour cent de rendement. Les travaux en cours concernent surtout le remplacement du colorant par un composé tout organique et celui de l'électrolyte liquide par une phase solide. Cette filière suscite un intérêt croissant.

L'autre volet des filières émergentes est celui des cellules tout organiques. En effet, on sait depuis des années que les polymères ont des propriétés semi-conductrices permettant de créer des jonctions analogues aux jonctions $p-n$. Cette approche a stagné longtemps en raison des propriétés de transport électronique insuffisantes des polymères: en particulier la séparation des paires électron-trou est beaucoup plus difficile, car celles-ci restent associées sous la forme d'excitons. Cependant, l'idée de mélanger intimement les deux phases, de la même façon que pour les cellules à colorants, conduit à l'amélioration notable des performances. Le concept de cellules organiques à jonction interpénétrée était né.

Dans ces conditions, les phases n et p , nommées donneur et accepteur dans le cas des polymères, forment deux réseaux séparés et imbriqués, où tout exciton créé peut être dissocié à leur interface en n'ayant à parcourir que quelques nanomètres! Dans le système de base, le donneur est constitué par des molécules de fullerène (et de plus en plus des nanotubes de carbone) fonctionnalisées et l'accepteur est un polymère dérivé du polythiophène. Les rendements progressent, et sont aujourd'hui de près de sept pour cent. Les dispositifs souffrent d'un manque de stabilité dans le temps, mais les travaux dans ce domaine sont importants et nombreux.

Les mille-feuilles photovoltaïques

L'ensemble des filières précédentes est fondé sur la conversion photovoltaïque impliquant deux niveaux. Nous avons vu qu'une grande partie de l'énergie solaire est perdue soit parce que les photons ne sont pas absorbés, car leur énergie est inférieure à celle du *gap*, soit, pour ceux dont l'énergie est supérieure à celle du *gap*, par perte de l'excès d'énergie sous forme de chaleur, ce qui limite le rendement théorique à environ 30 pour cent. Pourtant, quand on analyse la conversion photovoltaïque d'un

point de vue théorique, on montre que le rendement devrait plutôt être proche de 90 pour cent! Alors pourquoi ne pas imaginer des rendements de 40, 50 pour cent ou plus dans les prochaines années?

En fait, une filière se détache des autres vers les hauts rendements, avec récemment des rendements de 41 pour cent. Il s'agit de la filière des multijonctions, utilisant majoritairement des alliages dérivés de l'arséniure de gallium. Dans les systèmes étudiés, une première jonction à grande bande interdite convertit efficacement les photons ultraviolets en minimisant les pertes sous forme de chaleur, une deuxième jonction située immédiatement derrière est dotée d'un *gap* inférieur et convertit alors de façon optimale les photons visibles, enfin une troisième jonction à petit *gap* convertit les photons infrarouges (voir la figure page 51, en bas). Ce dispositif associé à la concentration de la lumière permet d'atteindre 40 pour cent de rendement. En multipliant les jonctions, on pourrait atteindre les 85 pour cent théoriques.

Cette filière est industriellement établie de longue date, mais elle était surtout dédiée à des niches restreintes, le domaine spatial en particulier. Pendant longtemps, on a pensé que, pour des questions de coûts prohibitifs, cette filière ne serait pas adaptée pour des applications terrestres. Ce n'est plus le cas aujourd'hui: les cellules multijonctions sont utilisées dans des systèmes à concentration solaire où elles ne couvrent qu'une faible fraction de la surface, le reste étant constitué par les dispositifs optiques de concentration, pouvant être en plastique. Le coût élevé de l'un est alors compensé par le coût faible de l'autre. Ce photovoltaïque à concentration trouve sa légitimité dans les zones à fort ensoleillement direct, comme dans le pourtour méditerranéen.

Jongler avec les photons

Peut-on atteindre de très hauts rendements sans recourir à des dispositifs complexes? Oui, grâce à de nouveaux concepts photovoltaïques, dits de troisième génération. Le plus avancé est celui fondé sur la conversion de photons. En effet, on peut laisser inchangé le spectre de lumière incident et adapter la cellule solaire, mais on peut aussi prendre une excellente jonction simple, et changer... le spectre incident! Pour ce faire, on doit ramener les divers photons du spectre solaire à l'énergie du *gap* (voir la figure page 51, en bas).

C'est théoriquement possible en utilisant les combinaisons de photons mis en œuvre dans des matériaux contenant par exemple des terres rares qui contiennent de multiples niveaux d'énergie pouvant se coupler. Dans ce cas, deux photons de basse énergie peuvent être additionnés et donner

lieu à l'émission d'un photon de plus haute énergie qui sera absorbé par la jonction. À l'inverse, un photon de haute énergie peut se décomposer en plusieurs photons de plus basse énergie absorbés de façon optimale dans la jonction.

Des premiers résultats ont été obtenus avec une matrice d'oxyfluorures contenant deux terres rares (l'erbium et l'ytterbium): 17 pour cent des photons à 1,5 micromètre de longueur d'onde ont

D'un point de vue théorique, le rendement du photovoltaïque devrait atteindre 90 pour cent! Le record actuel est à 41 pour cent...

été convertis en photons à un micromètre ou moins. On peut donc imaginer à moyen terme de coupler des cellules classiques avec ce type de couche de conversion optique, à condition de travailler sous concentration.

D'autres concepts à l'étude mettent en œuvre la création de bandes d'absorption supplémentaires intermédiaires dans la bande interdite. Ce concept pourrait conduire à l'utilisation des propriétés de spin. Enfin, on peut imaginer de collecter les paires électron-trou hors équilibre, avant que celles-ci n'aient le temps de se dissiper en chaleur, probablement avec des nanostructures. Ces idées fondées initialement sur des études théoriques commencent à être explorées dans les laboratoires.

De ce tour d'horizon de l'état de l'art du photovoltaïque, on peut souligner que, dans les filières établies, les progrès de ces dernières années, aussi bien dans le domaine du silicium cristallin que dans celui des couches minces inorganiques, ont été spectaculaires. Ils se traduisent par une baisse notable du coût, qui est passé pour la première fois sous la barre de un dollar par watt-crête en 2009. Cette valeur serait le seuil de la compétitivité totale du photovoltaïque vis-à-vis des autres sources d'énergie, sans aucun soutien spécifique (voir l'encadré page 49). Les prix pratiqués par EDF aujourd'hui vont de 7,84 à 12,35 centimes d'euro selon les heures creuses ou pleines. Dans d'autres pays, ils peuvent atteindre 20 à 25 centimes d'euro. Pour le photovoltaïque, lorsque l'on additionne l'ensemble des coûts, ces prix varient aujourd'hui d'environ 30 centimes d'euro à près de 60 centimes le kWh en fonction de la latitude et des techniques employées. Cependant, ces prix tendent à baisser et la compétitivité est attendue dès 2015 pour le Sud de l'Europe et 2020 pour une grande partie de celle-ci.

livres

- W. PALZ, *The Emergence of Solar Electricity from the Sun, Power for the World*, Pan Stanford, Singapore, 2010.
- A. LUQUE et S. HEGEDUS, *Handbook of Photovoltaic Science and Technology*, Wiley, 2003.

articles

- D. LINCOT, *La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire*, in *Revue du palais de la découverte*, n° 344-345, janvier-février 2007, pages 47-65, 2007. www.palaisdeladecouverte.fr.
- *Dossier photovoltaïque, Reflets de la physique*, in *Revue de la Société française de physique*, 2007. www.refletdelaphysique.fr

internet

- Association européenne des industriels du photovoltaïque: www.epia.org/
- Systèmes solaires: http://fondem.org/accueil_systemes_solaires.asp
- Institut national de l'énergie solaire: www.ines-solaire.com/
- Centre de recherche de la commission européenne: <http://re.jrc.ec.europa.eu>