

L'énergie photovoltaïque monte en puissance

Source d'énergie inépuisable, directe, immédiate et faiblement émettrice de gaz à effet de serre, le Soleil, reste peu exploité. **Pourtant, grâce à cette énergie solaire, il est possible de produire, soit de la chaleur en utilisant différents phénomènes physiques comme la thermodynamique et la thermique, soit de l'électricité par conversion photovoltaïque.**

Il s'agit de la voie la plus prometteuse pour produire de l'électricité « propre ». Dans ce contexte, le CEA, très impliqué dans les recherches sur les énergies faiblement carbonées, est aujourd'hui un des acteurs majeurs de cette filière photovoltaïque.



Capteurs solaires photovoltaïques intégrés en toiture (Ines).

La technologie du **photovoltaïque** permet de récupérer l'énergie lumineuse du Soleil pour la convertir directement en électricité par l'intermédiaire de cellules solaires ensuite assemblées en modules (figure 1). Plusieurs matériaux offrent des perspectives très intéressantes pour réussir cette conversion. Certains d'entre eux, bien connus et déjà très répandus, se voient sur nos toitures : c'est le cas des plaquettes de **silicium multicristallin** ; d'autres, encore à l'étude dans nos laboratoires, feront l'objet de transferts en production dans deux ans, cinq ans ou au-delà de dix ans : par exemple, les **couches minces** de composés à base de **cuivre**. Les choix de ces matériaux s'opèrent selon deux critères : le rendement de conversion photovoltaïque et le coût de la matière.

Le silicium toujours en première ligne

La conversion de l'énergie solaire, sous une forme utilisable dans les bâtiments et les sites actuels, peut s'opérer sous deux formes : solaire/thermique ou solaire/électrique. La forme électrique s'obtient par conversion photovoltaïque (PV) dans un matériau, organique ou inorganique, de type **semi-conducteur**. Il existe aujourd'hui différents mécanismes de conversion d'énergie photovoltaïque, variant selon les matériaux actifs mis en œuvre, à savoir :

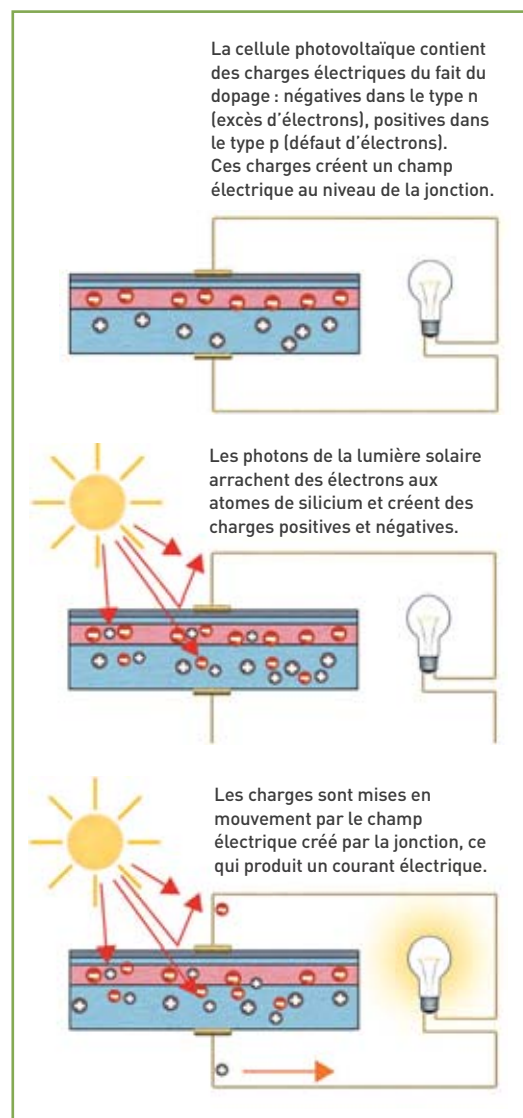


Figure 1
Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

- les matériaux organiques **pi-conjugués**, tels que les **polymères** semi-conducteurs (utilisés en combinaison avec des dérivés **fullerènes**), les colorants utilisables dans des structures **biomimétiques** ou de type hybride contenant aussi des **nanosstructures** inorganiques ;

- les matériaux semi-conducteurs de différentes familles (III-V, II-VI)⁽¹⁾ ou d'autres composés, plus spécifiques, à base de cuivre (CuO), de fer (FeS₂) ou de **zinc** (Zn₃P₂) ;

- le silicium qui occupe une place à part du fait de son abondance dans la croûte terrestre et de sa grande utilisation dans la métallurgie ou en **micro-électronique**.

La mise en œuvre de ces matériaux peut donner lieu à une différenciation plus fine qui suppose de les mettre en forme et de les structurer pour obtenir un dispositif capable de répondre à certains critères optiques et électroniques. Il en résulte une **cellule solaire photovoltaïque**, utilisable dans un système de production d'énergie, le plus souvent intégrée dans un panneau solaire.

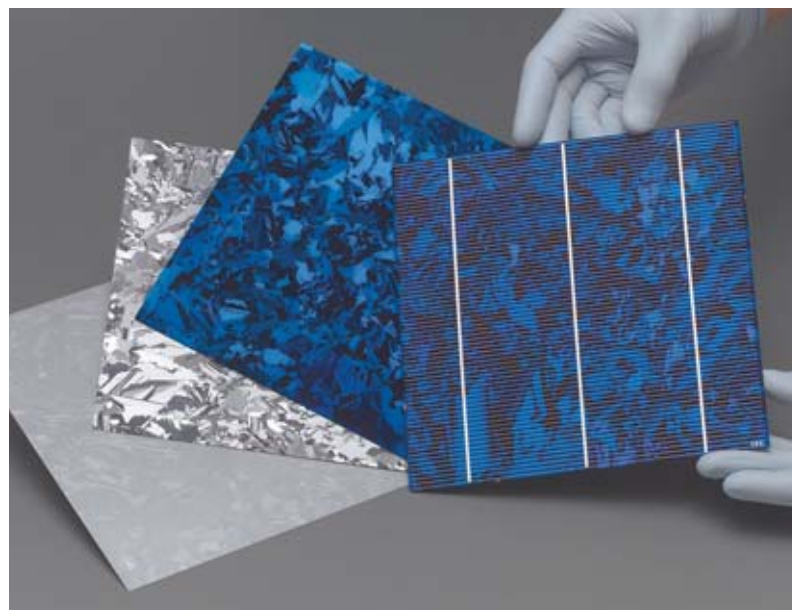
Les performances électro-optiques de ces matériaux sont proportionnelles au produit de plusieurs facteurs : la fraction de la lumière incidente pénétrant dans le matériau, la fraction de cette lumière ensuite absorbée au sein du matériau, l'efficacité de conversion de ces **photons** en charges électroniques et le potentiel électrique qui en résulte aux bornes du matériau.

Idéalement, le matériau présent au cœur de cette cellule doit donc présenter deux qualités :

- une forte capacité d'**absorption** de la lumière solaire pour un volume de matériau le plus faible possible ;
- une bonne séparation et un bon transport des charges photogénérées jusqu'aux bornes de la cellule avec le moins de pertes possible sur des défauts recombinant les **électrons** et les trous, sans négliger la possibilité de réaliser une structure électrique permettant la récupération des charges à l'extérieur du matériau.

Le silicium appartient à la famille des semi-conducteurs dont les propriétés sont bien connues des scien-

(1) Dans la famille III-V des matériaux semi-conducteurs, entrent notamment les alliages à base de gallium (Ga), d'arsenic (As), d'aluminium (Al), d'indium (In), de phosphore (P) : ce sont des matériaux des colonnes III et V du tableau des éléments tels que les GaAs, InP, GaAlAs, GaInP ; dans la famille II-VI des matériaux semi-conducteurs, entrent des alliages à base de plomb (Pb), de soufre (S), du cadmium (Cd), du tellure (Te), du manganèse (Mn), du zinc (Zn) : ce sont des matériaux des colonnes II et VI du tableau des éléments tels que les PbS, CdTe, CdMnTe...).



CEA/D. Michon/Artechnique

Plaques de silicium de dimensions 200x200 mm à divers stades de fabrication de la cellule : de gauche à droite, après découpe par scie à fil, après texturation et formation de l'émetteur, après dépôt de la couche bleue antiréfléchissante, après formation des grilles de contact (cellule terminée, prête à être mise en module).

tifiques et des industriels : maîtrise des propriétés électriques, propriétés optiques, technologies de mise en œuvre (parfois issues des technologies de la micro-électronique). Aujourd'hui, ce matériau s'utilise notamment pour la conversion photovoltaïque sous forme de plaquettes et se retrouve dans la plupart des produits électroniques actuels cette fois-ci sous la forme de **circuits intégrés** appelés aussi puces électroniques (téléphone mobile, micro-ordinateur, métallurgie mais aussi **alliages** métalliques...). Sous sa forme monocristalline, le silicium s'obtient par des méthodes de tirage de cristaux : par exemple, la méthode Czochralski (le tirage d'un lingot à partir d'un bain fondu dans un four) ou la fusion de zone (fusion et cristallisation d'un lingot solide par déplacement du four le long du lingot). Il s'agit de deux méthodes très bien maîtrisées après de longues années de mise au point par l'industrie de la micro-électronique.



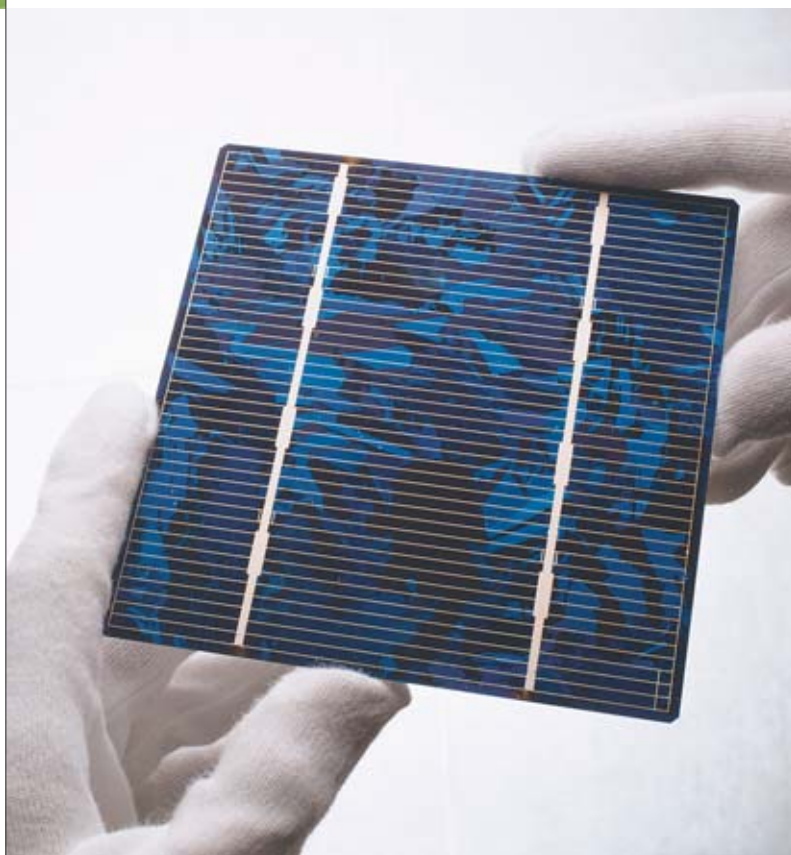
P. Dumas / CEA

Lingot de silicium pour étude de développement (de taille laboratoire : 4 kg).



CEA/D. Michon/Artechnique

Rainurage laser des plaques de silicium. Séparation de la diode en face avant, de la diode en face arrière. Les traitements sont réalisés dans des salles blanches, sur des équipements proches de l'industrie, ce qui facilite le transfert des procédés.



A. Gohin / CEA

Cellules photovoltaïques en silicium multicristallin de Photowatt. Vue de la face avant représentant la grille de contact et la couche antireflet (bleue).

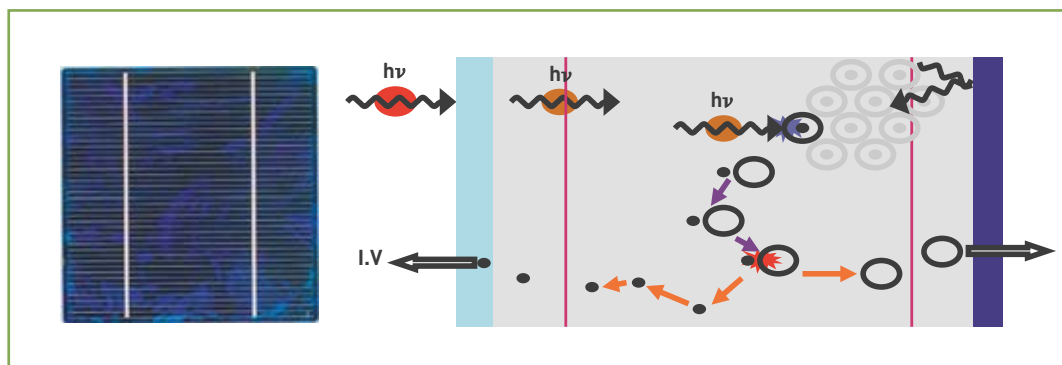
Dans le domaine de la conversion photovoltaïque, l'utilisation du silicium multicristallin prime en raison de son faible prix dû à une production abondante (centaines de kilogrammes) qui s'obtient facilement, par simple refroidissement des creusets de fusion. Au lieu d'un monocristal, on obtient un matériau constitué de plusieurs cristaux complètement jointifs, appelés « grains », à la manière d'un puzzle tridimensionnel. De forme et de taille différentes, ces grains sont séparés par des joints de grains. Lors de la solidification, la germination et la

cristallisation de ces grains sont contrôlées pour obtenir des grains de grande taille et de forme colonnaire. De cette façon, une fois le lingot découpé en plaquettes de quelques centaines de microns, le grain sera continu entre les deux faces de la plaquette – cela minimise le nombre de joints de grains siège, source de pertes électriques.

Le silicium une fois obtenu sous forme d'un barreau cristallin de 10 à 30 cm de diamètre et d'un mètre de long, s'en suit une étape critique, à savoir le sciage des cristaux : le cristal se découpe en tranche (ou plaquettes) pour fabriquer des cellules photovoltaïques. Il s'agit d'une opération très délicate mais néanmoins indispensable pour obtenir des plaquettes extrêmement fines. Dans un souci d'économie de matériau, si une faible épaisseur reste souhaitable, un minimum est néanmoins requis pour garantir la tenue mécanique des plaquettes et ainsi autoriser leur manipulation. Aujourd'hui, cette épaisseur s'établit à 150 microns et sera encore réduite dans les prochaines années.

La réalisation de la cellule implique que le matériau soit **dopé**, généralement par l'introduction d'impuretés telles que le **phosphore** ou le **bore**. Les impuretés dopantes n'ayant pas le même nombre d'électrons que les **atomes** de silicium des cristaux, ces charges excédentaires modifient les propriétés électriques du silicium. Cette étape de dopage permet de contrôler la façon dont le silicium va conduire le courant électrique. Il s'agit d'une opération réalisée par diffusion thermique, soit lors de la cristallisation, soit, *a posteriori*, via un traitement de surface des plaquettes. Elle permet la formation d'une jonction p-n, c'est-à-dire la création d'un champ électrique au sein du matériau semi-conducteur : il devient alors possible de séparer les électrons et les trous créés par l'absorption de la lumière. Ces charges électriques peuvent alors être acheminées vers les contacts électriques situés aux bornes de la plaquette (figure 2). Elles forment ainsi le courant électrique produit par la cellule solaire.

Si le bore et le phosphore restent des impuretés utiles et maîtrisées du point de vue électronique, il n'en va pas de même de nombreux autres éléments – par exemple le fer, le **carbone** ou l'oxygène. En effet,



P. Thony / CEA

Figure 2.

Cellule solaire standard à base de tranche de silicium (à gauche). Principe de fonctionnement d'une cellule solaire au silicium (à droite) avec la face avant en bleu clair, la face arrière en bleu foncé et la structure électrique de jonction pn (ligne violette). Les photons sont illustrés par $h\nu$ [quantité qui représente l'énergie du photon, le produit de la constante de Planck par la fréquence de la lumière qui est une onde]. L'absorption d'un photon est signalée par l'éclat bleu et la séparation des électrons ainsi que des trous par l'éclat rouge. La puissance électrique délivrée (IV) produit le courant tension. Les circonférences représentent un atome ayant absorbé un photon : un électron est alors libéré (point noir). Après absorption du photon, se produit une diffusion des charges électriques vers les électrodes (en bleu) ; l'électron partant à gauche, l'autre est la charge complémentaire appelée « trou », c'est-à-dire une absence d'électron. Les flèches orange montrent la diffusion des charges dans le silicium.



P. Dumas / CEA

Four de diffusion bore et phosphore utilisé pour le dopage (plateforme Restaure-Ines).

certaines éléments et certains défauts cristallins s'avèrent néfastes au transport des charges vers les **électrodes** : ils jouent comme des pièges et des centres de recombinaison. Par surcroît, ces éléments et ces défauts peuvent se combiner entre eux pour former des complexes, stables ou instables, dont les effets sur la photogénération et les recombinaisons des porteurs demeurent mal connus. Il convient donc de définir une qualité de matériau adéquate, suffisamment pure, mais pas trop, car une grande pureté implique un coût élevé – le cas notamment du silicium issu de l'industrie microélectronique. Il s'agit d'une direction des recherches actuelles menées au CEA.

Sous la forme de plaquettes, le silicium reste un matériau sans réel concurrent aujourd'hui pour l'application photovoltaïque. On évoque parfois des alliages avec le **germanium**, le carbone voire l'**étain**, mais cela reste encore du domaine de la recherche amont.

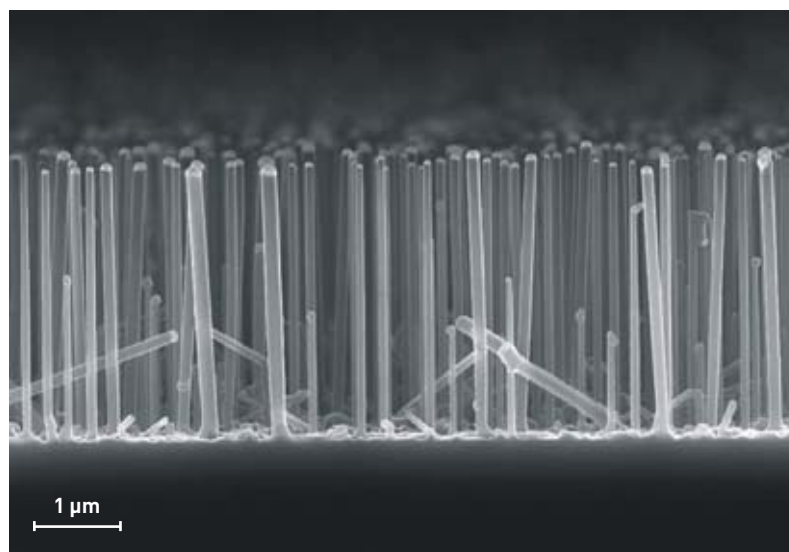
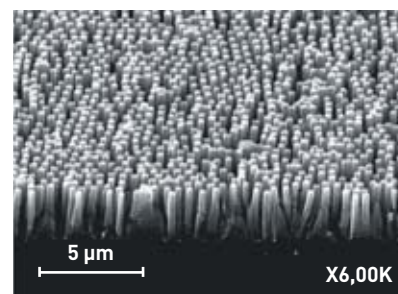
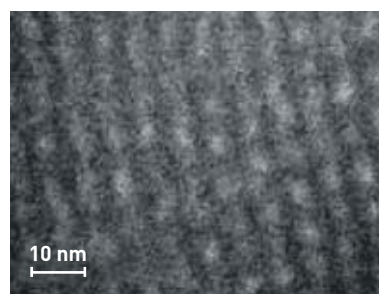
Les matériaux émergents

Matériau de choix, car simple à concevoir et d'un faible coût de fabrication, le silicium en plaquette appelle néanmoins de meilleures performances. Celles-ci passent par une amélioration du « couplage » de la lumière solaire au film de silicium. Le problème du couplage de l'onde optique incidente (la lumière du Soleil) au semi-conducteur a été abordé dès le milieu des années 1990. Mais aujourd'hui, des avancées récentes permettent d'envisager sérieusement un

accroissement des performances à condition de résoudre deux problèmes :

- une partie de la lumière étant réfléchie, elle ne pénètre donc pas dans le matériau – seulement de 10 à 20 % dans les technologies les plus courantes ;
- une fraction importante de la lumière, celle qui pénètre le film de semi-conducteur pour y être absorbée, possède une longueur d'onde mal adaptée au matériau (de l'ordre de 15 à 30 %) ; s'ensuit un manque à gagner dû à la différence entre l'énergie des photons incidents et celle des charges électroniques générées par le silicium.

Pour résoudre ces deux problèmes et augmenter le rendement des cellules solaires actuelles de 20/25 % à 40/60 %, plusieurs équipes appartenant à la Direction des sciences de la matière (DSM) et à la Direction de la recherche technologique (DRT) du CEA travaillent à la fabrication de silicium nanostructuré. Celui-ci se présente notamment sous forme de particules ou de fils nanométriques de silicium (figure 3) dont la forme et la dimension pourraient permettre de piéger la lumière dans la cellule mais aussi d'augmenter le rendement **quantique** de l'absorption. Cela s'explique : des effets, décrits par la théorie de la mécanique quantique, permettent d'adapter le spectre d'absorption (ou plus exactement la largeur de bande interdite du semi-conducteur) au spectre solaire, ce qui a pour conséquence d'augmenter fortement la production d'énergie électrique de la cellule car on ajuste, de ce fait, l'énergie



CEA

Figure 3. Nanocristaux réalisés au **Centre de recherche sur les ions, les matériaux et la photonique (Cimapi)** sous la tutelle du CEA (en haut, à gauche) ; microfils gravés au Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Liten) par voie chimique avec catalyseur (en haut, à droite) ; nanofils cristallins de silicium, réalisés à l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac), longs de quelques microns et d'un diamètre moyen de 100 nm fabriqués par croissance chimique en phase vapeur (en bas).



P.-F. Grosjean / CEA

Salle blanche pour les microsources d'énergie.

Plateforme D2M, machine de dépôt ordonné de micro ou nanoparticules opérant sur des substrats de petite ou grande dimension [de quelques cm² à quelques centaines de cm²].



P. Auvian / CEA

des charges électroniques produites à celle des photons incidents. Dans le cas où on ne le ferait pas, la différence d'énergie entre l'énergie des photons incidents et celle des charges produites dans le silicium serait dissipée (donc perdue) sous forme de chaleur.

Pour diminuer les coûts de matière, les industriels et les laboratoires de recherche proposent des cellules photovoltaïques en couches minces. Ces couches de matériau actif sont déposées sur des substrats bon marché comme le verre à vitre ou des feuilles d'acier, mais aussi sur d'autres substrats plus innovants comme les polymères, le papier, les tissus... Avec des épaisseurs de matériaux d'à peine quelques microns, il devient désormais possible de diminuer la quantité de matière utilisée d'un facteur 100. Cela implique de veiller à ne pas trop réduire la quantité d'énergie électrique produite, car une faible épaisseur

signifie aussi une faible absorption de la lumière solaire. Ce type de cellules de grande surface émerge actuellement sur le marché – on parle de cellules de seconde génération. Leur arrivée risque de faire perdre sa position dominante au silicium dont le coefficient d'absorption le rend mal adapté à cette géométrie. En effet, sous la forme de couches minces déposées sur du verre, celui-ci se présente le plus souvent comme un matériau **amorphe**, dont les performances en termes de **conductivité** électrique s'avèrent également en net retrait. Pour cristalliser des couches minces de silicium et rétablir des propriétés plus intéressantes, il faudra donc mettre en œuvre des procédés à haute température, compatibles avec des spécifications contraignantes en taille de grain et en pureté. Mais cela ne résoudra pas la question de l'interaction avec le substrat en raison de la diffusion de défauts et d'éléments indésirables, depuis le verre, en direction de la couche de matériaux photovoltaïques.

Dans le domaine des couches minces, il existe aujourd'hui une technique permettant d'améliorer la collecte des charges générées dans le matériau photovoltaïque. Elle consiste à opérer des dépôts supplémentaires à base d'**oxydes** transparents conducteurs tels que l'oxyde d'étain et son alliage avec l'oxyde d'**indium** (ITO – pour *Indium Tin Oxyde*) ou encore l'oxyde de zinc (ZnO). Actuellement, de nouveaux candidats (par exemple, les **nanotubes de carbone** et le **graphène**) sont en cours d'évaluation dans les laboratoires. Ces couches supplémentaires s'avèrent particulièrement efficaces pour augmenter les rendements de conversion dans nombre de structures photovoltaïques : les hétérojonctions à base de silicium amorphe et de silicium cristallin ainsi que les cellules organiques.

D'autres matériaux commencent à percer sur le marché avec des coûts très prometteurs, par exemple le tellure de **cadmium** (CdTe), un matériau semi-conducteur composé, de la famille II-VI. Le matériau



C. Dupont / CEA

Les nanotubes de carbones sont disposés en tapis superposés, permettant de nombreuses applications, de l'industrie (écrans plats, membranes PAC) à la Défense.

intrinsèque, en association avec le sulfure de cadmium (CdS), présente déjà un rendement de conversion photovoltaïque supérieur à 10 % en module. Malgré la difficulté d'approvisionnement en tellure (Te) et les risques liés à la manipulation du cadmium (Cd), des modules arrivent aujourd'hui sur le marché. La technologie de dépôt de la structure étant très simple (un procédé continu sur plaques de verre de grande surface), les industriels promettent, à très courte échéance, un coût de production de l'énergie en dessous du seuil symbolique de 1 euro par watt.

De nombreuses « jeunes pousses » se développent aujourd'hui pour proposer un matériau nouveau, le CIGS (pour cuivre, indium, gallium et sélénium). Il s'agit d'un composé à base de cuivre, d'indium et de sélénium (chalcogénure de cuivre) auquel s'ajouterait du gallium pour obtenir une réponse plus élevée au spectre solaire. Néanmoins, maîtriser un alliage quaternaire reste toujours difficile. Aussi, certains industriels développent-ils des procédés variés par voie physique (évaporation) ou chimique (électro-dépôt ou impression avec une encre contenant des nanoparticules). La composition du CIGS, notamment le rapport indium/gallium, ayant un effet direct sur le gap du semi-conducteur, ceci permet d'adapter l'absorption du matériau au spectre solaire et d'envisager des architectures de cellules complexes, mettant en jeu des couches de différentes compositions pour atteindre des rendements de conversion très élevés (au-delà de 20 %).

En dehors des aspects liés au coût de production, les couches minces photovoltaïques présentent d'autres avantages pour les utilisateurs. D'abord, le substrat peut être flexible et la forme de la cellule quelconque, ce qui facilite son intégration à toutes sortes de systèmes et de dispositifs. Ensuite, concevoir des modules photovoltaïques avec des caractéristiques électriques variées pour s'adapter à différentes applications ne présente aucune difficulté majeure.

Des alliages semi-conducteurs pour l'espace

La conversion photovoltaïque offre également une source d'énergie essentielle à de nombreux satellites et objets spatiaux. Dans le champ de l'astrophysique, les matériaux semi-conducteurs de famille III et V ont été adoptés par tous les spécialistes. Les cellules qu'ils utilisent sont réalisées à partir de couches cristallines **épitaxiées**, déposées les unes sur les autres par des méthodes sous vide, de type jet moléculaire ou **dépôt en phase vapeur** à base de précurseurs métalliques. La juxtaposition de plusieurs dizaines de couches aboutit à des dispositifs très performants formés de plusieurs cellules élémentaires empilées les unes sur les autres. Désormais, il devient donc possible de concevoir des empilements en accord de maille, c'est-à-dire où tous les matériaux cristallins déposés ont la même dimension de maille, et cela avec toute une gamme de gap, et donc de maximiser la conversion photovoltaïque sur tout le spectre solaire. Un résultat rendu possible grâce à la grande variété de composition : une base d'arséniure de gallium (AsGa) avec du phosphore d'indium (InP) ou du germanium (Ge). Certains instituts comme le **Fraunhofer** en Allemagne ou **Boeing** aux États-Unis dépassent les 40 % de rendement.

Compte tenu du coût très élevé de ces structures, leur exploitation reste circonscrite au domaine spatial ou à celui de la production d'énergie centralisée. Dans ce cas, les cellules sont découpées en tout petits composants (centimètre ou millimètre) et placées au foyer des grands systèmes optiques concentrant la lumière solaire sur les cellules. De telles installations appellent un support mécanique mobile capable de suivre le Soleil dans sa course journalière.

Matériaux organiques et hybrides

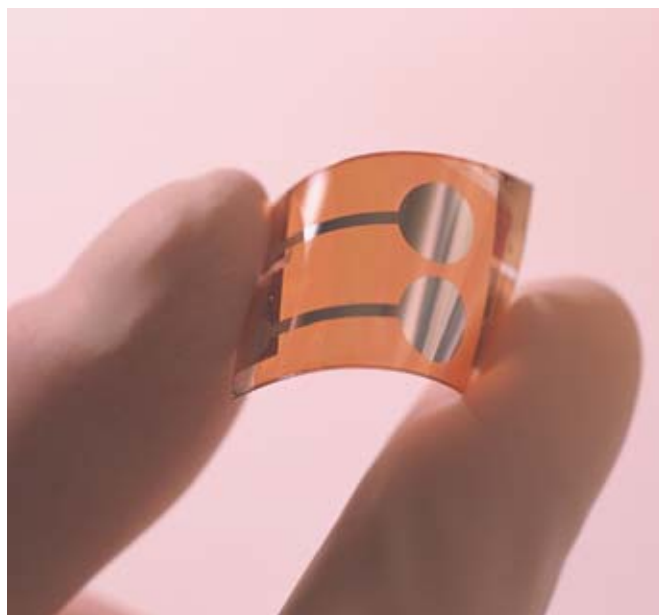
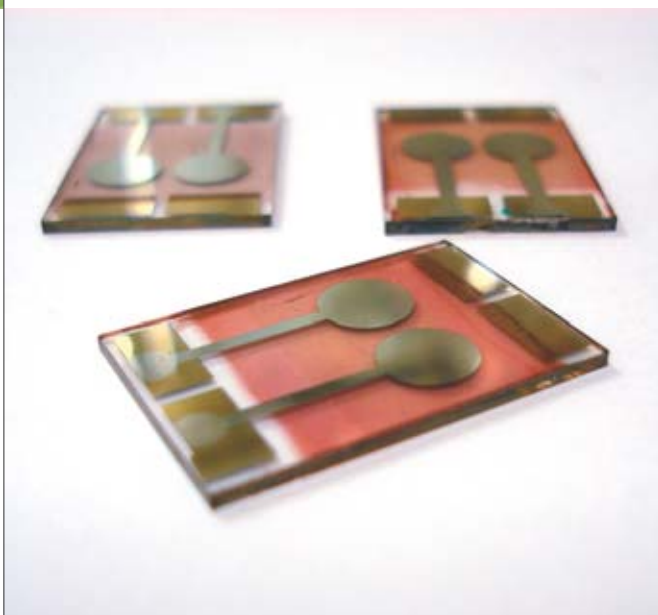
La conversion photovoltaïque à partir de matériaux organiques appartient à un domaine de recherche relativement récent. Les avancées scientifiques majeures n'eurent lieu qu'au début des années 1990, parmi lesquelles la réalisation des premières cellules sensibilisées par des colorants organiques présentant des rendements élevés, ou encore la découverte du transfert de charge photo-induit entre un polymère pi-conjugué et un dérivé fullerène. Ces découvertes initieront une nouvelle filière de production d'énergie.

Les matériaux organiques présentent plusieurs avantages : leurs propriétés optiques et électroniques sont facilement modulables et leur préparation s'avère peu coûteuse du point de vue énergétique. De plus, leur mise en œuvre reste aisée : ils peuvent notamment se déposer par techniques d'impression ou sur des substrats **plastiques**, très légers et flexibles. Enfin, l'épaisseur de leur couche active étant généralement très faible (de l'ordre de la centaine de nanomètres), ces matériaux peuvent imprégner de larges surfaces en n'utilisant que très peu de matière. En revanche, les performances de ces matériaux sont limitées par des mobilités de charges plus faibles que dans les matériaux semi-conducteurs inorganiques et une stabilité inférieure.



Sérigraphie des contacts métalliques d'une cellule photovoltaïque en silicium.

P. Dumas / CEA



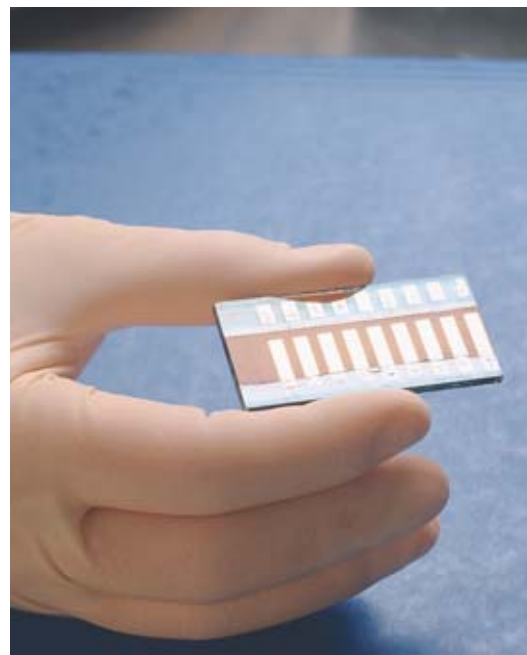
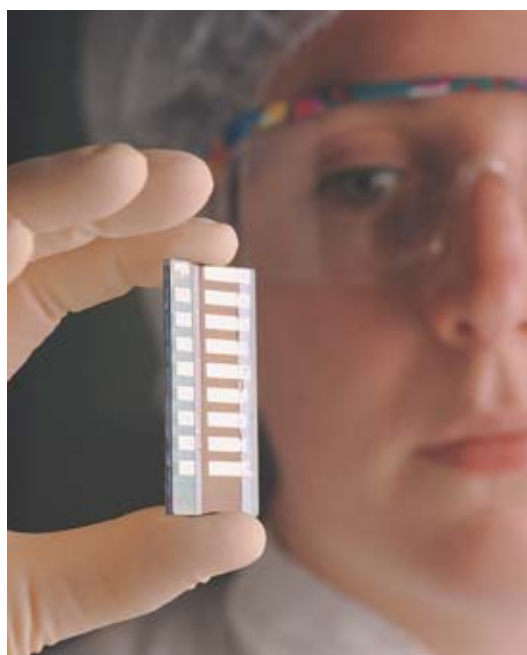
CEA / R. Demadrille (à gauche) et CEA / P. Stroppa (à droite)

Cellules photovoltaïques organiques à base de polymère et de fullerène, fabriquées sur un substrat de verre (à gauche) et sur un substrat souple en plastique (à droite).

Comme dans les cellules dites « classiques », la génération de courant dans les systèmes organiques résulte de la dissociation des **excitons**, créés par absorption de photons par les matériaux, à l'interface entre le matériau de type p (généralement un polymère pi-conjugué) et le matériau de type n (un dérivé fullerène ou un nanocristal de semi-conducteur II-VI dans le cas des structures hybrides). À l'heure actuelle, les meilleurs résultats dans ce domaine (compris entre 6 et 8 %) sont obtenus en employant des matériaux polymères à faible gap, combinés avec un dérivé du fullerène, dans une configuration dite d'hétérojonction volumique. Il s'agit d'une jonction entre un matériau semi-conducteur de type « p » avec un autre matériau semi-conducteur mais de type « n ». L'hétéro-

jonction volumique est donc une jonction déployée de manière tridimensionnelle, les deux matériaux s'interpénétrant fortement.

Dans cette hypothèse, la ségrégation de phase optimale entre les deux matériaux doit être comprise entre 5 et 10 nm. Elle correspond à la longueur de diffusion des excitons dans les milieux organiques. Pour améliorer l'efficacité des systèmes organiques, il s'avère donc primordial de développer des matériaux polymères fortement absorbants. De tels matériaux doivent présenter à la fois des coefficients d'**absorption molaire** élevés et des domaines d'absorption très larges et étendus dans la partie visible du spectre solaire (car les dérivés fullerènes sont généralement peu absorbants). Les niveaux énergétiques du polymère (position des orbitales frontières)



A. Gonin / CEA

Un nouveau type de cellules photovoltaïques est développé grâce à des polymères organiques conducteurs déposés sur des substrats de verre.

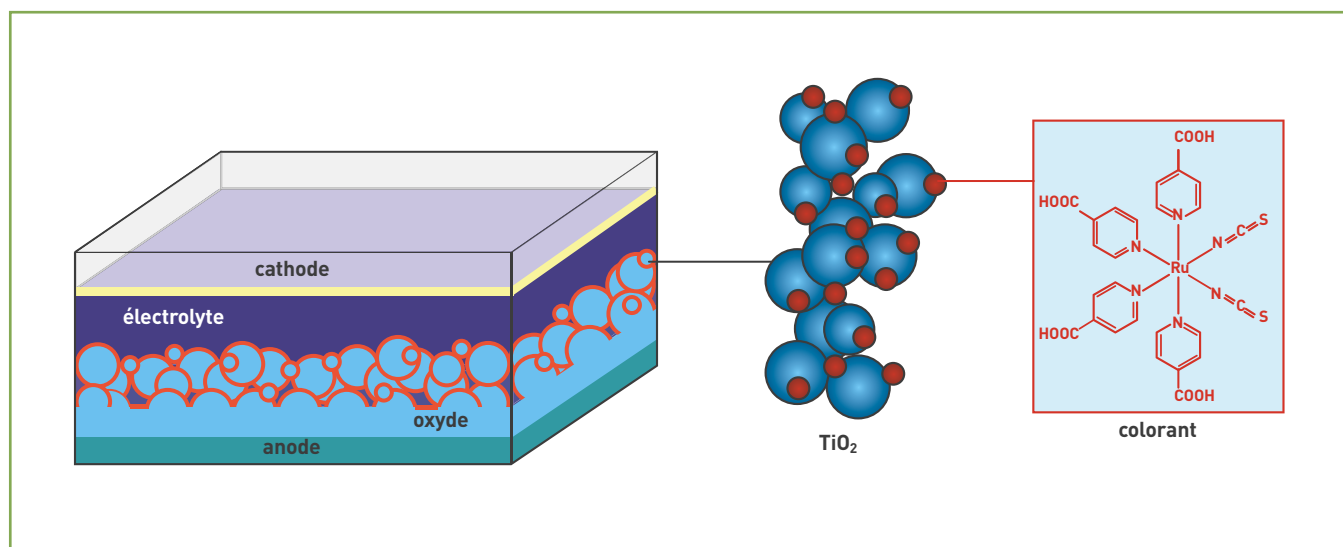


Figure 4.

Principe des cellules de type Graetzel à colorants. Schéma d'une cellule sensibilisée par des colorants (à gauche) : sur l'anode est déposé l'oxyde transparent conducteur (ici de l'oxyde de titane) et la fine couche rouge représente la monocouche de colorant. Nanoparticule d'oxyde de titane (TiO_2) avec des molécules de colorant symbolisées par des boules rouges (au centre). La structure chimique du colorant (à droite), ici un complexe de ruthénium (Ru), possède des ligands avec des acides carboxyliques (COOH) qui permettent à la molécule de s'ancrer sur l'oxyde.

doivent être positionnés précisément par rapport à ceux du composé accepteur, de manière à garantir une dissociation efficace des excitons. Le meilleur moyen d'y parvenir consiste à combiner, au sein des chaînes de polymère, des motifs hétérocycliques aromatiques chimiquement différents. En effet, la chimie organique offre des possibilités quasi infinies de créer de nouveaux matériaux dont les propriétés optiques et électroniques sont adaptables et dépendent des motifs chimiques retenus. Enfin, le polymère devra présenter de bonnes propriétés de transport des charges pour permettre l'acheminement des charges photogénérées (créées après la dissociation des excitons, résultant de l'absorption de photons par les matériaux) jusqu'aux électrodes. Quant aux propriétés de transport, leur amélioration significative passe par une autoorganisation du matériau au sein de la couche active.

Dans le cas des cellules hybrides, où le polymère se trouve mélangé à des nanocristaux de semi-conducteurs, les nanoparticules inorganiques assurent une partie de l'absorption de la couche active. Les spectres d'absorptions de ces matériaux s'adaptent très précisément en jouant sur la taille des particules ou sur leur nature chimique tandis que les propriétés de transport le sont en jouant sur la forme des nanocristaux.

Les matériaux photovoltaïques à base de colorants

Les colorants organiques sont utilisés dans une autre classe de cellules, appelée *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSC) ou cellules de Grätzel (figure 4), du nom de leur inventeur⁽²⁾. Les DSSC se fabriquent à partir d'un matériau semi-conducteur massif et nanostructuré. Généralement, il s'agit d'un oxyde de titane transparent destiné à l'acheminement des électrons photo-

générés vers l'électrode, dont la surface a été greffée par des colorants organiques ou organo-métalliques photosensibles. Un électrolyte, emprisonné entre deux électrodes transparentes, complète le système.

Ce type de cellule s'utilise dans la fabrication de panneaux semi-transparents dont la couleur varie avec le choix du colorant. La séparation des charges photo-générées dans le colorant intervient à l'interface entre le colorant, le semi-conducteur et l'électrolyte. Avec des rendements se situant entre 11 et 12 %, les colorants les plus efficaces appartiennent à la catégorie des complexes organo-métalliques contenant du ruthénium, et dont les ligands possèdent des fonctions d'ancrage pour former une monocouche sur la surface de l'oxyde. Mais plus récemment, les chercheurs ont développé des molécules purement organiques conduisant à des efficacités de conversion comprises entre 8 et 10 %. Ces colorants comportent à la fois des groupes chimiques fonctionnels tels que des acides carboxyliques qui servent de fonction d'ancrage, et aussi des motifs aromatiques pi-conjugués permettant d'absorber les photons émis dans la partie des rayonnements ultraviolets et la partie visible du spectre solaire.

La conversion d'énergie photovoltaïque demeure un thème de toute première importance pour les années à venir. Le CEA met tout en œuvre pour avoir le regard le plus exhaustif possible sur les nouveaux matériaux.

> Philippe Thony

Institut national de l'énergie solaire (Ines)
Direction de la recherche technologique
Le Bourget-du-Lac (rattaché au
CEA Centre de Grenoble)

> Renaud Demadrille et Emmanuel Hadji

Institut nanoscience et cryogénie (Inac)
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Grenoble

(2) Michael Grätzel (né en 1944), professeur de chimie à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, inventeur des cellules à colorants pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ces cellules utilisent un système photoélectrochimique inspiré de la photosynthèse végétale.