

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire



Parc solaire de 10 MWc installé à Pocking (Allemagne) capable d'alimenter 3 300 maisons en électricité.

© www.martin-bucher.de, Stuttgart/Germany

DANIEL LINCOT
Directeur de recherches au CNRS

La Terre baigne dans l'énergie solaire, une énergie évidente, tellement évidente qu'on l'oublie souvent. Pourtant avec $1,56 \cdot 10^{18}$ kWh/an, l'énergie solaire incidente représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale d'énergie (environ $1,1 \cdot 10^{14}$ kWh). Il s'agit donc d'une énergie abondante, renouvelable, qui pourrait parfaitement couvrir la totalité ou une grande part de nos besoins énergétiques futurs, comme elle l'a fait durant des milliers d'années. Dans le contexte actuel de prise de conscience généralisée des incertitudes énergétiques et de la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique, un recours massif à l'énergie solaire sous toutes ses formes, directes (photovoltaïque, thermique) ou indirectes (éolien, biomasse) doit s'imposer comme une priorité, une évidence.

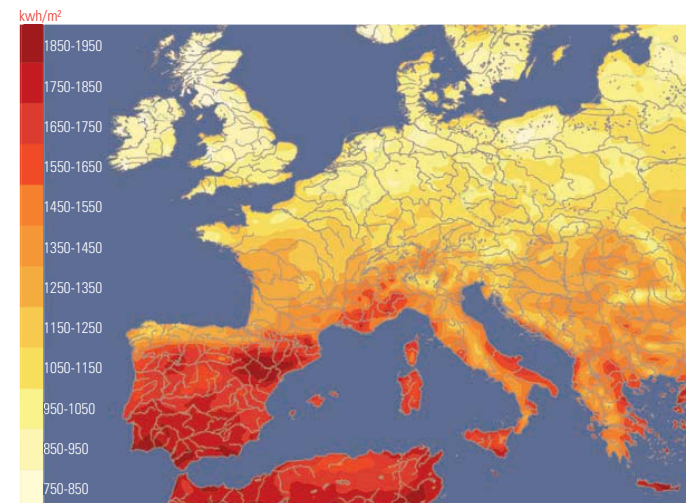


FIGURE 1
Irradiance solaire moyenne annuelle.
Database Meteonorm (www.meteonorm.com) © Meteotest (Bern, Suisse).

Énergie solaire et modules photovoltaïques

Même si l'énergie solaire est maintenant de mieux en mieux reconnue dans de nombreux pays et auprès de l'opinion publique, cette reconnaissance n'a pas été facile et a dû (et doit toujours) faire face à de nombreuses oppositions sur des bases parfois étonnamment réductrices. On reproche par exemple à l'énergie solaire, et à ses modes d'exploitation directe en électricité en particulier, d'être intermittente (jour, nuit, saisons), diffuse et non concentrée, en oubliant que toute notre alimentation, que le pétrole lui-même, sont basés sur ce mode de production énergétique. C'est comme si nous mettions sur le même plan, société de consommation oblige, le fait de se servir dans un réfrigérateur alimenté automatiquement et celui de produire les aliments eux-mêmes. La question du caractère non concentré de cette énergie est aussi mise en avant, une centrale électrique de plusieurs

centaines de MW n'occupant que quelques km² au sol. Pour autant faut-il, comme je l'ai vu, la comparer avec une bande de 100 mètres de large, le long des plages françaises et tenter de démontrer ainsi l'impossibilité du recours massif à cette énergie ! On peut très bien imaginer de mettre cette bande un peu plus loin de la plage et pourquoi pas de la répartir où cela ne gêne pas ! Là encore c'est un peu comme si on refusait de manger du pain sous prétexte qu'il a fallu des centaines de mètres carrés pour le produire.

Il est utile d'étayer cette démonstration sur la base de données concrètes. Dans le cas de la France, la quantité d'énergie reçue en moyenne par an et par mètre carré varie entre 1,2 MWh et 1,5 MWh (la puissance lumineuse incidente de référence en plein midi face au Soleil est de 1 kW/m²). Cette valeur varie suivant la localisation géographique comme le montre, pour l'Europe la carte ci-après (fig. 1). Elle atteint 2,7 MWh dans le Sahara.

Si on considère une option tout à fait raisonnable de modules photovoltaïques de 10 % de rendement électrique, l'énergie produite sera d'environ 130 kWh/an/m². Pour atteindre la production électrique française d'environ 550 TWh/an (1 Tera = 10¹²) il faudrait donc couvrir environ 5 000 km² de surface. Cela peut paraître beaucoup, mais sait-on que la surface bâtie en France représentait 10 700 km² en 1997, et que les infrastructures routières près de 16 300 km² et donc que l'équipement d'une fraction de cette surface pourrait produire massivement de l'énergie solaire photovoltaïque contrairement aux idées reçues.

Ces analyses trouvent leur prolongement dans les programmes ambitieux de « toits photovoltaïques » en Allemagne ou au Japon, développés avec succès depuis plusieurs années. Aux États-Unis aussi, les choses évoluent avec par exemple la nouvelle loi en

Californie, adoptée l'été dernier, autour de l'objectif « un million de toits solaires ». La puissance normalisée d'un module photovoltaïque s'exprime en Watt crête (noté Wc) et correspond à la puissance électrique qu'il délivre sous un éclairement solaire normalisé de 1 kW/m², correspondant à l'énergie reçue en plein midi face au Soleil par temps clair sous la latitude de l'Espagne. À côté des équipements des toitures, l'installation de centrales photovoltaïques ayant des puissances allant de la centaine de kWc à quelques MWc se développe rapidement (fig. 2).

La question du coût élevé de l'électricité photovoltaïque est aussi souvent avancée, à juste titre, comme un frein. Cependant ce coût, aujourd'hui à environ trois euros par Wc, baisse régulièrement avec l'objectif de passer dans quelques années sous la barre symbolique de un euro par Wc. Les effets d'échelle et l'amélioration des technologies

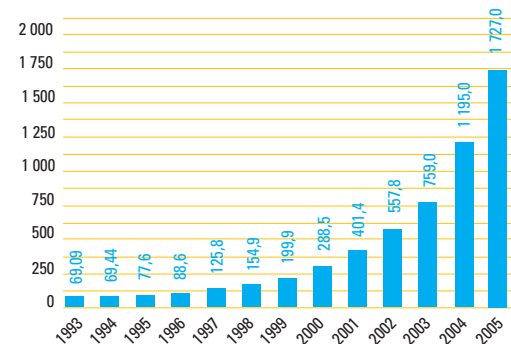
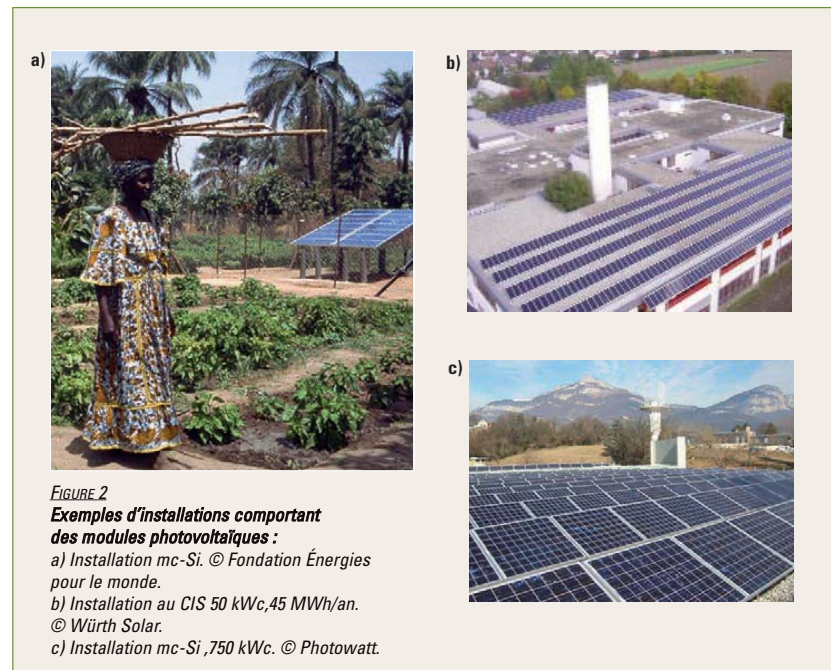


FIGURE 3
Évolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques (en MWc).
 Source : EurObserv'ER, PV News, mars 2006.

sont à la base de ces progrès constants. Dans ces conditions, la compétitivité de l'énergie photovoltaïque, qui pointe déjà dans des pays tels que le Japon où l'électricité est chère, est un objectif réalisable dans les prochaines années, en particulier dans un contexte d'augmentation des cours du pétrole. L'accélération de ce processus fait l'objet de politiques volontaristes de nombreux États, accordant à la production d'électricité photovoltaïque, fournie au réseau électrique, des coûts de rachat incitatifs. La France, qui revient de loin, vient récemment, avec la loi de juillet 2006, de rejoindre le peloton de tête avec l'Allemagne, le Japon et l'Espagne, permettant un coût de rachat à 0,55 euros du kWh.

Ainsi, l'énergie photovoltaïque apparaît, contrairement aux idées reçues, comme une source d'énergie renouvelable *incontournable* et apte à couvrir dans l'avenir une proportion significative et croissante des besoins énergétiques, aux côtés d'autres sources d'énergie. L'évolution de la production annuelle de modules photovoltaïques (fig. 3) connaît une croissance exceptionnelle avec un taux de croissance de 30 à 40 % par an depuis plusieurs années, avec en 2005 une production d'environ 1 800 MWc.

C'est donc un domaine industriel en plein développement, créateur de milliers d'emplois, qui faisait titrer à un magazine en 2003

« Énergie photovoltaïque : une industrie est née ». Cependant cette progression spectaculaire ne doit pas faire oublier que cette puissance, de l'ordre de celle d'une tranche de centrale nucléaire, reste négligeable dans le paysage énergétique et par rapport aux besoins. Une projection des évolutions comparées au niveau mondial de l'énergie consommée et de l'énergie photovoltaïque (fig. 4), montre que cette dernière pourrait atteindre 10 à 20 % en 2050 (auxquels il faut ajouter les autres énergies renouvelables). Il faut donc poursuivre et même amplifier cette progression. C'est un vrai défi à la fois vital et passionnant.

Dans la suite de cet article, nous verrons plus en détail l'origine de l'effet photovoltaïque, l'état de l'art des technologies et des acteurs, puis nous ouvrirons une fenêtre « découverte » avec les perspectives fascinantes en matière de recherche et de développement de cette source d'énergie.

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire : comment ça marche ? Où en est on ?

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2 micron) à l'infrarouge loin-

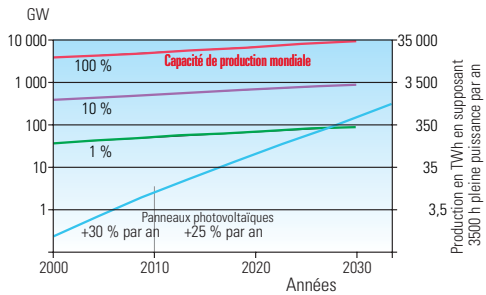


FIGURE 4
Prospective d'évolutions comparées des capacités de production d'énergie totale et d'origine photovoltaïque. D'après W. Hoffmann, Solar Energy and Solar Cells, 2006. Avec l'aimable autorisation d'Elsevier.

tain (2,5 microns), avec une majorité dans le visible (0,3 micron –violet– à 0,8 micron –rouge–) autour d'un pic à 0,45 micron. L'énergie totale portée par ce rayonnement est de près de 1 360 W/m² dans l'espace, au voisinage de la Terre, et de 1 000 W/m² au niveau de la Terre, du fait de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons, l'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = hc / \lambda,$$

où h est la constante de Max Planck (1858-1947), c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein (1879-1955) le prix Nobel en 1905.

Une façon commode d'exprimer cette énergie est justement son analogue électrique :

$$E = 1,26 / \lambda,$$

où si λ est exprimé en micron, E s'exprime alors en électronvolt (noté eV) : 1eV est donc l'énergie d'un électron sous un potentiel d'un volt. La conversion photovoltaïque est justement la transformation de l'énergie du photon en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière.

Lorsqu'un photon est absorbé, il éjecte un électron d'un niveau d'énergie inférieur, vers un niveau d'énergie plus élevé, créant ainsi une paire électron-trou, de même énergie électrique (fig. 5). Généralement cette paire électron-trou revient à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique... le matériau chauffe au soleil.

Récupérer toute ou partie de cette énergie sous forme électrique est justement l'objectif de la conversion photovoltaïque, comment faire ? Tout simplement en séparant les paires « électron-trou » créées et en les forçant à passer dans un circuit extérieur. Cela a été rendu possible grâce au fait que les électrons et les trous ont des charges de signes opposés (-q ; +q) et donc que si elles sont soumises à un champ électrique, les forces qui s'exerceront seront de sens opposé et devraient permettre la séparation (fig. 5). La clé de l'effet photovoltaïque, est là ! Et cela marche, grâce aux cellules solaires faites en associant un semi-conducteur de type n et un semi-conducteur de type p, comme le silicium dopé phosphore et le silicium dopé bore (fig. 6). Les niveaux d'énergie impliqués pour l'absorption des photons sont le niveau du haut de la bande de valence et le niveau du bas de la bande de conduction. Ils sont séparés par la bande d'énergie interdite E_g , caractéristique du matériau semi-conducteur, seuls les photons d'énergie supérieure à E_g sont absorbés. Un champ électrique très fort est créé à l'in-

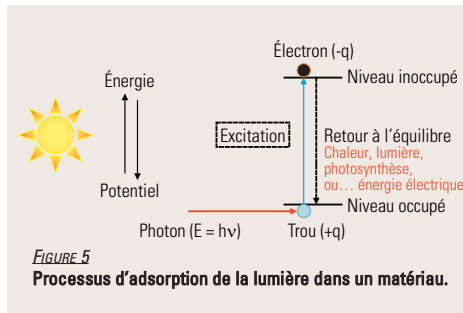


FIGURE 5
Processus d'adsorption de la lumière dans un matériau.

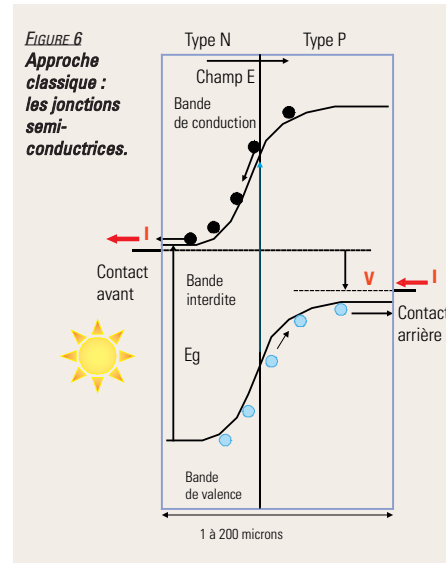


FIGURE 6
Approche classique : les jonctions semi-conductrices.

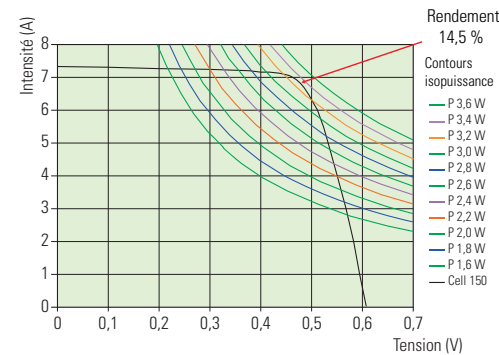


FIGURE 7
Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire commerciale au silicium polycristallin (15 cm x 15 cm de 0,2 mm d'épaisseur) sous éclairage solaire normalisé 1 000 W/m². © Photowatt International S.A.

terface entre ces deux zones, qui permet de générer un courant électrique dans le circuit extérieur (le photo-courant) sous une tension non nulle, dont la puissance est simplement $P = UI$! On obtient alors une cellule solaire qui possède une caractéristique courant-tension (fig. 7). La puissance maximale est obtenue pour un point particulier de la caractéristique, appelé *point de fonctionnement*. Le rapport de cette puissance sur la puissance lumineuse incidente définit le rendement de la cellule.

La figure 8 montre des cellules au silicium à différents stades de leur fabrication. Il s'agit d'une plaquette, constituée de silicium, découpée à partir de lingots de grande taille. La face exposée au Soleil, qui apparaît bleutée, est de type n tandis que le volume est de type p. Les photons incidents sont donc absorbés sur toute la surface de la plaque. Pour cela une certaine épaisseur est nécessaire, d'autant plus faible que le coefficient d'absorption est grand. Pour le silicium il faut environ une centaine de microns. Il génère un flux d'électrons à la surface qui est collecté par une grille conductrice déposée sur la surface et constitue donc le contact avant. À l'arrière, un contact doit aussi être réalisé, qui consiste en une couche conductrice déposée sur toute la surface. La surface couverte par la grille avant, qui absorbe les photons, doit être minimale tout en assurant une bonne collecte. On prend ensuite les contacts sur la grille avant et la cellule est prête à fonctionner en se branchant sur les contacts. Cependant une cellule délivre seulement une puissance de quelques W sous une tension d'environ 0,6 V. Pour obtenir un générateur plus puissant, on connecte les cellules en série, pour augmenter la tension, et en parallèle pour augmenter le courant. L'ensemble réalisé, après encapsulation, est appelé alors *module photovoltaïque*, dont les dimensions peuvent être de l'ordre du mètre carré actuellement. Les puissances des modules peuvent aller

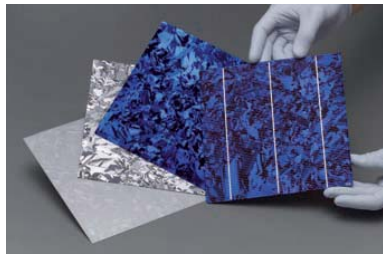


FIGURE 8
Cellule photovoltaïque silicium 20 cm x 20 cm.
 Rendement de conversion 14,75 %
 De gauche à droite : plaque Si après découpe, après texturation, après formation de la jonction et dépôt du traitement anti-réfléchissant et cellule finie.
 © CEA, plate-forme RESTAURE cofinancée par l'ADEME.

jusqu'à 200 Wc. Ces modules sont ensuite associés entre eux pour former un champ de modules, constituant une installation photovoltaïque. Les plus grosses installations peuvent atteindre aujourd'hui plusieurs MWh. L'énergie électrique distribuée est en continu ; elle peut être transformée en mode alternatif grâce à des onduleurs, et soit utilisée directement, soit injectée sur le réseau, cette dernière option étant largement majoritaire.

Les différentes filières photovoltaïques

La figure 9 montre les structures de base des principales filières photovoltaïques actuelles, excepté les cellules organiques sur lesquelles nous reviendrons.

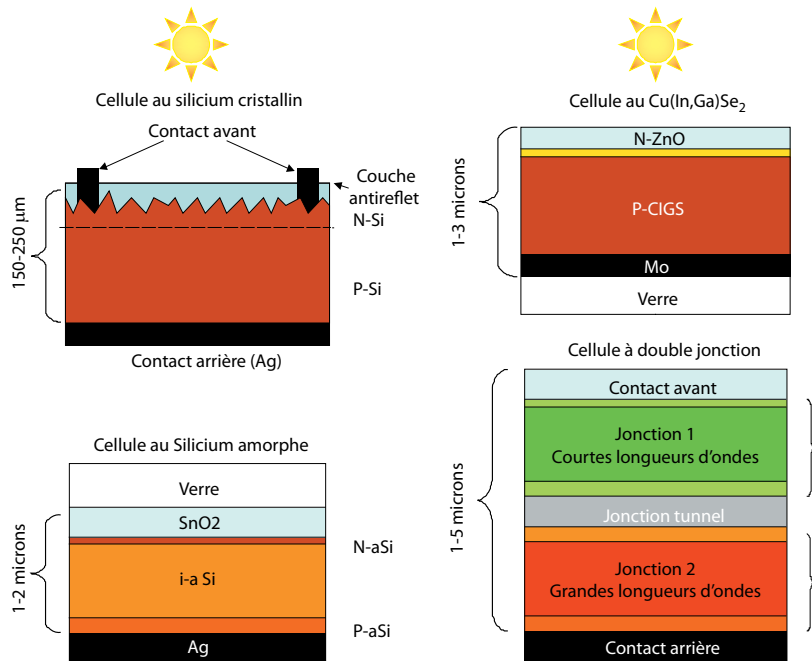


FIGURE 9
Structure de base des principales filières photovoltaïques actuelles.

La figure 10 montre l'évolution des rendements record des principales filières photovoltaïques actuelles. On y trouve les cellules au silicium monocristallin et polycristallin, les cellules au silicium amorphe, les cellules au diséléniure de cuivre et d'indium (CIS), au tellurure de cadmium (CdTe), mais aussi les cellules à base de composés appelés III-V (par référence à la classification périodique) du type GaAs et InP, qui appartiennent à la catégorie des cellules à multijonctions. À côté de ces filières bien établies, sont apparues de nouvelles filières, basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, qui n'en sont donc qu'à leurs balbutiements. Les filières Si, CIS et CdTe sont actuellement les seules utilisées de façon importante.

Les filières silicium

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu comment à partir du processus élémentaire d'absorption d'un photon, on pouvait créer des paires électron-trou dans des cellules, puis les connecter pour faire des modules. Nous avons pris pour exemple les cellules au sili-

cium (Si) qui sont à la base actuellement de près de 98 % de la production photovoltaïque. Les cellules peuvent être faites à partir de plaquettes de silicium cristallisé (c-Si) dans deux catégories distinctes, le silicium monocristallin (mc-Si) et le silicium polycristallin (pc-Si), dont le gap est de 1 eV. Le silicium monocristallin est plus cher que le polycristallin mais permet des rendements plus élevés, avec près de 24,5 % contre 19 % de rendement record sur les cellules de laboratoire. Ces deux filières dominent actuellement largement le marché (91 %), avec des modules commerciaux présentant des rendements de 12 % à 14 % pour le polycristallin (majoritaire) et 15 % à 16 % pour le monocristallin (avec cependant des rendements de près de 20 % obtenus récemment). Afin de réduire les coûts, se développent des technologies de production ne passant pas par une étape de découpe des plaquettes, qui consomme de la matière et de l'énergie, mais qui utilisent directement le tirage de rubans à partir de bains fondus. Celles-ci sont encore cependant très en retrait par rapport aux tech-

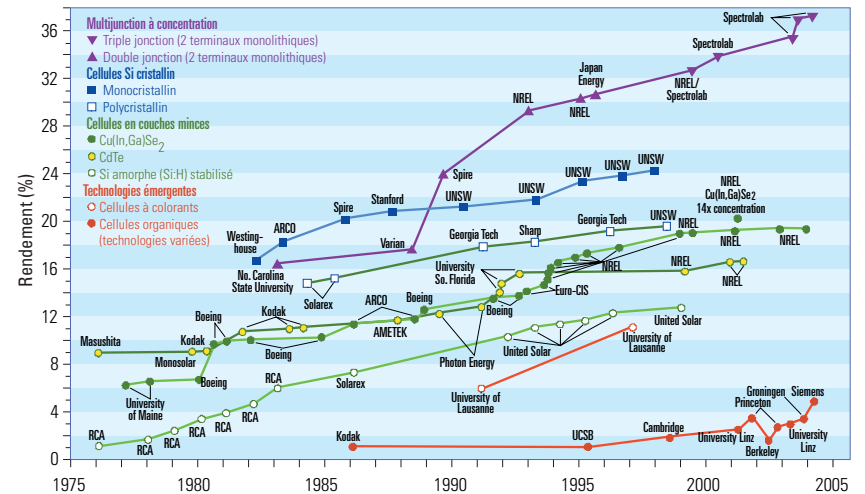


FIGURE 10
Rendements photovoltaïques record. Source NREL, www.nrel.gov.



FIGURE 11
Ligne industrielle de production de cellules au silicium à Q.Cells. Source Q.Cells (Allemagne).

Une autre forme structurale du silicium peut exister, le silicium amorphe, noté a-Si, qui possède un coefficient d'absorption beaucoup plus élevé dans le visible (d'un facteur d'environ 100) que le silicium cristallin, du fait de processus d'absorption des photons plus efficaces, dits directs. Cela permet d'envisager la fabrication de cellules à l'aide de couches minces, de l'ordre du micron d'épaisseur, qui permet de réduire significativement les coûts de production (fig. 9). De plus, le a-Si peut être déposé directement à basse température par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma, par décomposition du silane (SiH_4). Sur un substrat de verre de verre, on dépose d'abord une couche d'oxyde transparent conducteur (0,5 micron), puis une couche de a-Si de type *n*, une couche de a-Si semi-isolante, dite intrinsèque (au total 1 micron), et enfin une couche métallique arrière à base d'argent (l'éclairage étant réalisé à travers le support de verre). Ces caractéristiques, permettant d'abaisser significativement les coûts de production, sont à la base de la filière au silicium amorphe. Malgré des rendements des modules plus faibles que le silicium cristallin (6 % à 7 %) cette filière tend à se développer dans un contexte de forte demande, et se positionne après les filières au silicium cristallin (4 %).

La découverte récente d'autres formes structurales de silicium entre l'amorphe et le cristallin (polymorphe, microcristallin) et susceptibles d'améliorer les rendements des modules autour de 10 %, constitue une nouvelle base de développement d'une nouvelle filière couche minces appelée silicium on glass.

Les filières non silicium : CIS et CdTe

Les recherches se sont aussi portées vers d'autres matériaux que le silicium, mieux adaptés à une utilisation en couches minces tout en délivrant de hauts rendements.

nologies classiques (2,9 %). Ces dernières connaissent un essor considérable, avec le montage de lignes de production automatisées (fig. 11), qui atteindront 400 MWc par an, au lieu de 20 à 30 MWc il y a quelques années seulement. Des lignes pouvant aller jusqu'au GWc sont prévues, notamment en Chine, où le photovoltaïque connaît un essor très important.

Il est intéressant de noter que l'industrie photovoltaïque, qui utilisait comme source de silicium les rejets de l'industrie électronique, doit maintenant faire face à une pénurie croissante du fait de l'accroissement de la demande. Cette situation entraîne une mutation industrielle avec la mise en place progressive de filières spécifiques de production de silicium photovoltaïque, marquant une nouvelle phase de développement.

L'évolution de cette filière est donc spectaculaire. Elle associe la croissance industrielle à une innovation permanente en matière de méthodes de fabrication afin d'augmenter les rendements et diminuer les coûts.

(1) Dans le cas du CdTe, avec $E_g = 1,5 \text{ eV}$; dans le cas du CIS, gap modulable entre 1 eV et 1,75 eV.

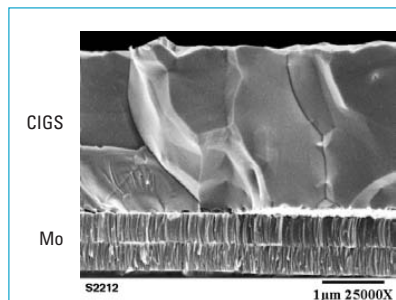


FIGURE 12
Vue, à l'aide d'un microscope électronique à balayage, des couches CIGS conduisant à des rendements de 19,5 %. Avec l'aimable autorisation du Dr Kannan Ramanathan (NREL).

Deux filières se sont imposées progressivement, l'une basée sur le tellure de cadmium (noté CdTe), et sur les alliages $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$, (cuivre indium/gallium sélénium noté CIGS) appelée filière CIS. Des rendements records de 16,5 % pour CdTe et de près de 20 % pour CIS (19,5 %) ont été obtenus (fig.12).

Les cellules au CIS sont constituées d'un empilement d'une couche métallique de molybdène, de 0,5 micron d'épaisseur, déposée sur du verre de verre. Elle sert de contact arrière.

Puis est déposée une couche CIGS de type *p*, d'environ 1,5 micron, qui absorbe la lumière. Suit une mince couche de CdS ou de ZnS (de plus en plus) d'environ 50 nm, et enfin une couche de ZnO de type *n*, d'environ 1 micron d'épaisseur, servant aussi de contact avant conducteur et transparent. Contrairement aux cellules a-Si, l'éclairage est fait par le dessus. Dans le cas du CdTe, une couche de CdS de type *n* est déposée sur du verre/ SnO_2 , puis une couche de CdTe de type *p*, d'environ 2 microns, et d'une couche conductrice de carbone qui sert de deuxième contact.

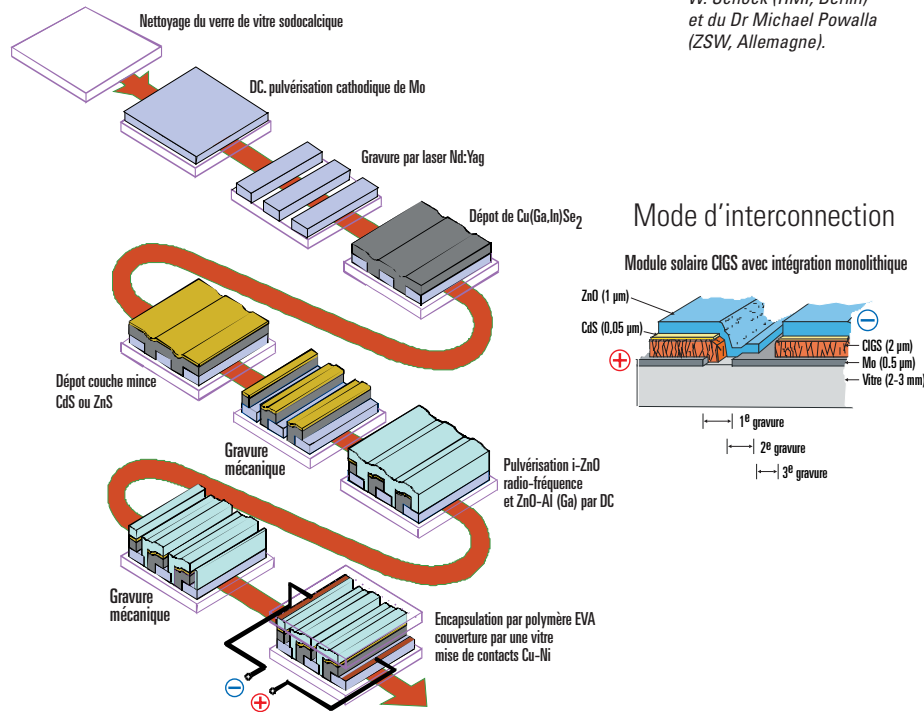
Ces résultats, tout à fait remarquables, compte tenu de l'utilisation de couches minces déposées sur verre comme pour le silicium amorphe, associées au fait de la possibilité de fabrications de modules de grandes surfaces, ont conduit à l'émergence de ces deux nouvelles filières (environ 2 %). Les modules au CIS, présentant des rendements de 11 % à 13 % (les rendements sont un peu plus faibles pour CdTe avec environ 8 % à 9 %) se positionnent au delà des modules au silicium amorphe et sont comparables, pour le CIS, aux modules au silicium polycristallin.

Bien que bien moins développées que les filières au silicium, celles-ci montent néanmoins en puissance, l'émergence de la filière industrielle CIS étant plus récente. Elles s'appuient sur des ruptures potentielles en termes



FIGURE 13
Élaboration de cellules au CIS par électrolyse, Chatou, France. Institut de recherche et de développement sur l'énergie photovoltaïque. (CNRS-EDF-ENSCP) – Photothèque EDF-© J.-P. Muller AFP.

FIGURE 14
Séquence de fabrication
d'un module au CIS.
 Avec l'aimable
 autorisation du Dr Hans
 W. Schock (HMI, Berlin)
 et du Dr Michael Powalla
 (ZSW, Allemagne).



de coût de production. Des unités de production allant de 15 MWc/an à 100 MWc/an sont actuellement mises en opération au Japon et en Allemagne qui devraient permettre le développement de cette production. Notons que la filière CIS est étudiée en France, au sein de l'IRDEP sur la base d'une technologie de production du CIS basée sur l'électrolyse (fig. 13), au lieu des technologies classiques de dépôt à partir de procédés sous vide, qui permettra un nouveau levier pour abaisser le coût de production. Dans le même esprit, une société américaine annonce la mise en place

d'une filière basée sur la sérigraphie, avec des projets de plusieurs centaines de MW. Ces méthodes, particulièrement bien adaptées aux grandes surfaces sont rendues possibles grâce à la tolérance exceptionnelle du CIS aux défauts structuraux et chimiques, contrairement au silicium. De nombreuses recherches visent à comprendre l'origine des propriétés de ces matériaux et à les optimiser.

La séquence de fabrication des modules en couches minces a-Si, CdTe et CIS diffère complètement de celle des modules classiques au silicium. Elle est basée sur le principe de

l'interconnexion monolithique où les cellules sont des bandes étroites isolées par gravure, et connectées en série entre elles par dépôt sélectif des contacts avant (fig. 14, cas du CIS).

Les cellules solaires sur supports souples, une technologie qui se développe

Bien que la majeure partie de la production de cellules solaires soit faite sur des substrats de verre, commence à se développer une filière complémentaire, utilisant des supports souples très minces, soit métalliques (quelques dizaines de microns suffisent), soit plastiques. L'avantage de ces supports est leur poids, plus faible que pour le verre, leur souplesse d'utilisation, de mise en œuvre et de transport. Des cellules Si et CIS utilisent déjà cette technologie. Cependant ces substrats entraînent des contraintes supplémentaires (températures limitées, déformations) qui doivent être surmontés. Un avantage majeur réside également dans leur coût, potentiellement très faible, qui en font des supports de choix pour le futur.

Les acteurs du photovoltaïque

Les acteurs industriels du photovoltaïques sont d'abord Japonais et Allemands en cohérence avec les choix stratégiques faits par ces pays de s'engager dans le domaine photovoltaïque (fig. 15). Les Espagnols sont présents, les Chinois montent en puissance. Les Américains sont en retrait, mais la situation pourrait changer rapidement car les entreprises commencent à s'y mettre. La France est encore en retrait, avec une seule entreprise apparaissant dans les classements, mais la situation évolue rapidement. Des projets importants (industrie & recherche) se développent dans le domaine autour du CEA, du CNRS et d'industriels (EDF, Total, Saint-Gobain) avec le soutien de l'ANR (Agence nationale de la recherche), de l'ADEME et des régions. Des

instituts ont été créés comme l'Institut national de l'énergie solaire (INES associant CEA-CNRS-région), l'IRDEP associant EDF, CNRS et ENSCP, des plates-formes dédiées comme celle de l'Institut national d'électronique du solide et des systèmes (INESS avec le CNRS, l'université, la région) à Strasbourg. De nombreuses équipes universitaires sont aussi associées créant un réseau très riche.

Le développement du photovoltaïque est donc pris en charge par des acteurs majeurs au niveau de la scène industrielle mondiale, avec de grandes entreprises généralistes mais aussi de nouveaux venus spécialisés qui peuvent trouver leur place compte tenu de la jeunesse du domaine et de la place de l'innovation (fig. 15). Il bénéficie aussi du soutien motivé de centaines d'équipes de recherches académiques.

Les perspectives

Les perspectives ouvertes par la conversion photovoltaïque sont très importantes et variées. C'est un domaine en pleine ébullition tant au niveau industriel qu'au niveau de la recherche, tout d'abord autour de la filière principale au silicium, mais aussi dans la filière des couches minces non silicium, puis dans de nouvelles filières exploitant des concepts ou matériaux nouveaux et enfin dans l'émergence d'une recherche sur les très hauts rendements.

Concernant le silicium, les entreprises en développement sont méconnaissables d'une année sur l'autre, avec de nouveaux équipements, de nouveaux procédés, de nouveaux locaux et personnels afin de faire face à l'augmentation de la production (43 % l'année dernière). L'automatisation, l'optimisation des procédés cellules, la mise en place de nouveaux procédés de purification, de tirage occupent une place importante dans la filière silicium cristallin. Beaucoup reste à faire en matière de recherche et développement, en particulier dans le domaine des rubans, des

billes pour c-Si, des couches minces pour a-Si et microSi, les multijonctions (fig. 9). Dans le domaine des couches minces à base de CIS les laboratoires de recherche sont mobilisés sur les études visant à comprendre et optimiser les matériaux, les dispositifs (rendements supérieurs à 20 %, multijonctions), mettre au point de nouveaux procédés. Une voie de recherche à plus long terme vise à réduire l'utilisation de l'indium dans le CIGS en le remplaçant progressivement par des éléments plus abondants par exemple l'association zinc /étain. Cependant, une ère nouvelle semble se dessiner pour le photovoltaïque, marquée par la volonté des chercheurs de découvrir de nouveaux systèmes encore moins chers, en jouant sur le coût des matériaux ou en repousser les limites en termes de rendements.

La figure 16 illustre bien la stratégie globale des recherches sur le photovoltaïque, elle fait apparaître les différentes options et les perspectives à moyen et long terme. Ceux-ci résulteront à la fois d'un abaissement des coûts et d'une augmentation du rendement, indiqués par les flèches pour les différentes filières.

Un saut technologique potentiel en matière de coûts : vers des cellules solaires organiques ?

Alors que l'on utilise de plus en plus des matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec les perspectives d'électronique organique voire moléculaire, l'éclairage à l'aide diodes électro-

Les seize producteurs de cellules qui fournissent 84 % du marché (MWc)				
16 premiers	2004	2005	Croissance	Pourcentage
Sharp (Japon)	324,0	428,0	32 %	23,7
Q cells (Allemagne)	75,0	165,7	121 %	9,2
Kyocera (Japon)	105,0	142,0	35 %	7,9
Sanyo (Japon)	75,0	125,0	67 %	6,9
Mitsubishi El (Japon)	65,0	100,0	54 %	5,5
Schott Solar (Allemagne)	78,3	95,0	21 %	5,3
BP Solar	66,1	86,0	30 %	4,8
Suntech Power (Chine)	35,0	82,0	134 %	4,5
Motech (Taiwan)	35,0	60,0	71 %	3,3
Shell Solar	72,0	59,0	-18 %	3,3
Isotefon (Espagne)	53,0	53,0	0 %	2,9
Deutsche Cell (Allemagne)	28,5	37,5	32 %	2,1
Photowatt (France)	28,0	32,6	16 %	1,8
Kaneka (Japon)	17,0	20,8	22 %	1,2
Ersol (Allemagne)	10,0	20,0	100 %	1,1
Astropower / GE (Etats-Unis)	14,2	18,0	27 %	1,0
Reste du monde	180	283	58 %	15,7
Monde	1 261	1 808	43 %	

FIGURE 15
Les seize producteurs de cellules qui font 84 % du marché. © La lettre du Solaire Cythelia, 2006.

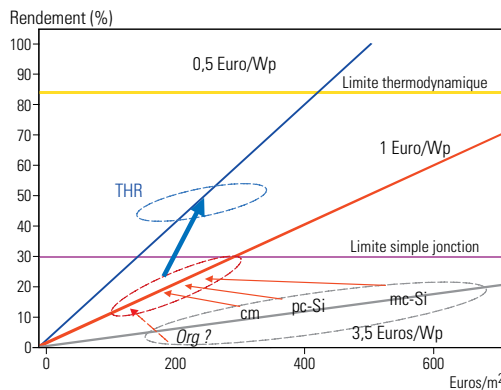


FIGURE 16
Stratégies de réduction des coûts de l'électricité photovoltaïque. Adapté de J.-F. Guillemoles.

minescentes organiques, le domaine du photovoltaïque n'est pas en reste. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids, de mise en œuvre (il suffit de les appliquer comme les peintures !). Comme les semi-conducteurs, ils possèdent des niveaux d'énergies susceptibles d'absorber les photons en créant des paires électron-trou utilisables grâce à des transitions entre les niveaux dits HOMO (*Highest occupied molecular orbital*) et les niveaux dits LUMO (*Lowest unoccupied molecular orbital*). En l'absence de séparation, les paires électron-trous peuvent se recombiner en émettant des photons de la longueur d'onde correspondante (fluorescence, luminescence, existant aussi dans la nature) plutôt qu'en créant de la chaleur. Reste donc à les séparer efficacement ! Si elles peuvent être séparées et transportées vers le circuit extérieur grâce à deux phases adjacentes, on obtient alors des cellules photovoltaïques d'un nouveau type (fig. 17).

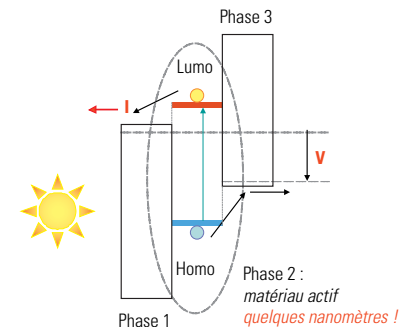


FIGURE 17
Approche nouvelle : photovoltaïque moléculaire.

Du fait de la surface développée extrêmement importante, près de 400 cm² par centimètre carré de surface projetée pour quelques microns d'épaisseur, le rayonnement lumineux traverse plusieurs centaines de fois la couche moléculaire et peut donc être complètement absorbé. Le tour est joué, une cellule solaire complètement nouvelle est formée, avec un oxyde poreux, un colorant et un électrolyte. Des rendements de près de 11 % ont été ainsi obtenus avec une molécule à base de ruthénium⁽³⁾. Le greffage à la surface est assuré par les groupements carboxyliques. Cela marche aussi, mais beaucoup moins bien, avec du jus de myrtilles ! Des recherches très dynamiques sont consacrées à la compréhension de ces cellules et leur amélioration en jouant sur les molécules de colorants, l'électrolyte... Nous travaillons par exemple sur des cellules basées sur du ZnO et de l'éosine, qui sert à désinfecter les plaies. On peut noter l'analogie avec la photosynthèse due à l'absorption de la lumière par la chlorophylle qui est un colorant (des porphyrines de magnésium), l'électron de la LUMO servant à fabriquer

Les cellules solaires hybrides à colorants

Utilisées de longue date dans les lasers à colorants ou les matériaux pour l'optique, l'utilisation efficace des molécules de colorants organiques dans le domaine du photovoltaïque, fut découverte en 1991 par Michael Gratzel⁽²⁾. Dans ce concept révolutionnaire (fig. 18), les molécules sont greffées à la surface d'un solide transparent et poreux, comme l'oxyde de titane, et forment une monocouche.

Sous l'effet de la lumière, les électrons excités passent au niveau LUMO dans l'électrode transparente de TiO₂. Les trous restant au niveau HOMO sont ensuite transférés à l'électrode de SnO₂ via un électrolyte contenant des ions iodures, qui servent de médiateurs redox. Dans ce concept, ce sont les molécules de colorants qui jouent le rôle actif. Pour compenser l'absorption faible d'une monocouche, l'idée a été de multiplier la surface interne en utilisant un solide poreux.

(2) Professeur à l'École polytechnique fédérale de Lausanne.
(3) le Ru(4,4'-dicarboxy-2,2'-bipyridine)₂cis(NCS)₂, appelé N3-Dye

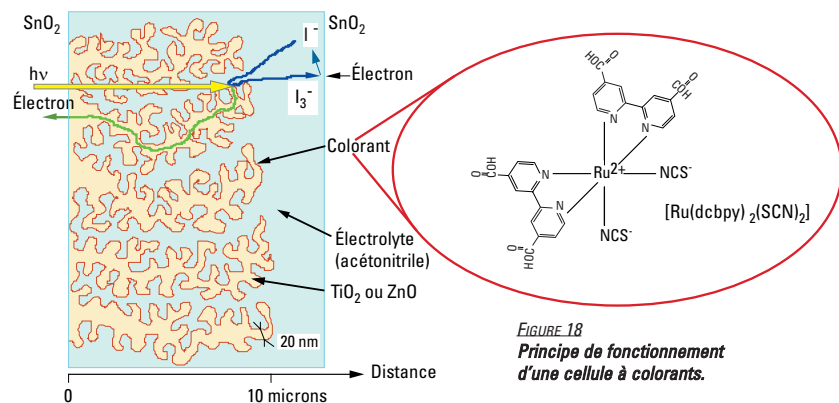


FIGURE 18
Principe de fonctionnement d'une cellule à colorants.

des sucres par réactions électrochimiques avec le CO₂, alors que les trous de l'HOMO oxydent l'eau en oxygène. Le photovoltaïque quitte ici les rives de la physique classique des semi-conducteurs et vogue vers le monde de la chimie organique et bio-organique, des milieux interpénétrés et nanostructurés, les processus biomimétiques. De nombreuses études visent à améliorer le rendement et la stabilité de ces dispositifs, appelées cellules à colorants ou *dye cells*. Des entreprises commencent à s'y intéresser, même si les performances sont encore loin de celles des matériaux inorganiques (Si, CdTe, CIS).

Les cellules « tout organique »

L'autre voie qui soulève également beaucoup d'espoirs est celle des cellules dites « tout organique », qui commence à poindre son nez dans la course aux rendements. Dans ce cas, on joue sur les propriétés de création de paires électron-trous dans des molécules organiques ou des polymères et on cherche à séparer ces paires en associant un matériau accepteur et un matériau donneur, grâce à des positions différentes des bandes LUMO et HOMO comme le montre le schéma (fig. 19).

Contrairement au cas précédent l'absorption se fait en volume du matériau comme pour les semi-conducteurs classiques. Les premiers travaux utilisaient également des couches su-

perposées (par exemple phtalocyanine de cuivre/pérylène, polymère/pérylène), mais les rendements restaient très faibles du fait des capacités réduites de transport dans les couches. Les choses ont décollé lorsque l'on a également découvert la possibilité de mélanger les deux phases. Au lieu de se mélanger complètement comme l'eau et le sirop, les phases accepteur et donneur, se séparent spontanément (comme l'huile et l'eau), elles s'auto-organisent, et forment deux réseaux interpénétrés, à l'échelle de quelques nanomètres ! On retrouve le même type de structure que pour les cellules à colorants. Dans le cas de polymères, tout se passe comme si on avait deux catégories de spaghettis intimement mélangées, l'une conduisant les électrons, et l'autre les trous. Grâce à la chimie organique, on peut ainsi imaginer et synthétiser des polymères ayant des propriétés accepteur ou donneur contrôlables. Par exemple, le même polymère poly(p-phenylenevinylene) noté PPV peut donner le MEH-PPV (donneur) et le CN-PPV (accepteur) permettant d'atteindre un rendement de 1 % en 1995. Cependant les progrès les plus spectaculaires ont été obtenus récemment, en utilisant comme phase acceptrice, des molécules constituées de fullerènes (C60) sur lesquelles des groupements spécifiques ont été greffés pour les rendre plus solubles.

Ainsi, la découverte des fullerènes a-t-elle rapidement « fécondé » d'autres domaines comme le photovoltaïque !

Ainsi les cellules notée P3HT : PCBM, où P3HT représente la phase polymère donneur à base de polythiophène et PCBM la phase de fullerènes modifiés (fig. 19), conduisent-elles actuellement à des rendements maximum de 4 % à 5 %. Il reste beaucoup à faire pour augmenter ces rendements, augmenter la stabilité des cellules dans le temps, mais la voie est ouverte, comme pour les OLED⁽⁴⁾, pour faire de cette filière une filière photovoltaïque exploitable.

Les recherches sont très ouvertes et exploratoires en Europe et dans le monde. En France un réseau Nanorgasol, regroupant différentes équipes de recherche (CNRS, Universités, CEA) dans ce domaine. L'INES en a fait un de ses axes de recherche privilégiés avec le silicium.

Vers des cellules de rendement supérieur à 50 % : pourquoi pas ?

Il nous faut enfin parler du « graal » des recherches dans le domaine du photovoltaïque, l'obtention de rendements très élevés. Ces recherches s'appuient sur l'analyse théorique

(4) Organic Light-Emitting Diode: diode électroluminescente organique

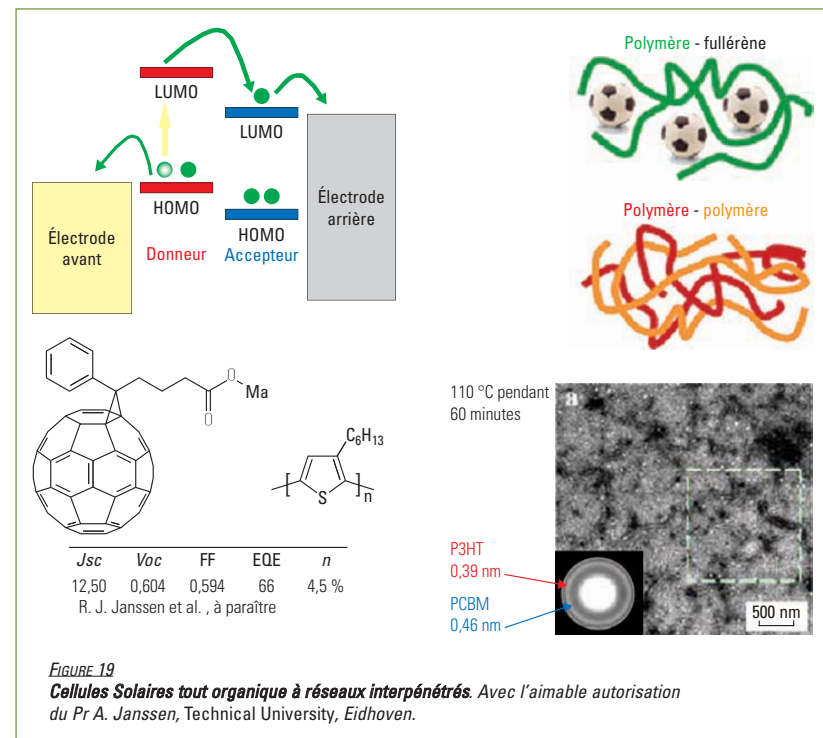


FIGURE 19
Cellules Solaires tout organique à réseaux interpénétrés. Avec l'aimable autorisation du Pr A. Janssen, Technical University, Eindhoven.

de la conversion photon-électron adaptée au spectre solaire. Celle-ci montre que le rendement maximum théorique est d'environ 85 %... ce qui donne le vertige par rapport aux valeurs actuelles d'environ 30 % pour les cellules classiques ! Comment faire pour avancer dans cette voie ? C'est la question qui réunit aujourd'hui aussi bien des théoriciens, que des physiciens et chimistes expérimentateurs, afin de proposer des voies et des matériaux susceptibles de permettre d'avancer.

La réponse est d'une certaine mesure assez simple, il faut convertir le maximum de photons à une énergie proche de leur énergie propre. Dans les systèmes à deux niveaux classiques que nous avons présentés jusqu'à maintenant, les pertes sont considérables, les photons d'énergie trop faible, inférieure à la largeur de bande interdite, ne sont pas absorbés, ils sont perdus. Les photons d'énergie supérieure au gap ne transfèrent qu'au mieux la valeur de l'énergie du gap, le reste est perdu. Par exemple, un photon vert à 2 eV ne va donner au mieux qu'un eV avec une cellule au silicium... Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gap décroissants. Dans ce cas le rendement peut aller au-delà de la limite de 30 %. C'est ce qui est fait actuellement avec les cellules à triple jonctions à base d'arséniure de gallium, qui atteignent déjà près de 40 % de rendement sous concentration ($\times 286$). La concentration de la lumière augmente encore le rendement. Les cellules en couches minces au silicium amorphe ou microcristallin, utilisent aussi des jonctions doubles, voire triples. Des recherches sont en cours pour le CIS et le CdTe.

À côté de cette voie dite à multijonctions, difficile à mettre en œuvre technologiquement, d'autres voies visent plutôt à rester à une seule jonction. Dans ce cas on cherche à trouver des processus permettant de collecter l'énergie perdue par des mécanismes spécifiques, optiques ou électriques. Dans les mécanismes optiques, il y a par exemple le fait de convertir

les photons, vers les hautes énergies pour celles qui sont inférieures au gap. Deux photons infrarouges donnent alors un photon visible par exemple (principe appelé *up conversion*), ou de collecter l'énergie perdue pour les photons absorbés d'énergie supérieure au gap. Un photon bleu donnant deux photons jaunes par exemple (principe appelé *down conversion*)... D'autres possibilités existent en créant par exemple des niveaux intermédiaires dans la bande interdite, ou en collectant directement l'énergie des photons sans perte (dispositifs à porteurs chauds). Pour cela des matériaux ou des structures nouvelles sont à inventer, puis à élaborer, qui permettront de « booster » le rendement des cellules, même actuelles. On comprend donc aisément le grand engouement suscité auprès des chercheurs. Des projets sont maintenant soutenus en France, comme le projet PV THR de l'IRDEP soutenu par l'ANR.

Conclusions

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau de l'industrie connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Une industrie majeure est en cours de constitution comme le montre l'analyse de la situation et des évolutions. De façon intéressante et exemplaire, les possibilités d'innovation sont très grandes, portées par le bouillonnement des recherches en vue d'améliorer les filières existantes, d'en consolider de nouvelles et de préparer les prochaines ruptures, notamment en matière de matériaux et de rendements. Celles-ci associent des chercheurs de tous horizons sur des bases pluridisciplinaires, contrairement à la situation précédente, dans un contexte de dynamisme industriel, ce qui constitue un creuset pour de nouvelles avancées.

Un élément clé est la capacité de la conversion photovoltaïque de contribuer de façon importante à l'approvisionnement énergétique dans le futur, et le plus tôt sera le mieux. C'est

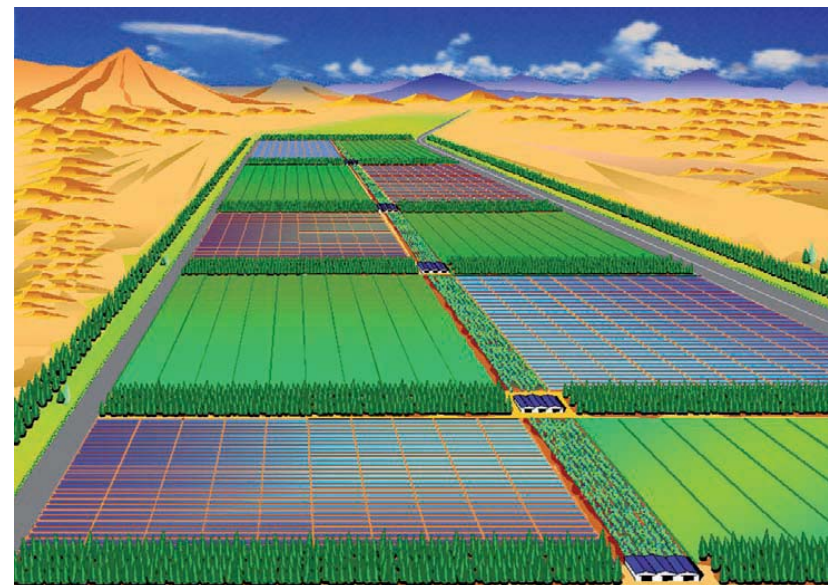


FIGURE 20
Une prospective japonaise : l'énergie photovoltaïque à très grande échelle (Very Large Scale Photovoltaics).
 Source : *Energy from the desert, Feasibility of a very large scale photovoltaic generation systems (VLS-PV)*
 Ed. K. Kurokawa, James & James, 2003.

la raison pour laquelle nous avons insisté sur les données quantitatives et l'importance des politiques de soutien de la part de la puissance publique. La France, qui est restée longtemps sourde au développement de l'énergie photovoltaïque, semble maintenant décidée à s'y mettre. Nous sommes sans doute à l'aube d'un décollage au sein même du marché français, lorsque de plus en plus de particuliers commenceront à s'équiper concrètement.

Le photovoltaïque sera intégré de plus en plus à la source au niveau de l'architecture, dans la conception de l'habitat individuel ou des installations industrielles. Il se développera sur la base d'installations spécifiques de puissance pouvant aller jusqu'à plusieurs MW_c. À plus long terme, on peut citer les études prospectives visant à équiper des sites isolés à fort ensoleillement comme dans l'étude japonaise VLS-PV (*Very Large Scale PV*) qui considèrent des installations de

grande puissance dans certains déserts, notamment le désert de Gobi (fig. 20)

On pourrait aussi envisager les possibilités de développer le photovoltaïque *offshore*, comme l'éolien, où une combinaison avec l'électrolyse pourrait permettre de produire directement un vecteur énergétique secondaire, comme l'hydrogène. Certaines zones océaniques possèdent en effet des niveaux d'ensoleillement comparables aux zones terrestres les mieux dotées. Curieusement les données d'ensoleillement concernant les zones maritimes et océaniques ne sont pas souvent représentées sur les cartes comme l'illustre la figure 1. On peut imaginer des navires partant collecter et transformer de l'énergie en mer... revenant à la terre ferme, chargés de la précieuse denrée. La réflexion pourrait aussi s'étendre, à plus long terme, à des revêtements photovoltaïques au sol pour des portions de routes, des places. Les pistes

ne manquent donc pas, qui ne doivent cependant pas nous détourner des efforts à court terme !

D. L.

Je tiens à remercier tous les collègues et amis qui ont permis d'enrichir ce dossier, en particulier J.F. Guillemoles (IRDEP), H. W. Schock (HMI), V. Boulanger (Systèmes solaires), A. Ricard (Cythelia), M. Bucher (Stuttgart), K. Ramanathan (NREL), R. Janssen (T. U. Eindhoven), C. Jaussaud (CEA-Restaure), A. Nozik (NREL), J. Amouroux (ENSCP), J. E. Bourée (Polytechnique), G. Goer (Photowatt), B. Dimmler & R. Waechter (Würth Solar), T. Niesen (Avancis), S. Dietrich (Q-cells), A. Claverie (Ademe), Y. Maigne (Fondation énergies pour le monde), A. Jäger-Waldau (JRC-Ispra).

Pour en savoir plus



Daniel Lincot, ingénieur de l'École supérieure de physique et chimie industrielles (ESPCI) est directeur de recherche au CNRS ; il dirige depuis 2001 le laboratoire d'électrochimie et de chimie analytique de l'École nationale supérieure de chimie de Paris (ENSCP) associé au CNRS et à l'université Pierre-et-Marie-Curie (UPMC). Le laboratoire a été pionnier dans les recherches sur la conversion photovoltaïque depuis les années 1975. Daniel Lincot développe depuis 1978 des travaux sur les cellules solaires en couches minces, en particulier à base de CuInSe_2 (CIS). Il s'intéresse en particulier à leur élaboration par des méthodes non conventionnelles, à partir de solutions, susceptibles de permettre des coûts de production très bas. Il a joué un rôle central dans la création d'une plate-forme de R&D avec EDF sur le site de Chatou en 2003, autour de cette démarche, dans le cadre d'un laboratoire commun EDF-CNRS-ENSCP, qui s'est transformé en 2005 en Institut de recherche et développement de l'énergie photovoltaïque (IRDEP associant EDF-CNRS-ENSCP), dont il assure la direction adjointe. Il a obtenu en 2004 la médaille d'argent du CNRS.

- **SCHEER (Hermann)**, *Le solaire et l'économie mondiale*, Éditions Acte Sud, 2001.
- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) : www.ademe.fr
- Agence internationale de l'énergie : www.iea.org
- Institut de recherche et de développement de l'énergie photovoltaïque (IRDEP) : www.enscp.fr
- Institut national de l'énergie solaire (INES) : <http://www.institut-solaire.com>
- Institut national d'électronique du solide et des systèmes (INESS) : <http://www-iness.c-strasbourg.fr>
- National Energy Laboratory : www.nrel.gov/pv
- PV Status report 2005 : <http://ies.jrc.cec.eu.int/369.html>
- Companies : www.photowatt.com, www.wuerth-solar.de, www.q-cells.com

Revue

- Systèmes solaires, l'observateur des énergies renouvelables : www.energies-renouvelables.org
- La lettre du solaire, éditée par Cythelia : www.cythelia.fr
- Lettre d'information sur le solaire : Techsol : lettre@techsol.fr