

LES TROIS VOIES DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Les trois façons d'utiliser "directement" l'énergie solaire font l'objet de nouveaux développements pour améliorer leurs performances et surtout leur compétitivité économique. La plus ancienne, l'utilisation thermodynamique, connue depuis l'Antiquité, a eu naguère son heure de gloire avec des installations comme, en France, le four d'Odeillo ou la centrale Thémis. L'utilisation thermique, pour le chauffage direct de locaux ou de circuits d'eau, reste une solution attractive que garanties, subventions et améliorations technologiques contribuent à relancer. La transformation directe du rayonnement solaire en électricité, le photovoltaïque, constitue la voie potentiellement la plus riche de progrès. Le CEA travaille depuis une dizaine d'années (encadré p. 26) à en développer les avantages et à en alléger les contraintes.



Cellules photovoltaïques en silicium polycristallin testées au CEA par le Genec à Cadarache (Bouches-du-Rhône).



CEA/Coulon

L'électricité solaire thermodynamique

La concentration du rayonnement solaire sur un seul foyer permet d'atteindre des températures élevées. Ce principe, connu depuis l'Antiquité, utilise des capteurs paraboliques, cylindro-paraboliques, ou des centrales dites "à tour", pour lesquelles une multitude d'héliostats orientables concentrent l'énergie solaire sur une chaudière unique située sur une tour. Il permet le réchauffement de fluides caloporteurs, en général de l'huile ou des sels fondus, dans une gamme de température allant de 250 à 800 °C, selon les techniques utilisées. Ces fluides viennent ensuite chauffer de la vapeur d'eau, qui entraîne un turboalternateur, comme dans les centrales thermiques conventionnelles.

Des unités prototypes de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts (kW) à une

dizaine de mégawatts (MW) ont été construites à travers le monde au cours des deux décennies écoulées. Dans les Pyrénées, la centrale Thémis, d'une puissance de 2 MW, a fonctionné au début des années 80. Le plus grand développement commercial a toutefois été réalisé par la société Luz Corp., qui a construit au cours de la même décennie trois centrales à capteurs cylindro-paraboliques totalisant une puissance électrique nominale de 354 MWe, et fournissant au réseau de Southern California Edison - qui alimente Los Angeles - une électricité de pointe durant les après-midi d'été. Malgré la faillite du constructeur il y a dix ans, ces centrales n'ont cessé d'être exploitées et de voir leur productivité s'améliorer. Elles témoignent maintenant de la relative maturité de cette filière avec des prix de revient de l'électricité autour de 0,1 euro le kWh.

Un potentiel d'amélioration de 20 à 30 % reste envisageable, notamment *via* la production directe de vapeur dans les capteurs, et l'optimisation des miroirs. Les États-Unis, Israël et, pour l'Europe, l'Allemagne et l'Espagne mènent conjointement des recherches sur ces thèmes. Dans le cadre des facilités financières offertes par le Fonds pour l'environnement mondial, des réalisations sont annoncées d'ici deux à trois ans dans plusieurs pays tels que l'Égypte, l'Inde et le Brésil.

L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique s'utilise principalement au travers de deux applications : le chauffage de l'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux. Pour ces utilisations, les capteurs vitrés utilisés offrent des rendements de l'ordre de 50 % aux températures



B. Charlon/GAMMA

Miroirs orientables sur le site de la centrale solaire Thémis, exemple d'application de l'électricité solaire thermodynamique.



recherchées. Quatre mètres carrés permettent de répondre aux besoins en eau chaude d'une famille de quatre personnes, pour un investissement moyen de 3 000 euro, et dix à vingt mètres carrés assurent le chauffage d'une maison individuelle.

Un chauffage d'appoint est nécessaire pour les périodes climatiques les plus défavorables, et en moyenne sur l'année, une installation de chauffage solaire procure un taux de couverture des besoins, donc une économie sur la facture, de l'ordre de 50 à 60 %. Selon les types d'énergie d'appoint et d'énergie substituée, les temps de retour s'étalent de 6 à 12 ans.

De tels capteurs thermiques produisent annuellement de 200 à 800 kWh par m², selon les besoins et les modes d'utilisation. Les valeurs les plus basses correspondent à des usages épisodiques d'eau chaude sanitaire à température élevée (supérieure à 55 °C), les plus fortes étant obtenues dans le cas de chauffage continu à basse température. Pour ce type d'application, souvent appelée "plancher solaire direct", le fluide caloporteur issu des capteurs est injecté directement dans le plancher des bâtiments à une température de 25 à 30 °C. Cette conception conduit d'une part à des habitations très confortables, d'autre part à une rentabilité technico-économique des meilleures.

Le développement du marché européen a été relativement stagnant autour de 250 000 m² par an dans les années 80, suite à de nombreuses contre-références, liées à un manque de formation des installateurs. Mais l'introduction de nouveaux concepts comme

la garantie de résultats solaires et l'activité des marchés allemand, autrichien et hollandais au cours de la décennie 90 ont induit une forte croissance, avec une augmentation des surfaces vendues d'un facteur 2 à 4 sur les cinq dernières années par rapport à la décennie précédente. À court terme, le marché annuel européen est estimé à plusieurs millions de m². En France, le récent programme national Helios 2006 vise à favoriser une diffusion plus large de ces produits en apportant une contribution financière aux usagers.

Les développements technologiques en cours ont pour objectif de baisser les coûts, via une meilleure facilité d'intégration et de mise en œuvre dans le bâti.

L'électricité solaire photovoltaïque

Réels avantages et vraies contraintes

L'énergie solaire photovoltaïque est un moyen intéressant de réduire les coûts de distribution de l'électricité dans certaines régions. Particulièrement disponible dans la plupart des pays situés entre l'équateur et les 45° parallèles, c'est une source d'énergie d'une fiabilité remarquable qui présente un bilan énergétique et environnemental tout à fait favorable (encadré C, **Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque ?**).

L'énergie solaire est une ressource relativement bien répartie géographiquement, et

Les dix ans du Genec

Le Genec (Groupement pour les énergies nouvelles de l'établissement de Cadarache), créé en 1991 sous le nom de Groupement énergétique de Cadarache, est chargé de la recherche et du développement technologique dans le domaine de l'utilisation rationnelle de l'énergie solaire photovoltaïque et thermique. Fruit d'une collaboration entre le CEA et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), il a accumulé une large expérience dans les essais en laboratoire et en ensoleillement réel ainsi que dans l'assistance technique aux programmes d'électrification photovoltaïque, en particulier dans les pays en développement.

Un *Club d'utilisateurs* regroupe les industriels et les organismes collaborant avec le groupement en vue d'optimiser les travaux et l'information et de créer des partenariats.

donc disponible en de multiples endroits. Dès lors, l'utilisation de cellules ou de modules photovoltaïques permet la production d'électricité "sur place", à proximité immédiate des besoins. C'est là l'atout essentiel de l'électricité solaire : elle permet d'éviter les coûts de distribution inhérents aux solutions conventionnelles, que ce soit l'utilisation de groupes électrogènes alimentés par **énergies fossiles** (diesel, essence ou gaz), ou l'extension d'un réseau électrique principal jusqu'au lieu d'utilisation.

En effet, dans le premier cas, il est nécessaire de prendre en compte la disponibilité et le coût d'approvisionnement du combustible jusqu'au site concerné ainsi que la maintenance périodique. Dans le second cas, les coûts de l'extension ou du renforcement d'une ligne renchérissent de manière très importante le prix du kWh, surtout si les besoins sont faibles. S'ils sont importants, l'amortissement sur chaque kWh sera proportionnellement réduit.

L'absence de tout mouvement mécanique ou de circulation de fluide confère à l'électricité photovoltaïque une fiabilité exceptionnelle : les modules les plus vendus, à base de **silicium cristallin**, font maintenant couramment l'objet de garanties de l'ordre de vingt ans, pour des durées de vie escomptées largement supérieures. Le bilan énergétique est favorable, puisqu'un module photovoltaïque rend l'énergie nécessaire à sa fabrication en deux à quatre ans d'exposition au soleil, selon sa technologie de fabrication.

Le principal facteur limitant la faisabilité d'un système photovoltaïque est la quantité d'énergie souhaitée, qui doit correspondre aux possibilités de la ressource. Pour donner quelques ordres de grandeur, des besoins d'éclairage se montant à quelques heures par jour nécessiteront un "productible" quotidien de quelques dizaines de Wh, ce qui correspond à une surface de modules photovoltaïques nettement inférieure à un mètre carré. Les besoins domestiques liés à un niveau de confort moderne incluant télévision, hifi et électroménager, ou une installation de pompage pour une distribution d'eau villageoise demanderont plusieurs kWh, voire, dans certains cas, une dizaine de kWh par jour. Dans tous ces cas de figure, des installations de l'ordre du m² ou de la dizaine de m² font l'affaire, et celles-ci posent rarement des difficultés d'intégration.

En revanche, l'utilisation de l'électricité solaire est rarement économique pour des besoins supérieurs, dès lors qu'ils sont concentrés en un seul point : cette source d'énergie n'est pas appropriée aux fortes intensités énergétiques.

L'électricité solaire photovoltaïque peut être utilisée de deux manières : pour la fourniture d'électricité en sites isolés ou pour l'injection d'électricité sur un réseau électrique.

Montée en puissance de l'alimentation des sites isolés

La première application est la plus ancienne et la plus répandue au regard des millions de systèmes installés à travers le monde. Ce type d'application a commencé

dès les années soixante pour les satellites, où les modules solaires photovoltaïques se sont imposés face à la plupart des autres solutions, principalement pour des questions de poids et de fiabilité.

Les premières applications terrestres se sont répandues dans les années soixante-dix, essentiellement pour des besoins professionnels (alimentation de stations météorologiques ou de relais de télécommunications). Les années quatre-vingt ont vu l'apparition successive de nombreuses niches de marché : le balisage maritime et aérien, la protection cathodique des oléoducs ou des pylônes, le mobilier urbain et surtout l'électrification rurale, qui englobe principalement des besoins tels que l'éclairage domestique, l'audiovisuel et le pompage de l'eau. L'approvisionnement en eau des sites isolés et son traitement en vue de la rendre potable représenteront dans un avenir proche un marché très important tant les difficultés environnementales sur ce thème sont prévisibles.

Les années les plus récentes auront permis une montée en puissance du nombre de réalisations dans chacun de ces secteurs. En France, 90 % des balises maritimes sont ainsi équipées. Dans les pays en développement, toutes les stations de télécommunications ou les relais hertziens utilisent cette source d'énergie. Les programmes d'électrification rurale se réalisent maintenant par tranches de plusieurs milliers de systèmes.

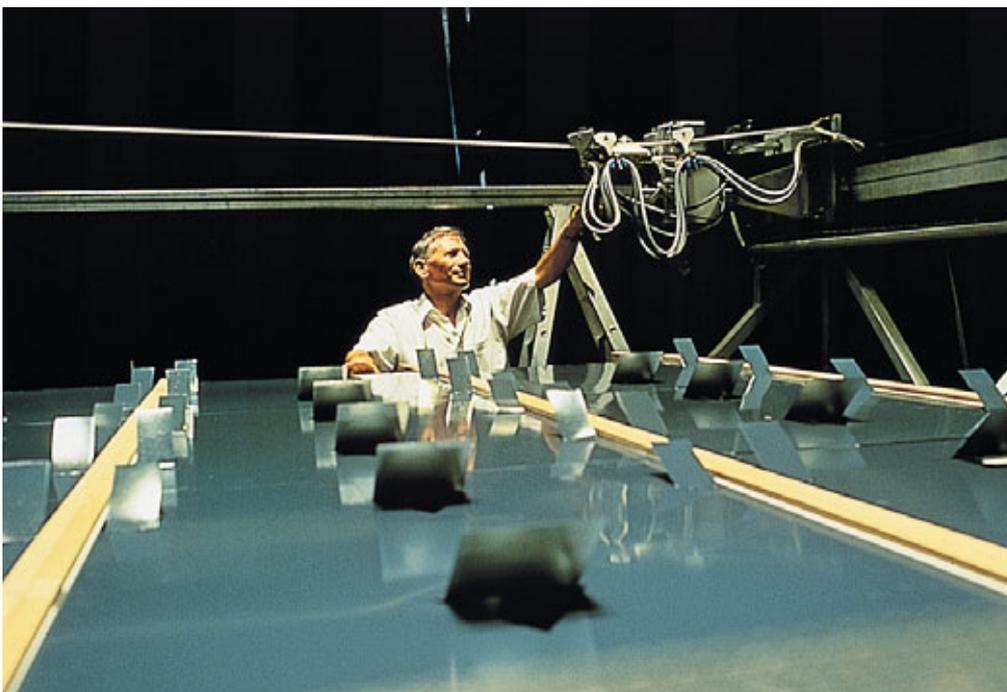
La caractéristique principale de cette première catégorie d'applications de l'électricité solaire est qu'elle nécessite l'utilisation de **batteries** lorsque le besoin d'électricité n'est pas en phase avec la production, la res-

source, autrement dit le soleil (encadré F, **Accumulateurs, piles et batteries : des performances en constante amélioration**).

Croissance accélérée pour l'électricité "au fil du soleil"

La seconde application, plus récente et donc pour l'instant moins développée, bénéficie d'un taux de croissance encore plus rapide. Il s'agit dans ce cas de transformer directement le courant continu des modules photovoltaïques en courant alternatif identique à celui qui est utilisé dans les réseaux électriques basse tension. L'électricité ainsi produite "au fil du soleil" est soit consommée sur place, soit injectée dans le réseau. L'intérêt économique et l'engouement actuel pour cette solution viennent du fait que l'électricité ainsi produite peut être vendue à la compagnie de distribution d'électricité.

Ce "couplage" au réseau peut se faire de façon centralisée avec des centrales photovoltaïques de quelques mégawatts : des centrales de puissance ont ainsi été réalisées aux États-Unis au milieu des années 80. L'approche complémentaire utilise le caractère *réparti* de la ressource et se décline en réalisations "domestiques", c'est-à-dire d'environ quelques kilowatts. Les précurseurs en matière de "toits solaires" ont été la Suisse et l'Allemagne à la fin des années quatre-vingt. Quelques opérations ou programmes de démonstration, intégrant des installations de modules en façade de bâtiment ou en toiture ont eu lieu au cours des années quatre-vingt-dix. À l'heure actuelle, des programmes importants sont en phase de réalisation, au



Essai sur le simulateur solaire du CEA/Cadarache d'un modèle de toit à double paroi permettant aux courants d'air naturels (créés ici par des hélices) d'abaisser la température dans une habitation.

CEA/Coulon



CEA/GENEC

● ● ● ● ● ●
Lampadaires alimentés
individuellement par des cellules
photovoltaïques à Antibes
(Alpes-Maritimes).

Japon et en Europe du Nord principalement, sur un rythme de l'ordre du millier de systèmes montés en toiture chaque mois.

Des prix de revient en baisse régulière

En 1999, le marché a représenté un volume de 200 MW de puissance de module, et un chiffre d'affaires total du secteur photovoltaïque de plus de 1,5 milliard d'euro. La croissance est forte, de 18 % par an en moyenne sur les dix dernières années, et en accélération : + 27 % sur les cinq dernières années, et + 34 % par an sur les trois dernières. Le lancement des programmes de diffusion à grande échelle des toits photovoltaïques au Japon puis en Allemagne en est à l'origine.

Des projections pour l'année 2010, établies sur des hypothèses de croissance de 20 et 25 % par an, donnent respectivement un marché annuel de 1 500 et 2 300 MW. Pour 2020, selon les mêmes estimations, le marché serait compris entre 9 et 21 GW. À l'heure actuelle, les principaux pays producteurs sont par ordre d'importance le Japon, les États-Unis et l'Europe, avec des parts de marché respectives de 40, 30 et

20 %. Les principaux acteurs sont de grands groupes industriels pétroliers ou de l'électronique : BP Amoco, Siemens, Kyocera, Sharp et Sanyo. Photowatt, entreprise d'origine française implantée en Rhône-Alpes, se situe au premier rang européen et au septième rang mondial.

Les prix de vente des modules sur le marché international se situent actuellement autour de 3,35 euro le watt (prix sortie usine, en grande série). L'observation des prix et des volumes de ventes sur les vingt dernières années montre une évolution régulière, correspondant à une division des prix par deux tous les dix ans. La projection vers le futur conduit ainsi à un prix de l'ordre de 1,5 euro le watt en 2010. Pour un système photovoltaïque couplé au réseau de quelques kW, le prix de revient pour l'utilisateur, installation et onduleur compris, est de l'ordre du double du prix du module sortie usine, soit un peu plus de 6 euro le watt. Pour un système avec stockage sur batterie, les prix varient selon les applications entre 9 et 12 euro le watt. ●

Philippe Malbranche et Olivier Dieudonné

Genec

Direction de la recherche technologique

CEA/Cadarache

Les modules solaires photovoltaïques : du silicium cristallin aux couches minces

Les cellules solaires photovoltaïques utilisent actuellement le silicium comme matière première, comme la plupart des composants de la microélectronique. Après avoir utilisé les rebuts de fabrication de cette dernière, leur production tend à suivre ses propres spécifications et à adopter des voies nouvelles, dont les couches minces, voire l'utilisation de matières plastiques. Le CEA s'est engagé dans plusieurs de ces voies.

Du lingot à la plaquette

Une cellule photovoltaïque présente la propriété de convertir directement les rayons solaires en électricité (encadré C, **Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque ?**). Sur le plan électronique, c'est une **diode**. Le matériau **semi-conducteur** le plus largement utilisé pour sa fabrication est le **silicium cristallin** : sa largeur de **bande interdite** en fait un des matériaux permettant les plus forts **rendements de conversion**, sa technologie est bien maîtrisée, et il est très abondant. Actuellement, plus de 80 % des cellules sont faites avec du silicium cristallin. Le **silicium amorphe** ne représente qu'environ 10 % du marché, les cellules faites avec ce matériau ayant des rendements de conversion moitié de ceux des cellules en silicium cristallin. La part des autres matériaux (CdTe, **CIS**, etc.) est encore faible.

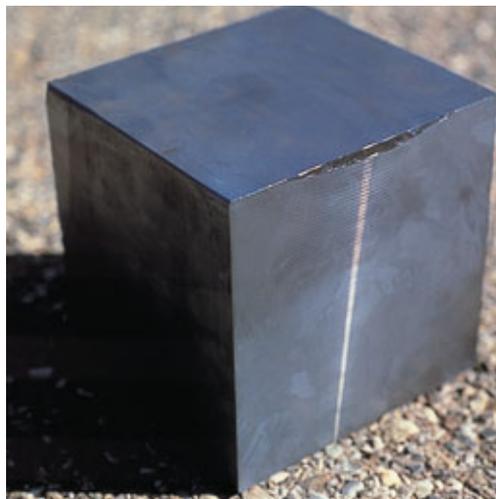
Les cellules photovoltaïques sont réalisées dans des plaquettes de silicium très fines (épaisseur de 200 à 350 μm , pour une surface allant de 10 x 10 cm^2 à 15 x 15 cm^2), découpées dans des lingots de silicium **monocristallin** ou **multicristallin**. Le procédé Czochralski (CZ) permet de fabriquer les lingots monocristallins. Un germe lui-même monocristallin, trempé à la surface d'un bain de silicium faiblement surchauffé contenu dans un creuset en silice, est tiré à vitesse continue. La solidification a lieu et reproduit le motif cristallin du germe. Si les conditions de tirage sont bien contrôlées, l'opération produit une billette de silicium monocristallin sans défauts. Le procédé permet d'obtenir des cellules de très bon rendement de conversion (16 à 17 % en production) mais reste relativement cher.

Le procédé de fabrication des lingots de silicium multicristallin est basé sur la fusion de silicium dans des creusets en silice. Cette méthode consiste à refroidir très lentement du silicium liquide suivant une direction donnée afin d'obtenir une structure de solidification orientée uniformément suivant cette direction. Elle donne un lingot aux grains relativement gros (1 cm) qui permettent d'obtenir des cellules avec un bon rendement (14 %). C'est un procédé lent mais de faible coût.

Le silicium obtenu doit être très pur, car la présence d'impuretés même à des taux très faibles réduit le rendement des cellules : les concentrations en impuretés tolérées vont de 0,1 à quelques dizaines de ppm (parties par million) et même de l'ordre de quelques dizaines de ppb (parties par milliard) pour certaines impuretés. Après solidification, les blocs de silicium cristallin obtenus sont découpés en lingots, puis en plaquettes. La découpe des plaquettes, réalisée par une scie à fil, est longue et coûteuse en matériau : le trait de scie fait environ 200 μm de large, et pratiquement la moitié du silicium est perdue.

Cellules et modules

Globalement, la fabrication des plaquettes de silicium représente 40 % du prix du module, élément qui remplit plusieurs fonctions : connecter les cellules entre elles de manière à fournir la tension voulue (typiquement 36 cellules en série pour une sortie sur 12 V) et les protéger contre les agressions de l'environnement (érosion, humidité, grêle, sel, UV, etc.). Pour en réduire le coût, des gains doivent être recherchés à toutes les étapes : la purification du silicium, la fabrication des lingots et la découpe des plaquettes. Une solution



CEA/Coulon



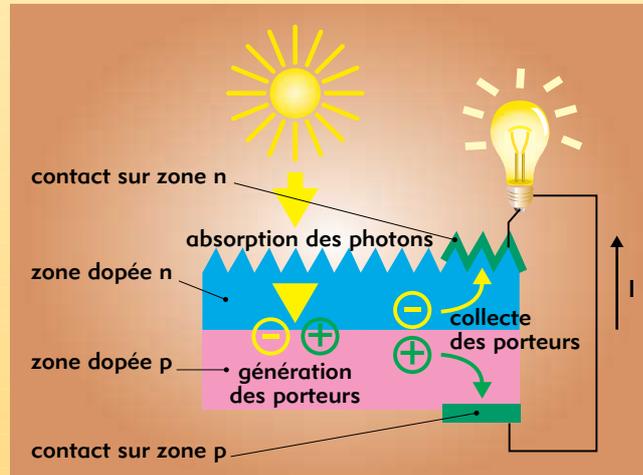
De la pierre de silice
au bloc de silicium.

Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque ?

Le silicium a été choisi pour réaliser les cellules solaires photovoltaïques pour ses propriétés électroniques, caractérisées par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique (colonne IV du tableau de Mendeleiev). Dans le silicium solide, chaque atome est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne V (phosphore par exemple), un des électrons ne participe pas aux liaisons ; il peut donc se déplacer dans le réseau. Il y a conduction par un électron, et le **semiconducteur** est dit *dopé de type n*. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne III (bore par exemple), il manque un électron pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut venir combler ce manque. On dit

alors qu'il y a conduction par un trou, et le semiconducteur est dit *dopé de type p*. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont des **dopants** du silicium.

matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p devient chargée négativement. Il se crée donc un champ électrique entre les zones n et p, qui tend à repousser les électrons dans la zone n et un équilibre s'établit. Une *jonction* a été créée, et en ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, c'est une **diode** qui est obtenue.



Lorsque cette diode est éclairée, les photons sont absorbés par le matériau et chaque photon donne naissance à un électron et un trou (on parle de **paire électron-trou**). La jonction de la diode sépare les électrons et les trous, donnant naissance à une différence

de potentiel entre les contacts n et p, et un courant circule si une résistance est placée entre les contacts de la diode (figure).

de potentiel entre les contacts n et p, et un courant circule si une résistance est placée entre les contacts de la diode (figure).

séduisante consiste à produire des rubans de silicium, permettant de s'affranchir de l'étape de découpe de plaquettes. Cependant cette technique, largement développée au cours des vingt dernières années, n'a pas réussi à s'imposer, en raison notamment de la moins bonne qualité du silicium obtenu.

Le bon fonctionnement d'une cellule nécessite plusieurs fonctions : une absorption maximum de la lumière sur tout le spectre solaire, une collecte efficace des **porteurs** (électrons et trous) générés par

les photons et l'établissement d'une connexion électrique avec le circuit extérieur. La première étape de sa fabrication est donc une attaque chimique de la surface pour la nettoyer et la rendre rugueuse, donc peu réfléchissante. La jonction est ensuite formée par diffusion de **dopants** (les plaquettes utilisées sont généralement dopées p, mais du phosphore est introduit par diffusion afin de doper n le silicium sur une profondeur de l'ordre du micromètre) et un dépôt anti-réfléchissant est effectué. Les grilles métalliques servant à collecter le courant, très étroites afin de ne pas créer un effet d'ombrage important, sont ensuite réalisées par sérigraphie. Un recuit permet alors la formation du contact électrique entre le silicium et les grilles collectrices. Les rendements de conversion de ces cellules sont de l'ordre de 14 à 17 %, selon la nature du matériau utilisé (multi ou monocristallin) et le procédé de fabrication de la cellule. Un ruban d'aluminium destiné à réaliser les interconnexions entre cellules est ensuite soudé sur les grilles. Puis les cellules sont testées individuellement, triées selon leurs rendements de conversion, et assemblées en modules. La face éclairée des cellules est collée sur un verre trempé qui assure la protection mécanique. L'arrière des cellules est protégé par une feuille de verre ou de plastique. Les collages sont réalisés par un **polymère** qui assure la protection contre l'humidité.

Cellules de silicium cristallin assemblées en modules sur le site d'expérimentation du CEA/Cadarache.



J.-F. Mutzig

Les verrous technologiques

Jusqu'à présent, les volumes de silicium utilisés par l'industrie photovoltaïque étaient faibles (3 000 tonnes par an, soit de l'ordre de 10 % de la consommation de silicium de la microélectronique), et le silicium provenait des rebuts (têtes et queues de lingots, silicium polycristallin) de la microélectronique, qui fournissaient un silicium d'une pureté de quelques ppb, supérieure à celle demandée par les cellules photovoltaïques. Mais les prévisions de croissance du photovoltaïque rendent maintenant nécessaire une source autonome produisant à un faible coût un silicium de pureté adaptée à ses besoins. Parmi les alternatives possibles à l'utilisation des rejets de la microélectronique, le procédé à **lit fluidisé** utilisant comme matériau de base le silicium métallurgique semble le plus prometteur. Il permettrait d'élaborer du silicium de qualité satisfaisante à un coût accessible. Le groupe chimique allemand Bayer étudie actuellement l'industrialisation de ce procédé.

Le procédé actuel de fabrication des lingots est lent. L'industrie s'oriente vers des méthodes de coulée continue en creuset froid : le silicium fondu y est introduit, confiné par un champ électromagnétique et solidifié sans contact avec les parois. Il est ainsi possible d'obtenir en continu des lingots de grande dimension ($35 \times 35 \text{ cm}^2$ de section et 3 m de longueur) ayant une structure cristalline compatible avec les applications photovoltaïques. Ce type de procédé présente plusieurs avantages par rapport aux procédés classiques. Il évite toute contamination par le creuset grâce au confinement électromagnétique, sa productivité est multipliée par 10 et l'homogénéité du lingot permet d'obtenir des cellules au rendement de conversion très ciblé et d'abandonner le tri des cellules.

Les cellules à concentration

Dans un système à concentration, une cellule de petite taille est placée au foyer d'une optique (figure 1). La surface de la cellule silicium est donc divisée par le facteur de concentration, qui peut aller jusqu'à 300. La cellule peut être réalisée dans du silicium de très bonne qualité avec les technologies de la microélectronique, ce qui autorise des rendements de conversion plus élevés (supérieurs à 20 %) que ceux des cellules utilisées sans concentration (15 %). Le système doit toutefois être placé sur un support orientable pour suivre le soleil. Le coût du système est alors essentiellement déterminé par l'optique, qui peut être réalisée en plastique, et donc être peu chère, par l'assemblage et par le système de suivi. Les systèmes à faible concentration (moins de 50) utilisent des optiques cylindriques



PHOTOWATT INTERNATIONAL

Cellule en silicium multicristallin de 100 mm.

qui nécessitent un suivi du soleil suivant un axe ; les systèmes à forte concentration (plus de 100) un suivi selon deux axes. Cette approche, particulièrement adaptée à la production d'électricité dans des micro-centrales, devrait permettre de réduire le coût de l'énergie produite. Pour améliorer les systèmes à concentration, on cherche bien sûr à augmenter les rendements des cellules, mais aussi à développer des systèmes optiques ayant des focales plus courtes afin de réduire l'épaisseur et donc l'encombrement des panneaux.

Les voies du futur : les modules en couches minces

Les verrous scientifiques et technologiques

La faible consommation de matière, l'élaboration directe du matériau par les techniques de dépôt usuelles sur un matériau sup-

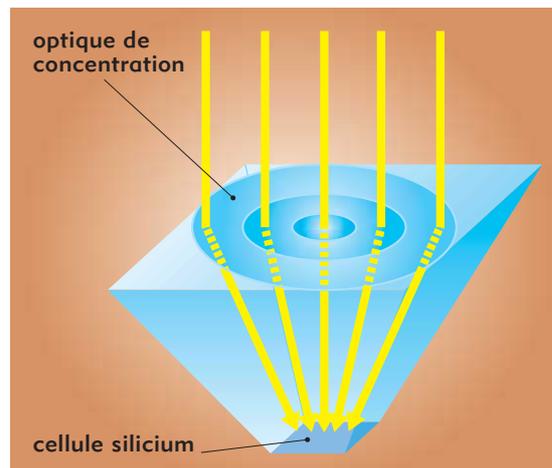


Figure 1. Schéma de principe d'une cellule à concentration.

port de faible coût comme le verre, l'acier ou un polymère, sans avoir besoin d'autres étapes de mise en forme coûteuses comme le sciage, font de la technologie en couche mince une solution particulièrement attractive pour les cellules photovoltaïques (encadré). Le silicium cristallin, de par sa structure de **bandes électroniques**, n'est pas naturellement le matériau semi-conducteur adapté à la conversion photovoltaïque en couche mince. Les profondeurs d'absorption pour la partie du spectre solaire se situant dans le proche infrarouge sont en effet élevées et se chiffrent en dizaines de microns. Les cellules au silicium monocristallin en film mince ont cependant leur intérêt, comme nous le verrons plus loin.

Pour avoir une cellule *couche mince*, il faut de préférence utiliser des semi-conducteurs ayant une **bande électronique interdite directe** (et non indirecte comme le silicium) et de valeur adaptée au spectre solaire (de l'ordre de 1,5 eV). Avec de tels matériaux, tout le spectre solaire peut être absorbé dans une épaisseur de l'ordre du micromètre. De plus, la faible profondeur d'absorption rend la cellule relativement tolérante à la présence de défauts agissant comme centres de recombinaison des **porteurs de charge** (électrons et trous).

De très nombreux efforts de recherche ont donc été entrepris sur un assez grand nombre de matériaux depuis une quarantaine d'années, afin d'arriver à des cellules photovoltaïques en couche mince possédant, à la fois, un bon rendement de conversion et un faible coût. Historiquement, deux matériaux ont été particulièrement étudiés et ont fait l'objet d'une industrialisation : le silicium amorphe et le tellurure de cadmium (CdTe), tous deux déposés sur verre. Malgré les efforts entrepris, le rendement maximum de ce type de cellules, pour des tailles significatives, reste malheureuse-

ment limité. Ceci tient à la difficulté d'obtenir ce type de matériaux avec une faible densité de défauts et, par là, de bonnes propriétés électroniques. Le silicium amorphe souffre de plus d'un effet de vieillissement lié à l'instabilité de l'hydrogène dans sa structure et la présence du cadmium, un **métal lourd** de toxicité comparable à celle du mercure, rend le CdTe relativement inapproprié à une application grand public. Récemment, des avancées remarquables ont été obtenues sur un autre type de matériaux, les **chalcopyrites**, avec comme référence le diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe₂) ou CIS. Cette filière est donc devenue rapidement la filière *couche mince* de référence.

Mais tout n'est pas dit et les efforts se poursuivent dans de nombreuses autres directions : fabrication de matériau silicium avec des grains de taille très faible amenant à une modification de la structure de bande électronique (silicium dit "microcristallin"), cellules multi-jonctions à base d'alliages silicium-germanium amorphes, cellules à base de matériaux semi-conducteurs organiques.

Un des gros enjeux de la filière *couche mince* est également lié à la possibilité de réaliser ces couches directement sur un matériau souple permettant ensuite de recouvrir un matériau de construction. Ceci pose un autre défi, celui de trouver des polymères de support étanches à l'humidité et donc permettant de prévenir toute corrosion et toute dégradation du matériau semi-conducteur et des connexions électriques.

Le champ des recherches sur ces matériaux couches minces reste relativement ouvert. Toute la gamme des matériaux possibles n'a pas été étudiée en détail. De nombreux efforts sont encore nécessaires pour obtenir une mise en œuvre assurant à la fois le coût minimum et le rendement maximum. Enfin les mécanismes physiques élémentaires commandant les rendements initiaux et les facteurs de

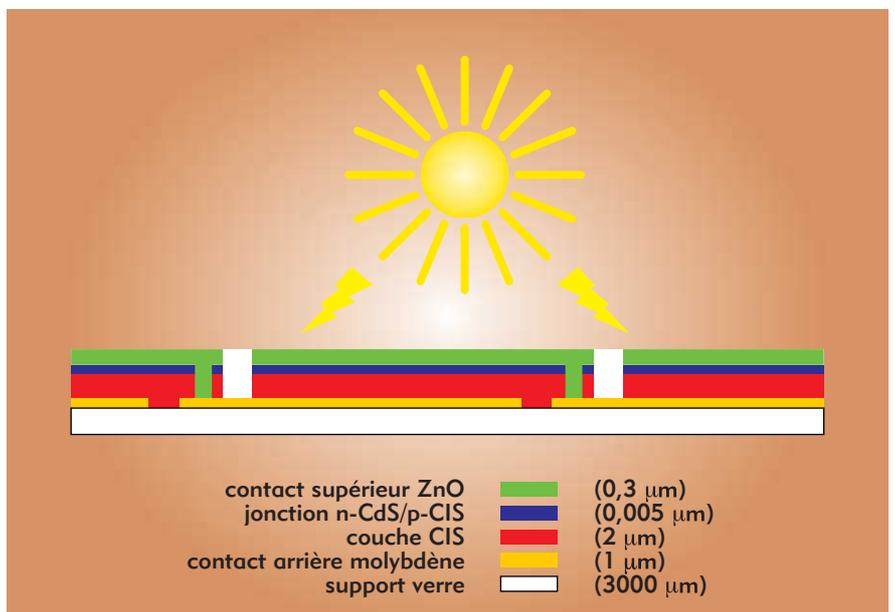


Figure 2. Schéma de principe de l'empilement d'une cellule photovoltaïque CIS (diséléniure de cuivre et d'indium) et de l'interconnexion électrique entre deux cellules en série. L'épaisseur des différentes couches est indiquée entre parenthèses.

dégradation sont encore relativement mal compris dans tous les matériaux couches minces étudiés, quelle que soit leur maturité.

Les technologies en cours de développement ou d'industrialisation

Ces dernières années, alors que le rendement de conversion des cellules solaires basées sur les couches minces de CdTe a stagné autour de 16 % en laboratoire, des progrès constants ont été obtenus avec le matériau semi-conducteur CIS. Une valeur de rendement de 18,8 %, record pour le domaine des couches minces, a été atteinte en laboratoire pour une cellule de petite dimension. Pour des modules de 30 × 30 cm², des performances de 12,8 % sont d'ores et déjà obtenues. De plus, des études fondamentales ont montré que ce matériau a la particularité d'être très stable sous rayonnement et qu'il a la propriété de s'autorégénérer. Ce phénomène d'autoguérison est expliqué par la structure chalcopyrite de ce matériau, qui n'est pas totalement ordonnée, et par le fait que de nombreux défauts de type lacunes d'atomes ou d'atomes étrangers (sodium, fer, or...) sont présents et que les atomes de cuivre qui le constituent sont relativement mobiles. Ces résultats ont provoqué un regain d'intérêt pour cette filière, en particulier en Allemagne.

La structure de l'empilement d'une cellule CIS (figure 2) comprend un support en verre et une électrode en molybdène déposée par **pulvérisation cathodique**. La jonction sulfure de cadmium (CdS) de type n/CIS de type p est obtenue par le dépôt d'une couche de 50 nanomètres de CdS en bain chimique (*Chemical Bath Deposition CBD*) sur le CIS. Une électrode transparente en oxyde de zinc (ZnO) dopé à l'aluminium constitue le contact supérieur. Plusieurs techniques de dépôt ont été utilisées pour l'obtention de la couche CIS (évaporation sous vide, **séléni-sation** des précurseurs métalliques, pulvérisation cathodique ou par spray, électrodéposition). Les meilleures performances sont atteintes avec la technique de co-évaporation des éléments. La surface finale de la cellule est ensuite encapsulée par une couche polymère et un verre de protection.

Les principaux acteurs industriels sont Siemens Solar (Allemagne et États-Unis), Würth Solar (Allemagne) et Matsushita (Japon). En France, il n'y a encore aucun industriel impliqué dans cette filière, et dans le domaine de la recherche, le laboratoire d'électrochimie de l'ENSCP (École nationale supérieure de chimie Paris) travaille sur ce matériau depuis plusieurs années avec une réputation internationale. EDF, Saint-Gobain Recherche et l'ENSCP participent à un projet permettant le développement en France d'une filière couche mince CIS originale basée sur l'électrodéposition.

Photowatt-CEA : une coopération qui s'intensifie

Les collaborations établies entre Photowatt International, premier fabricant européen verticalement intégré de plaques, cellules et modules photovoltaïques, le CEA/Cadarache et le Leti à Grenoble devraient s'intensifier dans les années à venir, dans les domaines de l'intégration des modules dans le bâtiment et du développement de nouveaux procédés de fabrication des cellules photovoltaïques. Photowatt poursuit sa stratégie de croissance sur un marché mondial en expansion rapide. Passé de 5 MW de capacité en 1997 à 18 MW aujourd'hui, Photowatt International propose aussi une gamme élargie de produits avec deux tailles de *wafers* et cellules et une gamme de modules allant de 10 à plus de 100 **watts-crête** (Wc). Cela a permis l'élargissement de sa présence géographique : Photowatt est maintenant présent à égalité sur les zones Europe (marché du "raccordé réseau", particulièrement en Allemagne), Amérique (grâce notamment à sa maison-mère américaine Matrix Solar Technologies, elle-même filiale de la société

canadienne Automation Tooling Systems) et Asie/Pacifique (le Japon étant le plus gros marché mondial). Son objectif ? Figurer parmi les cinq premiers fabricants mondiaux. Photowatt attache une importance particulière au développement des nouvelles technologies et des nouveaux procédés de fabrication. L'entreprise consacre, avec la participation de l'Ademe, environ 15 % de son chiffre d'affaires à la recherche et au développement de la technologie. Ses principaux objectifs pour le court et le moyen terme sont d'une part un four de coulée continue du silicium dans un creuset froid, qui permet de fabriquer des lingots dix fois plus rapidement que la technique utilisée aujourd'hui, avec une réduction d'un facteur 2 de la valeur ajoutée, d'autre part le développement d'un procédé innovant de fabrication des cellules permettant une augmentation significative du rendement de conversion. D'autres projets pour le plus long terme portent sur le raffinage du silicium et le développement de cellules ultra-minces (100 -150 µm).



PHOTOWATT INTERNATIONAL

Fabrication de cellules de silicium multicristallin à l'usine Photowatt International de Bourgoin-Jallieu (Isère).

Cellules au silicium monocristallin en film mince

Même si, comme nous l'avons vu, le silicium nécessite des épaisseurs de plus de 10 microns pour espérer un rendement de conversion suffisant, une solution très attractive pour réaliser à faible coût des cellules photovoltaïques est de prélever dans une plaque de silicium monocristallin un film épais de quelques dizaines de microns et de le rapporter sur un support à faible coût tels le

verre ou la céramique. Ceci permettrait de n'utiliser que la quantité de silicium strictement nécessaire au bon fonctionnement de la cellule et d'éviter les pertes liées au sciage, tout en gardant un matériau et une filière particulièrement fiables et éprouvés. Plusieurs procédés sont en cours d'étude dans plusieurs laboratoires au Japon, en Allemagne, en Australie et en France. Tous ont en commun la fragilisation du silicium en profondeur de manière à pouvoir ensuite détacher le film de surface situé au dessus de cette zone fra-

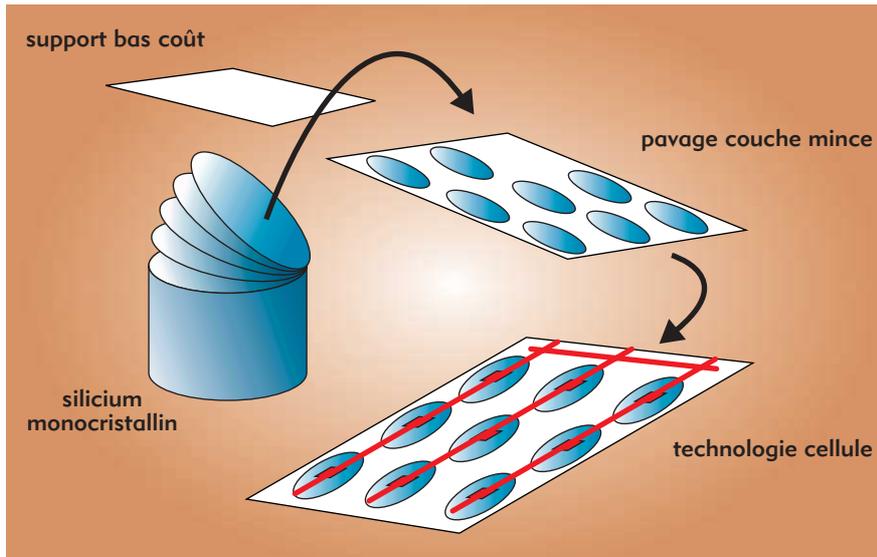


Figure 3. Schéma de principe de report de couche mince et de pavage de support bas coût de grande dimension avec réalisation des étapes technologiques de fabrication des cellules à l'échelle du module.



gile et de le reporter sur le support à bas coût de grande dimension (figure 3). Avantage supplémentaire : la réalisation des étapes technologiques des cellules se fait à l'échelle d'un module de grande surface et non plus au niveau de chaque tranche de silicium, ce qui permet de réduire de façon significative le coût ramené à l'unité de surface. Le CEA/Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information), qui a joué le rôle de pionnier dans le développement de ce type d'approche pour les applications à la micro-électronique, se propose d'étudier son application aux cellules photovoltaïques dans le cadre d'un contrat avec l'Ademe, en collaboration avec l'INSA de Lyon.

Les cellules organiques : vers le tout polymère

La recherche et développement de cellules solaires à base de matériaux organiques ou de polymères est motivée par les avantages que présentent ces matériaux : faible coût, matière première illimitée, facilité de mise en œuvre, technologies basse température, grandes surfaces, dispositifs souples... Cette solution

permettrait de plus de traiter selon une même technologie le substrat (support mécanique), le matériau actif où a lieu la conversion photovoltaïque et l'encapsulation.

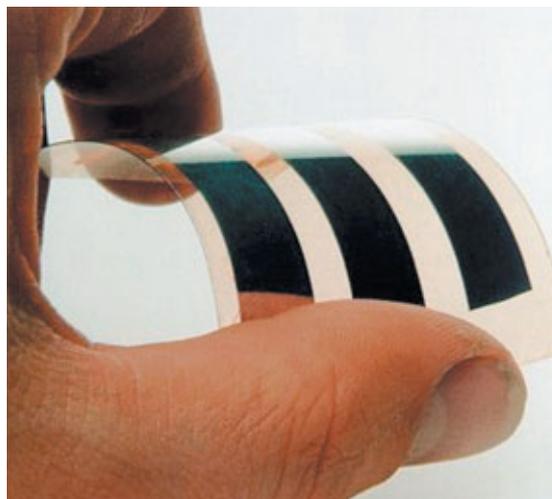
Il existe aujourd'hui des cellules photovoltaïques organiques dont le rendement de conversion dépasse la barre des 10 %. Elles reposent sur la technologie dite de Grätzel qui consiste en une jonction entre un polymère organique et un électrolyte liquide.

La génération photovoltaïque se situe dans le polymère et l'électrolyte permet d'assurer le transfert de charge et la différence de potentiel (force électromotrice) par sa jonction avec le polymère. Ce type de cellule est développé en Suisse par Solaronix pour les applications basse puissance et en Allemagne par l'INAP (*Institut für Angewandte Photovoltaik*) pour les applications haute puissance. La présence de l'électrolyte liquide constitue l'inconvénient majeur de cette technologie avec une faible stabilité en temps (évaporation) et une plage de température de fonctionnement limitée.

La recherche s'oriente donc vers une solution tout polymère. Dans cette filière, les meilleures performances actuelles sont un rendement de conversion de 3,6 %. Le nombre de laboratoires travaillant dans le domaine, à un stade encore relativement amont, reste limité, mais les publications, brevets et conférences illustrent l'émergence de cette voie qui pourrait entrer en phase de développement à une échéance voisine de 2010. Le CEA/Leti a acquis une expérience significative dans ce domaine suite à un contrat européen, le premier sur le sujet. Il a proposé une voie originale pour améliorer les performances de collecte des porteurs de charge dans ce type de structure. Un projet national alliant le Leti, plusieurs laboratoires universitaires et le groupe TotalFinaElf est en cours de montage afin de développer des cellules photovoltaïques en polymères pour les applications de production d'énergie. Il s'agit dans un premier temps d'une activité de recherche amont.

Claude Jaussaud, Jean-Pierre Joly, Alain Million et Jean-Michel Nunzi

Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information
Direction de la recherche technologique
CEA/Grenoble



Cellule photovoltaïque souple développée à l'université de Linz (Autriche).

JKU Linz

Les systèmes photovoltaïques

Au-delà du module qui porte les cellules exposées au soleil, l'exploitation de l'électricité photovoltaïque passe par des "systèmes" dont le développement futur nécessite, pour chaque composant, un effort de recherche pour améliorer son économie et sa fiabilité. C'est particulièrement vrai du chaînon essentiel que constitue le stockage, la contrainte principale pesant sur la filière étant la nécessité de stocker l'électricité entre les périodes d'ensoleillement. Le CEA cherche entre autres à modéliser le fonctionnement des systèmes photovoltaïques en intégrant les évolutions des caractéristiques du stockage au fil du temps.

L'interface entre l'utilisateur et la ressource

Le système photovoltaïque est l'interface entre l'utilisateur et la ressource, il "met en forme" l'énergie captée par les modules photovoltaïques selon les types d'applications. En plus d'une association de modules photovoltaïques, un onduleur permet de convertir le courant continu en courant alternatif pour une utilisation sur le réseau électrique. L'utilisateur peut alors consommer l'énergie qu'il produit ou la réinjecter dans le réseau électrique si, par exemple, les conditions de rachat par l'exploitant du réseau lui sont favorables. L'onduleur peut entraîner une pompe dans le cas d'un système de pompage dit "au fil du soleil" : de l'eau est alors refoulée dans un réservoir dimensionné selon les besoins du village, pendant la journée, et restituée à la demande.

S'il est nécessaire de stocker l'énergie électrique produite, un parc de stockage sera introduit. La gestion de ce parc se fera alors via un régulateur : celui-ci se charge lorsque l'ensoleillement le permet, et alimente l'utilisation dès que nécessaire. Un tel stockage permet, d'une part de pallier les alternances jour-nuit ainsi que plusieurs jours consécutifs de mauvaises conditions météorologiques, d'autre part de répondre à des besoins de puissance nettement supérieurs à ce que pourrait fournir instantanément le générateur photovoltaïque.

Les solutions hybrides

Ce type d'architecture se complexifie pour des applications plus importantes : afin d'éviter la mise en place d'un stockage trop imposant, et donc coûteux, un générateur auxiliaire tel qu'un groupe électrogène peut être retenu. Ce sera alors un système photovoltaïque dit "hybride", c'est-à-dire associant un générateur photovoltaïque à une source d'énergie, conventionnelle ou non : si les conditions météorologiques sont favorables, l'association de plusieurs sources renouvelables (photovoltaïque, éolienne ou micro-hydraulique) est même envisageable.



Ph. Malbranche

Les axes de recherche et de développement sur tous ces systèmes visent principalement la baisse des prix de revient des services rendus. Cette baisse s'obtient en jouant sur les couples coûts/performances des composants constituant le système mais aussi sur des facteurs plus globaux de gestion et d'architecture des systèmes.

Dans l'ordre d'importance des coûts d'investissement initial d'un système photovoltaïque hybride, par exemple, le générateur photovoltaïque représente en moyenne 35 %, le parc batterie 20 %, les autres composants 20 %, les sources d'énergie additionnelles (groupe électrogène) 10 %, la logistique et l'installation 15 %. L'intégration des coûts de maintenance, d'intervention et de remplacement de matériel (parc de stockage par exemple) bouleverse la ventilation des coûts dits de "cycle de vie" : le parc batterie en représente 50 %, le générateur photovoltaïque 20 %, les sources d'énergie additionnelles 15 % et les autres composants 10 %, la logistique et l'installation 5 %.

La recherche sur les modules photovoltaïques a des retombées directes sur les coûts des systèmes tant en termes d'augmentation des performances et du **rendement de conversion** des cellules (plus de puissance pour un prix constant), qu'en termes de diminution des

Installation destinée à couvrir les besoins en électricité et en eau d'un camp de vacances pour adolescents à Alice Springs, dans le bush australien. Elle associe des modules solaires photovoltaïques, un parc de batteries, un groupe électrogène, une pompe de forage, une unité de dessalement et une réserve d'eau douce.



Résidence secondaire, dans le centre de la Finlande, alimenté en électricité par un système photovoltaïque délivrant en été de l'ordre de 5,6 kWh par jour. Les modules de toit assurent également des fonctions de couverture et d'isolation.



Neste Oy NAPS

prix de production en travaillant sur les procédés de fabrication (module photovoltaïque moins cher à puissance équivalente, voir *Les modules solaires photovoltaïques : du silicium cristallin aux couches minces*). Il est raisonnable aujourd'hui d'estimer qu'une marge de gain existe qui permettrait de réduire de 30 % le coût d'un système complet. Les deux autres axes de recherches les plus importants ne sont pas à négliger. Sur le parc de stockage, le gain potentiel est estimé à 50 % s'il est, par exemple, possible de multiplier par deux la durée de vie de la batterie. Sur les autres composants, il s'agit de minimiser les pertes de conversion : les onduleurs dits "solaires" sont bien plus performants que les onduleurs standard. Leur rendement atteint 95 % pour une consommation à vide de quelques pour-cent de leur puissance nominale alors que le rendement des onduleurs pour alimentation sans interruption dépasse à peine 80 % avec une consommation à vide supérieure d'un ordre de grandeur. Le prix est en conséquence.

Fiabilisation, gestion des flux et nouvelles architectures

Dans le cas des systèmes complets, les principaux leviers technologiques qui guident les actions de recherches sont essen-

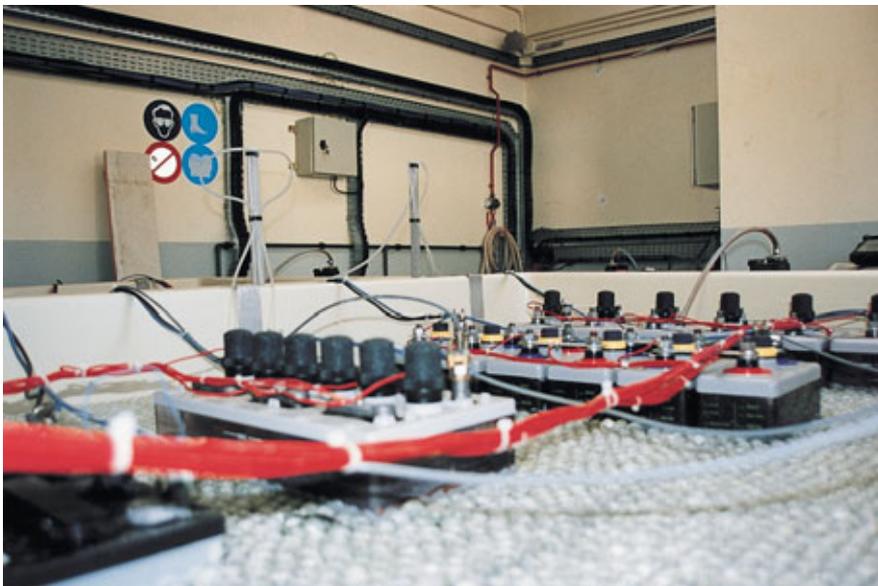
tiellement de trois ordres. Le premier relève de la fiabilité des systèmes. À court et moyen terme, c'est l'un des moyens d'action les plus efficaces : il s'agit par exemple de réduire les fréquences de maintenance sur les sites isolés, ou de conférer à l'ensemble des composants des durées de vie aussi longues que celle des modules photovoltaïques. Cela passe par une meilleure connaissance de la fiabilité du système et la mise en place de dispositifs de surveillance et d'aide à l'utilisateur, mais aussi par une certaine standardisation des composants et une approche d'assurance de la qualité et de normalisation de plus en plus présente. Une partie des études du Groupement pour les énergies nouvelles de l'établissement de Cadarache (Genec) vise à l'élaboration des normes internationales de tests des systèmes.

Le second levier est celui de la gestion des flux énergétiques : à moyen terme, cette solution semble la plus prometteuse. Elle consiste à utiliser au mieux les flux d'énergie de tous les composants, en tentant de faire produire les modules photovoltaïques au plus près de leur puissance maximale, en recherchant une meilleure connaissance de la stratégie de gestion des batteries, en optimisant les associations de sources énergétiques en vue de privilégier l'utilisation des énergies renouvelables tout en correspondant à un optimum économique. La mise en œuvre de méthodes de gestion "prédictives", c'est-à-dire visant à prévoir l'état futur des ressources ou du système, constitue aujourd'hui un axe important des études menées au Genec.

Le troisième levier s'exerce sur l'architecture globale du système : c'est certainement le point le plus innovant qui donnera le jour à des produits dont l'architecture sera éloignée de celle des premiers systèmes. Cette tendance est très nette pour des applications du type "couplage au réseau". Des produits de plus en plus diversifiés sont en cours de développement pour permettre une intégration plus simple et modulaire dans les bâtiments : tuiles, ardoises ou couvertures "solaires", fenêtres de toit ou de façade semi-transparentes, et même des composants multifonctionnels assurant simultanément une ou plusieurs des fonctions telles que rigidité mécanique du bâtiment, isolation, protection solaire, captation de l'énergie thermique et production d'électricité photovoltaïque. Mais c'est aussi le cas pour les autres applications où les réponses techniques permettront au produit final de mieux correspondre aux besoins, voire de trouver de nouvelles applications.

Si les améliorations apportées aux systèmes complets sont plutôt liées au processus d'innovation technologique, les gains présents dans le domaine du stockage électrochimique – comme celui de la conversion photovoltaïque examiné plus précédemment – sont du ressort de la recherche amont.

Batteries en test accéléré au Genec, au CEA/Cadarache.



CEA/GENEC

Le stockage de l'électricité d'origine photovoltaïque

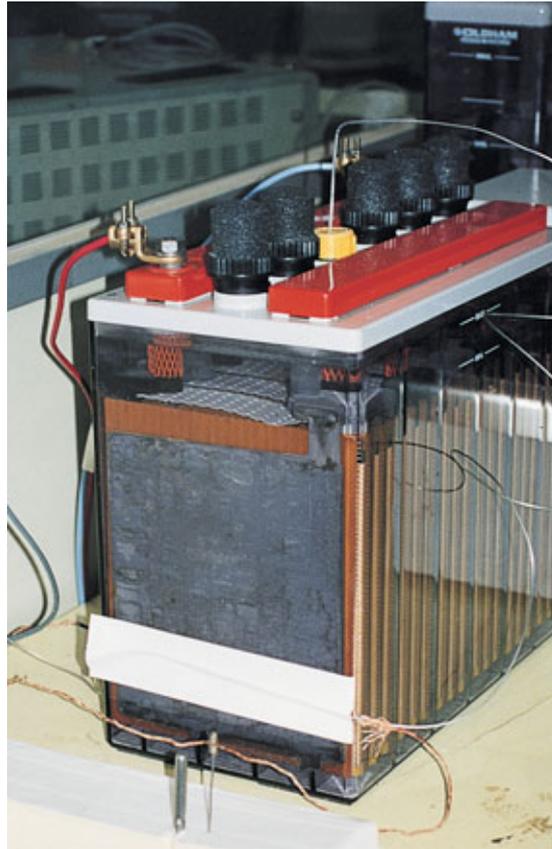
Les générateurs photovoltaïques autonomes ont besoin d'un stockage électrique pour assurer une fourniture d'énergie quasi permanente quelles que soient les séquences d'ensoleillement. Suivant les applications, cette fourniture sera assurée par exemple pendant deux à trois jours pour certains petits systèmes domestiques, et pendant une quinzaine de jours pour les applications professionnelles comme les phares et balises maritimes.

Divers types de batteries

Les différentes applications font appel à des **batteries** de technologie différente afin de garantir le service rendu. Parmi ces technologies, la batterie au plomb, bien que connue depuis plus de cent ans, offre actuellement, et pour de longues années encore, la meilleure réponse en termes de prix et de durée de vie. Certains sites où les contraintes d'exploitation et d'environnement climatique sont particulièrement sévères peuvent être équipés de batteries au nickel-cadmium mais leur coût prohibitif ne permet pas la généralisation de leur utilisation. Les nouveaux couples (lithium-ion, lithium métal hydrure) présentent des solutions intéressantes pour les applications portables de faible capacité mais sont également trop chers (encadré F, **Accumulateurs, piles et batteries : des performances en constante amélioration**).

Des expériences sont menées dans certains pays du Nord (Allemagne, Finlande) pour utiliser la **pile à combustible** comme générateur associé à un stockage conventionnel. Dans ce cas le stockage est assuré par des réserves d'hydrogène produit par des électrolyseurs alimentés à partir de générateurs photovoltaïques. Cette forme de stockage inter-saisonnier ne présente pas d'auto-décharge. Si les prix étaient suffisamment compétitifs pour compenser le faible rendement actuel de cette technologie, celle-ci permettrait de résoudre sous nos latitudes les problèmes liés à la variation de production électrique entre été et hiver.

Les systèmes autonomes utiliseront des batteries au plomb à plaques planes de type démarrage pour les installations d'une puissance crête installée proche de la centaine de watts. Les installations plus importantes seront équipées de batteries à plaques tubulaires plus adaptées au cyclage journalier mais d'un coût du kilowattheure stocké de 1,5 à 2 fois plus élevé. Ce type de batterie équipe les installations de plusieurs centaines de watts à plusieurs kilowatts crête et toutes les applications professionnelles pour des raisons de fiabilité et de sécurité



Essais sur un prototype de batterie au Genec.



CEA/GENEC

(relais hertziens de télévision et de télécommunications, phares maritimes). La batterie au plomb "étanche" est utilisée essentiellement dans des environnements contraignants ne permettant qu'une maintenance très espacée comme l'équipement de balises maritimes ou dans des installations confinées.

Le stockage dans un système photovoltaïque contribue pour une part non négligeable au coût total d'exploitation par ses remplacements successifs durant la durée de vie d'un système. En effet, suivant la technologie et l'utilisation des batteries au plomb, leur durée de vie peut varier entre 2 et 15 ans. En outre, le coût total du stockage ne suit pas la même baisse que celle obtenue sur les autres composants d'un système photovoltaïque. Un des objectifs actuels est de doubler la durée de vie des batteries bon marché de conception proche des batteries de démarrage et de prolonger à 20 ans les batteries industrielles de type stationnaire à plaques positives tubulaires. Pour ce faire, la recherche au niveau des industriels porte sur la conception de nouveaux produits plus adaptés aux contraintes des applications photovoltaïques.

Mieux gérer la vie des batteries

Un deuxième axe de travail concerne l'amélioration des systèmes de gestion de la batterie ; il s'agit de préserver celle-ci en la faisant travailler dans les domaines d'état de

charge les moins contraignants. Ces améliorations nécessitent une meilleure connaissance des dégradations observées sur site. Les travaux menés actuellement au Genec dans le cadre de contrats avec l'Ademe, EDF, la Commission européenne et les industriels, permettent d'identifier et d'étudier les paramètres influents qui sont à l'origine des mécanismes de dégradation.

Les dommages observés, sur des batteries de retour de terrain, sont essentiellement la sulfatation dure, la décohérence de la matière active et, dans une moindre mesure, la corrosion des grilles. Pour mener à bien ces travaux, le laboratoire dispose de moyens en cyclage charge-décharge, en étude électrochimique, en caractérisation optique et chimique. Les connaissances acquises permettront la modélisation de ces mécanismes et leur intégration dans des algorithmes de gestion adaptative qui évoluera en fonction des contraintes réellement subies par la batterie soumise aux conditions particulières d'exploitation. Celle-ci sera alors gérée suivant son propre état, son propre comportement et non plus en fonction de paramètres préétablis lors de son installation, ce qui contribuera fortement à l'amélioration du service rendu et à terme de la durée de vie du stockage. ●

Pascal Boulanger et Daniel Desmettre
Genec
Direction de la recherche technologique
CEA/Cadarache