

De nombreux laboratoires construisent des générateurs thermophotovoltaïques expérimentaux. Avec un radiateur qui fonctionne jusqu'à 1500 °C, on vise une puissance de trois ou quatre watts par centimètre carré de photopile.

Comment améliorer le rendement de conversion des photopiles ? Avec des cellules à jonctions multiples, on devrait théoriquement atteindre des puissances de cinq à six watts par centimètre carré (à comparer avec les dix milliwatts par centimètre carré des panneaux solaires du commerce : l'énergie solaire est très diluée) ; en pratique, on a déjà obtenu plus de un watt par centimètre carré. Dans une cellule à jonctions multiples, on superpose des couches de semi-conducteurs différents, dont la largeur de bande interdite est de plus en plus petite à mesure que l'on pénètre dans le matériau : les photons de faible énergie traversent les premières couches, mais finissent par être absorbés par une couche de faible largeur de bande interdite, et le rayonnement

émis par les radiateurs à large spectre est ainsi mieux utilisé.

Le câblage des différentes cellules du générateur détermine les performances : le courant doit circuler dans les connexions avec le moins possible de pertes d'énergie. À terme, on espère fabriquer plusieurs cellules photovoltaïques sur une même plaque de semi-conducteur, par les techniques utilisées en micro-électronique. Les coûts baisseront quand les procédés de fabrication en grande série seront au point.

Des voiliers aux verriers

Un premier générateur thermophotovoltaïque sera bientôt commercialisé : la Société JX Crystal proposera, à l'intention des marins, un appareil cylindrique, de 14 centimètres de large sur 43 centimètres de haut, alimenté avec du propane et qui produit une puissance électrique de 30 watts. Cet appareil chauffe aussi la cabine du bateau si on le souhaite. Le radiateur, en aluminium de magnésium, a un spectre

d'émission relativement large, et les cellules thermophotovoltaïques, en antimonure de gallium, sont montées en série. Plus coûteux (20 000 francs) qu'un groupe électrogène au diesel, il sera plus silencieux et plus fiable (il ne contient pas de partie mobile). Une version moins résistante à la corrosion, donc moins coûteuse, pourrait intéresser les propriétaires de camping-cars ou de maisons isolées.

Une société qui dépend du ministère américain de la Défense a aussi mis au point un prototype fonctionnant au gaz : un radiateur à spectre étroit en fibres d'oxyde d'ytterbium émet à la longueur d'onde de 980 nanomètres, et le rayonnement est converti en électricité par des photopiles en silicium. Un filtre multicouche isolant récupère l'énergie inutilisée. Des modules délivrent une puissance comprise entre 150 et 300 watts, suffisante pour l'alimentation d'un système de télécommunications ou d'ordinateurs.

Quel sera le succès industriel des générateurs thermophotovoltaïques ?

L'effet photovoltaïque

L'effet thermophotovoltaïque utilise des matériaux semi-conducteurs qui produisent de l'électricité quand ils absorbent des photons. Dans un cristal semi-conducteur, l'énergie d'un électron ne peut prendre que les valeurs contenues dans des intervalles disjoints que l'on nomme bandes d'énergie. Parmi les bandes normalement occupées par des électrons, celle dont l'énergie est la plus grande, la bande de valence, est presque pleine d'électrons, qui participent à la cohésion du cristal : engagés dans des liaisons chimiques, ces électrons ne se déplacent que sur de courtes distances. La bande de valence est séparée de la bande d'énergie immédiatement supérieure, la bande de conduction, par une « bande interdite », inaccessible aux électrons. Lorsqu'un électron de la bande de valence reçoit une énergie au moins égale à la largeur de la bande interdite, il passe dans la bande de conduction et devient libre de se déplacer dans le cristal. Il laisse localement, derrière lui, une charge positive que l'on nomme trou et que l'on peut considérer comme une particule chargée positivement et capable de se déplacer dans le matériau.

Un cristal semi-conducteur parfait contiendrait autant d'électrons dans la bande de conduction que de trous dans la bande de valence. En pratique, on ajoute des impuretés pour modifier la proportion de trous et d'électrons dans le cristal. Quand le semi-conducteur possède davantage d'électrons

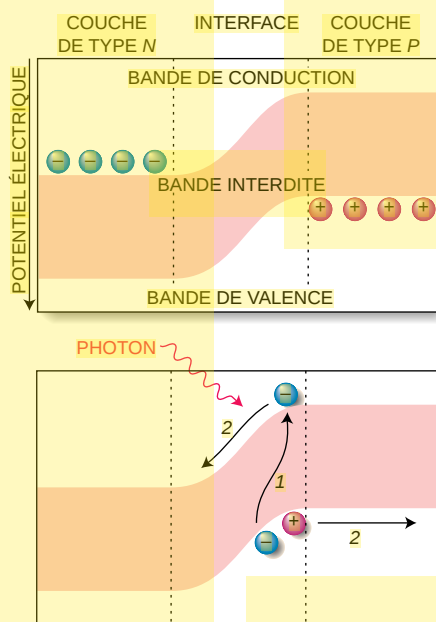
dans la bande de conduction que de trous dans la bande de valence, il est de type *n* (pour « négatif »). Dans le cas contraire, il est de type *p* (pour « positif »).

Quand on met en contact un semi-conducteur de type *n* avec un semi-conducteur de type *p*, on forme une jonction *n-p*. Les charges électriques libres, dans les deux matériaux (électrons du côté *n* et trous du côté *p*), se dirigent vers la jonction, où elles se recombinaient en partie, laissant le cristal chargé électriquement de part et d'autre : ces charges créent une différence de potentiel à la jonction (voir la figure, en haut).

Quand un photon d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite est absorbé près de la jonction, il fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et engendre aussi un trou dans la bande de valence (voir la figure, en bas, 1). Le champ électrique qui règne à la jonction entraîne le trou vers le semi-conducteur de type *p* et l'électron vers le semi-conducteur de type *n* : un courant électrique apparaît (2).

Les cellules thermophotovoltaïques ont une largeur de bande interdite bien différente de celle des photopiles solaires.

Tandis que la largeur de bande interdite des matériaux utilisés pour ces dernières est de 1 à 1,5 électronvolt, elle atteint 0,5 à 0,7 électronvolt pour les cellules thermophotovoltaïques, qui absorbent ainsi efficacement le rayonnement infrarouge.



Ils pourraient d'abord occuper des niches, spécialisées mais lucratives. Ainsi, la récupération de la chaleur dissipée par de nombreux procédés industriels (fabrication du verre, de l'aluminium ou de l'acier) est un marché important. Dans l'industrie du verre, les deux tiers de l'énergie consommée sont aujourd'hui perdus en chaleur : pour l'ensemble des verriers, une puissance de un milliard de watts est ainsi gaspillée ! Les générateurs thermophotovoltaïques, en transformant cette chaleur en électricité, permettraient de substantielles économies. Dans le domaine des transports, on peut aussi imaginer que des véhicules électriques hybrides emportent, outre leur moteur à explosion, un convertisseur thermophotovoltaïque : un prototype a été présenté, avec un générateur de dix kilowatts.

Aujourd'hui, 100 à 250 millions de francs sont investis chaque année dans la mise au point de générateurs thermophotovoltaïques. Une étude de marché récente indique qu'ils rapporteraient trois milliards de francs en 2005, surtout grâce au remplacement des groupes électrogènes de moins de deux kilowatts utilisés par les militaires, et dans les camping-cars et les voiliers. D'autres utilisations apparaîtront sans doute ensuite, mais les évolutions sont imprévisibles : lorsqu'il fonda la Société IBM, Thomas Watson n'imaginait pas que l'informatique bouleverserait le monde.

Timothy COUTTS est chercheur au Laboratoire américain des énergies renouvelables. Mark FITZGERALD dirige la Société *Science Communications*.

Timothy COUTTS et John BENNER, *The First NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, in *AIP Conference Proceedings*, vol. 321, AIP Press, 1995.

The Second NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity, sous la direction de John Benner, Timothy Coutts et David Ginley, in *AIP Conference Proceedings*, vol. 358, AIP Press, 1996.

The Third NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity, sous la direction de Timothy Coutts, Carole Allman et John Benner, in *AIP Conference Proceedings*, vol. 401, AIP Press, 1997.
