

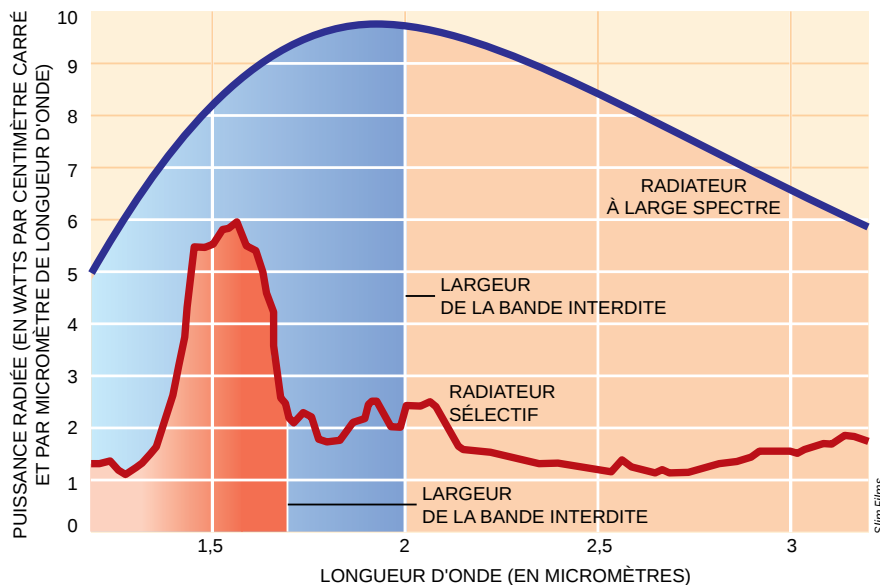
interdite du semi-conducteur : tous les photons seraient ainsi absorbés, et ils n'échaufferaient pas le semi-conducteur (un électron du semi-conducteur qui reçoit une énergie supérieure à la largeur de la bande interdite cède rapi-

dement la différence au cristal sous forme de chaleur).

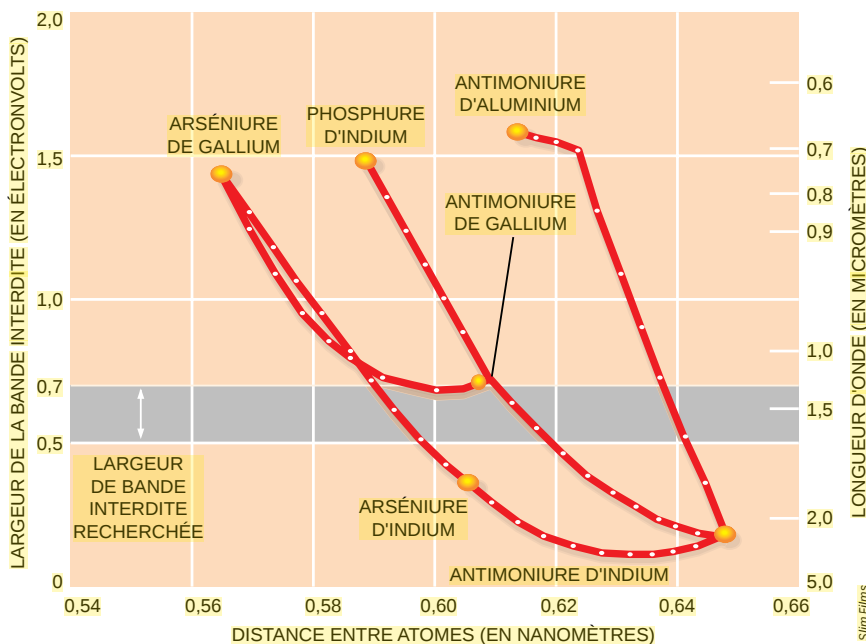
Les premiers générateurs thermophotovoltaïques associaient des radiateurs à spectre d'émission étroit, en oxyde d'ytterbium par exemple,

à des photopiles en silicium (dont l'énergie de bande interdite est de 1,14 électronvolt). Ils n'ont toutefois jamais été très puissants, car les radiateurs émettent trop peu de photons à l'énergie utile pour la conversion par le silicium (voir la figure 3) : il faut chauffer jusqu'à des températures de 2 000 °C pour que l'intensité de l'émission soit suffisante, ce qui endommage le matériau du radiateur et les autres éléments du système, réduisant leur durée de vie. Enfin, à ces températures élevées, le brûleur risque aussi d'émettre des oxydes d'azote, qui polluent l'atmosphère.

Aujourd'hui, on sait fabriquer des semi-conducteurs à bande interdite plus étroite, de 0,5 à 0,7 électronvolt (voir la figure 4), que l'on associe à des radiateurs à large spectre d'émission. Ces derniers, en carbure de silicium par exemple, fonctionnent efficacement à des températures inférieures à 1 000 °C.



3. LES RADIATEURS émettent soit dans une bande étroite de longueurs d'onde (radiateurs sélectifs), soit dans un spectre plus large (radiateurs à large spectre). Les radiateurs sélectifs, fabriqués avec des éléments chimiques de la famille des terres rares, produisent moins de photons d'énergie égale ou supérieure à celle de la bande interdite du convertisseur semi-conducteur, ceux dont l'énergie est transformée en électricité (zone rouge). Au contraire, les radiateurs à bande large émettent plus d'énergie récupérable par le convertisseur photovoltaïque (en bleu). Les photons dont l'énergie est inférieure (à droite de la bande interdite) perdent leur énergie sous forme de chaleur.



4. DES ALLIAGES en diverses proportions (points sur les lignes rouges) de différents éléments des troisième et cinquième colonnes du tableau périodique des éléments ont des largeurs de bande interdite très différentes (la largeur de bande interdite est la quantité d'énergie qu'il faut fournir à un électron pour qu'il participe au courant électrique). Des largeurs de bande interdite comprises entre 0,5 et 0,7 électronvolt (en gris) sont idéales pour les générateurs thermophotovoltaïques et correspondent à des longueurs d'ondes infrarouges de plus en plus courtes du radiateur. Le calcul de la distance entre les atomes voisins (en abscisse) permet aux chimistes de mélanger des matériaux de structures cristallines différentes.

La récupération des photons

Aucun générateur thermophotovoltaïque ne convertit toutefois toute l'énergie infrarouge en électricité : les photons dont l'énergie est inférieure à la largeur de la bande interdite ne sont pas absorbés par le semi-conducteur. Leur énergie, transformée en chaleur, serait perdue si on ne les récupérait pas. On ajoute donc un réflecteur qui renvoie ces photons vers le radiateur, qu'ils contribuent à maintenir à la bonne température.

Plusieurs types de réflecteurs ont été proposés. Ainsi, une grille métallique placée devant le semi-conducteur ne laisserait passer que les photons d'énergie suffisante et réfléchirait les autres. On peut aussi placer une couche d'or à l'arrière du semi-conducteur : elle réfléchit les photons qui n'ont pas été absorbés. Pour éviter l'absorption de photons de faible énergie par le semi-conducteur, Scott Ward et Mark Wanlass, du Laboratoire américain des énergies renouvelables, ont construit une photopile en couche mince sur un substrat de phosphore d'indium semi-isolant, qui contient très peu d'électrons capables d'absorber. Les photons d'énergie inférieure à la largeur de la bande interdite de la photopile traversent ainsi le substrat avec un faible risque d'être absorbés, et la plupart atteignent la couche d'or, qui les réfléchit vers le radiateur.

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 aluminate 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 recombinent 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.

