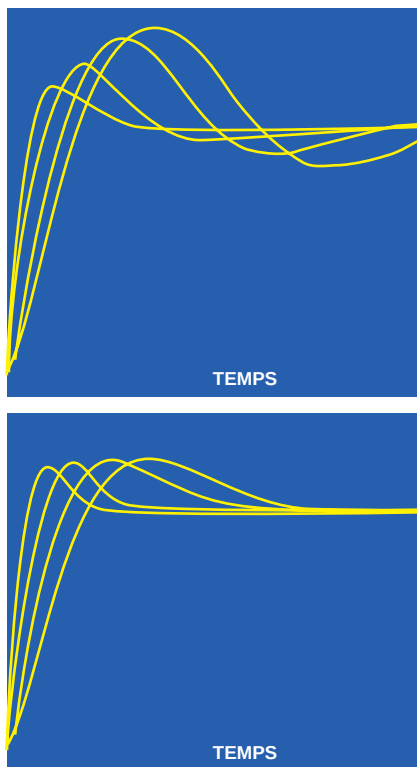




8. L'AMORTISSEMENT assuré par une suspension Crone (en bas) ne dépend pas de la charge de la voiture, contrairement à l'amortissement classique (en haut). Sur ces diagrammes, on a indiqué la réaction à une sollicitation de la roue de type marche. La suspension Crone, de surcroît, limite l'amplitude des oscillations.

les deux premières cellules une autre cellule RC série dont la résistance est divisée par r^2 et la capacité par c^2 .

Après avoir ainsi disposé une dizaine de cellules, on obtient un circuit qui présente un comportement de dérivation non entière sur une plage de fréquences extrêmement large : quand on applique une tension sinusoïdale à un tel circuit, le courant est déphasé d'une valeur qui dépend des paramètres r et c et qui reste constante sur dix millions de hertz (généralement, les circuits qui déphasent les signaux électriques ont un comportement qui dépend fortement de la fréquence).

Les rapports constants r et c , entre les résistances et les capacités des cellules consécutives, sont nommés facteurs récursifs ; ils déterminent l'ordre non entier n de dérivation entre la tension et le courant, qui s'exprime en l'occurrence par la relation $n = \log(r)/\log(rc)$. La disposition récursive des résistances et des capacités se traduit par une distribution récursive des constantes de temps et des modes de relaxation.

Plus généralement, la dispersion des dynamiques qu'entraîne la récur-

sivité est à l'origine du caractère stabilisant du désordre dans la nature. C'est donc la récursivité qui est le maître phénomène : c'est la particularité du désordre qu'il convient d'exploiter judicieusement dans la conception des systèmes dynamiques, notamment en retenant la notion de récursivité de nature non fractale.

Digues et suspension

Afin de transposer directement ces résultats à des systèmes d'amortissement mécanique, nous avons étudié le comportement de digues poreuses. Les cavités du milieu poreux que constitue la digue forment comme un ensemble de branches composées chacune d'un canal et d'une alvéole (voir la figure 7).

Le modèle hydraulique simplifié de l'interface eau-digue est analogue à l'arrangement en parallèle de cellules RC série : une distribution récursive des pertes d'énergie dans les canaux se traduit par une distribution récursive des résistances hydrauliques, et une distribution récursive des énergies potentielles d'élasticité dans les alvéoles se traduit par une distribution récursive des capacités hydrauliques.

Autrement dit, le modèle hydraulique est l'analogue exact du système parallèle récursif de cellules RC série envisagé précédemment : l'ordre non entier de dérivation, entre le débit de l'eau et la pression P à l'interface eau-digue, est déterminé par les rapports constants r et c entre les résistances hydrauliques et les capacités hydrauliques de deux cellules consécutives.

Pour passer de la digue poreuse à la suspension Crone, il suffit de tourner d'un quart de tour la représentation de la digue, de mettre l'eau en

mouvement par un piston lié à la roue, de remplacer l'eau par de l'huile. On obtient ainsi le schéma de principe de la version hydropneumatique de la suspension Crone.

Trois cellules au moins sont nécessaires pour définir des rapports constants entre les coefficients de frottement visqueux et les raideurs des amortisseurs et des ressorts de deux cellules consécutives. En pratique, trois cellules sont suffisantes pour couvrir la plage des fréquences qui comprend la fréquence propre de la caisse, qui est de l'ordre du hertz (une oscillation par seconde), et la fréquence propre de la roue, comprise entre 15 et 20 hertz. La récursivité des coefficients de frottement visqueux est assurée par des trous de laminage de diamètres différents. Quant à la récursivité des raideurs, elle est assurée par des sphères où du gaz est placé à des pressions différentes (de la sorte, on peut utiliser des sphères toutes de même taille).

Pour une masse suspendue variant d'un facteur six, entre 150 et 900 kilogrammes, la figure 8 illustre, comparativement à une suspension classique, les réactions de la caisse à une sollicitation de type marche de la roue. Ces réactions montrent que le premier dépassement et l'amortissement restent constants, traduisant une bien meilleure robustesse de la suspension Crone.

Nous avons cherché à valoriser l'approche conceptuelle ainsi mise au point en l'appliquant au secteur automobile. En collaboration avec le groupe PSA, nous avons implanté la suspension Crone sur une Citroën BX expérimentale. Notre réalisation a été récompensée par le trophée AFCT'95, qui distingue la meilleure innovation technique dans le cadre des relations université-industrie.

Alain OUSTALOUP est directeur adjoint du Laboratoire d'automatique et de productique de l'Université de Bordeaux I et de l'ENSERB. Il a reçu la médaille d'argent du CNRS en 1997.

Alain OUSTALOUP, *La commande Crone*, Éditions Hermès, Paris, 1991.

Alain OUSTALOUP, *La dérivation non entière : théorie, synthèse et applications*, Éditions Hermès, Paris, 1995.

A. OUSTALOUP, B. MATHIEU et P. LANUSSE, *The Crone Control of Resonant Plants : Application to a Flexible*

Transmission, in *European Journal of Control*, vol. 1, n° 2, pp. 113-121, Éditions Springer, 1995.

A. OUSTALOUP, X. MOREAU et M. NOUILLANT, *The Crone Suspension*, in *Control Engineering Practice*, vol. 4, n° 8, pp. 1101-1108, 1996.

A. OUSTALOUP, F. LEVRON, F. NANOT et B. MATHIEU, *Frequency Band Complex Non Integer Derivator : Characterization and Synthesis*, in *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, à paraître.

Des photopiles sans soleil

TIMOTHY COUTTS • MARK FITZGERALD

Les générateurs thermophotovoltaïques transforment directement la chaleur radiante en électricité. Ils remplaceront bientôt les groupes électrogènes et permettront des économies d'énergie dans de nombreuses industries.

Les systèmes photovoltaïques transforment la lumière solaire, abondante, non polluante et gratuite, en électricité. Par le même phénomène physique, les générateurs thermophotovoltaïques produisent de l'électricité à partir du rayonnement infrarouge, produit par exemple par la combustion d'hydrocarbures.

Encore peu connue, la génération thermophotovoltaïque a plusieurs avantages. Elle fonctionne de nuit, ou quand le ciel est couvert. Son rendement énergétique est supérieur à celui des groupes électrogènes à moteur. Enfin, dépourvus de pièces mobiles, les générateurs thermophotovoltaïques sont silencieux et fiables, et ils ne requièrent que peu d'entretien.

Ces systèmes n'ont pas connu le même succès que les photopiles solaires. Pourtant, dès 1956, à l'École normale supérieure, Pierre Aigrain avait décrit quelques principes de base de ces générateurs et, au début des années 1960, l'armée américaine en fabriqua même des prototypes. Le rendement, inférieur à un pour cent, était insuffisant pour l'armée, qui estimait avoir besoin d'un rendement d'au moins 10 à 15 pour cent.

Les performances ont été améliorées à la fin des années 1970 et au début des années 1980, mais on n'a fabriqué que récemment les matériaux nécessaires à une conversion efficace de la chaleur en électricité. Aujourd'hui, des prototypes fonctionnent, et le premier générateur thermophotovoltaïque sera bientôt commercialisé, pour l'alimentation électrique de voiliers ou d'habitations isolées. On envisage aussi d'utiliser ces générateurs dans des automobiles : l'énergie électrique ainsi produite s'ajouterait à l'énergie mécanique donnée par le moteur à explosion. En outre, des ingénieurs étudient

l'emploi de tels systèmes pour la récupération de la chaleur dissipée par de nombreux procédés industriels.

Du brûleur à l'électricité

Un générateur thermophotovoltaïque est constitué de quatre éléments principaux. Une source de chaleur chauffe un radiateur, qui émet alors un rayonnement infrarouge. Des photopiles semi-conductrices transforment ensuite ce rayonnement en électricité. Enfin, l'énergie inutilisée est renvoyée vers le radiateur ou récupérée, pour chauffer une pièce par exemple.

Quelle source de chaleur utiliser ? Il existe *a priori* trois possibilités : la combustion d'hydrocarbures, l'énergie solaire ou la fission nucléaire. La plupart des générateurs dont on prépare la fabrication industrielle sont chauffés par des hydrocarbures, parce que cette source d'énergie est facilement disponible et d'emploi flexible. De grands concentrateurs solaires pourraient alimenter des générateurs thermophotovoltaïques, mais on commence à peine la mise au point de systèmes domestiques et l'adaptation de systèmes de stockage de la chaleur, en vue d'une restitution nocturne. Enfin, l'utilisation de combustible nucléaire serait réservée aux missions spatiales, dans des zones où l'intensité du rayonnement lumineux naturel ne permet pas l'emploi de photopiles.

Les combustibles fossiles ont un autre avantage : des brûleurs efficaces ont déjà été mis au point pour le séchage industriel du papier, des encres, des peintures ou des produits agricoles. Ces brûleurs comportent des grilles métalliques ou des récipients en céramique, qui sont chauffés par la combustion des hydrocarbures. Les éléments rayonnants ont une grande

surface totale et ils sont portés à des températures supérieures à 1 000 °C.

Les éléments chauffés émettent de l'énergie sous la forme de rayonnement infrarouge (qui chauffe les matériaux avec lesquels il interagit). Toutefois, ce rayonnement a des longueurs d'onde variées, et les intensités aux différentes longueurs d'onde varient beaucoup au cours du temps, en raison des instabilités de la flamme : aucune photopile ne peut les convertir efficacement en électricité. On interpose donc un radiateur qui absorbe le rayonnement émis par le brûleur et réémet un rayonnement d'énergie totale équivalente, mais concentré dans une gamme de longueurs d'onde plus étroite.

Ce radiateur est souvent une surface, plane ou arrondie, ou un réseau de minuscules filaments. Selon les matériaux qui le composent, il émet dans un intervalle de longueurs d'onde assez étroit (pour l'yttrbium, l'erbium et l'holmium) ou plutôt large (pour le carbure de silicium).

Les photopiles produisent de l'électricité si elles absorbent efficacement le rayonnement infrarouge provenant du radiateur. La caractéristique déterminante du matériau semi-conducteur qui compose les photopiles est sa «largeur de bande interdite», c'est-à-dire l'énergie que l'on doit fournir à un électron pour qu'il participe au courant électrique. Ainsi on doit choisir les semi-conducteurs pour que l'énergie des photons qui composent le rayonnement infrarouge (les photons sont les particules qui composent les rayonnements électromagnétiques) soit supérieure ou égale à la largeur de bande interdite (voir l'encadré de la page 92).

Idéalement, le radiateur devrait émettre des photons dont l'énergie est comprise dans un intervalle étroit, peu supérieur à la largeur de la bande

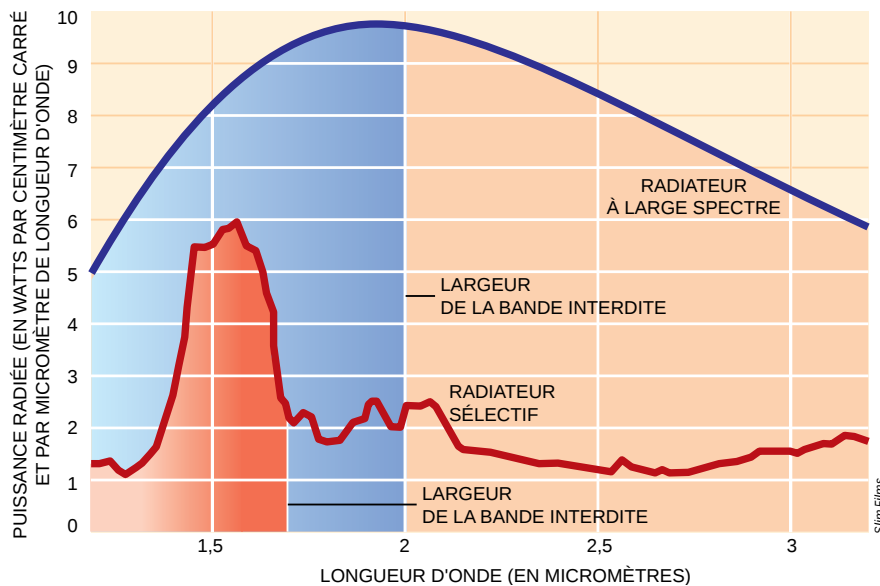
interdite du semi-conducteur : tous les photons seraient ainsi absorbés, et ils n'échaufferaient pas le semi-conducteur (un électron du semi-conducteur qui reçoit une énergie supérieure à la largeur de la bande interdite cède rapi-

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.

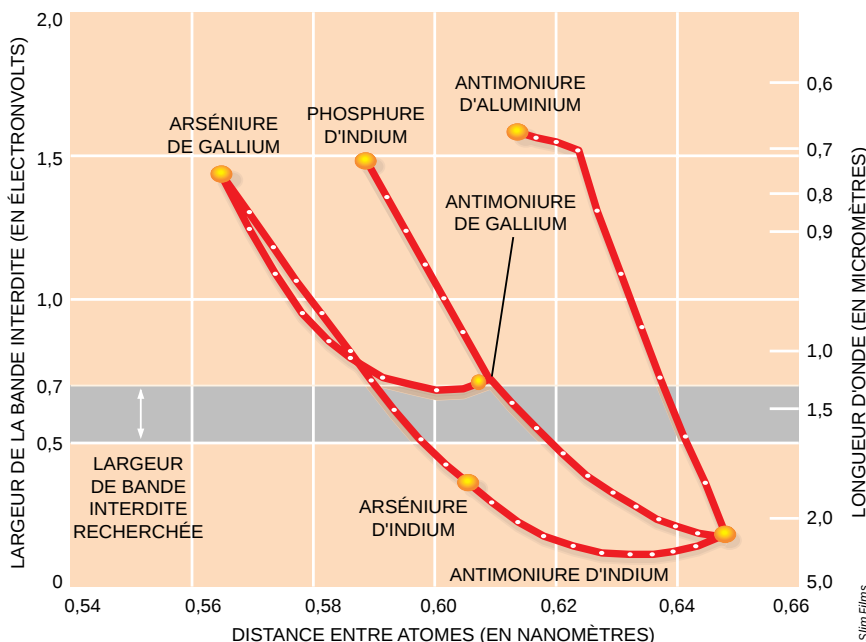


3. LES RADIATEURS émettent soit dans une bande étroite de longueurs d'onde (radiateurs sélectifs), soit dans un spectre plus large (radiateurs à large spectre). Les radiateurs sélectifs, fabriqués avec des éléments chimiques de la famille des terres rares, produisent moins de photons d'énergie égale 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.

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.



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.

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 »).

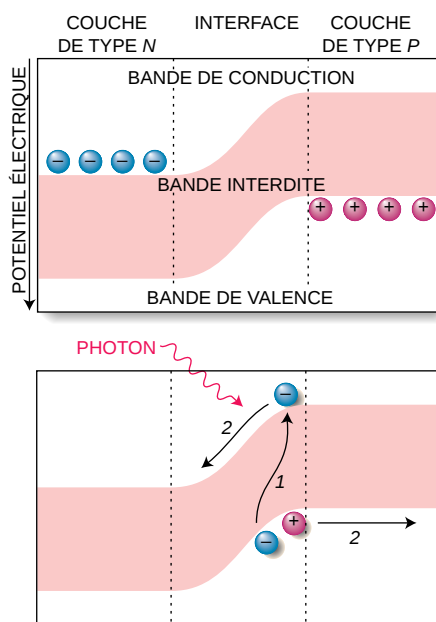
Quand on met en contact un semi-conducteur de type *n* avec

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 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.
