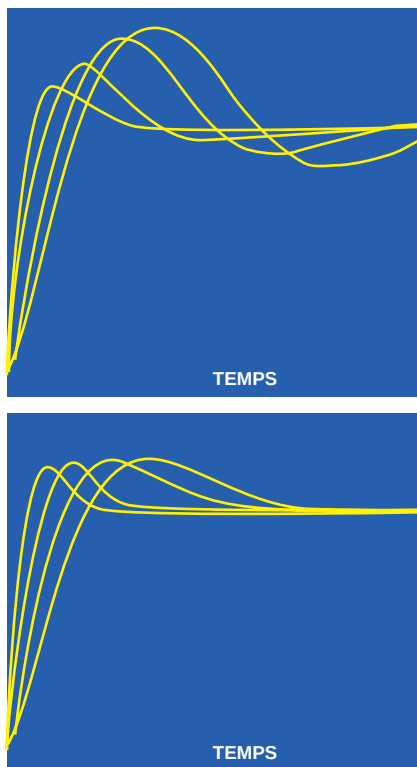




8. L'AMORTISSEMENT assuré par une suspension Crone (en bas) ne dépend pas de la charge de la voiture, contrairement à l'amortissement classique (en haut). Sur ces diagrammes, on a indiqué la réaction à une sollicitation de la roue de type marche. La suspension Crone, de surcroît, limite l'amplitude des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

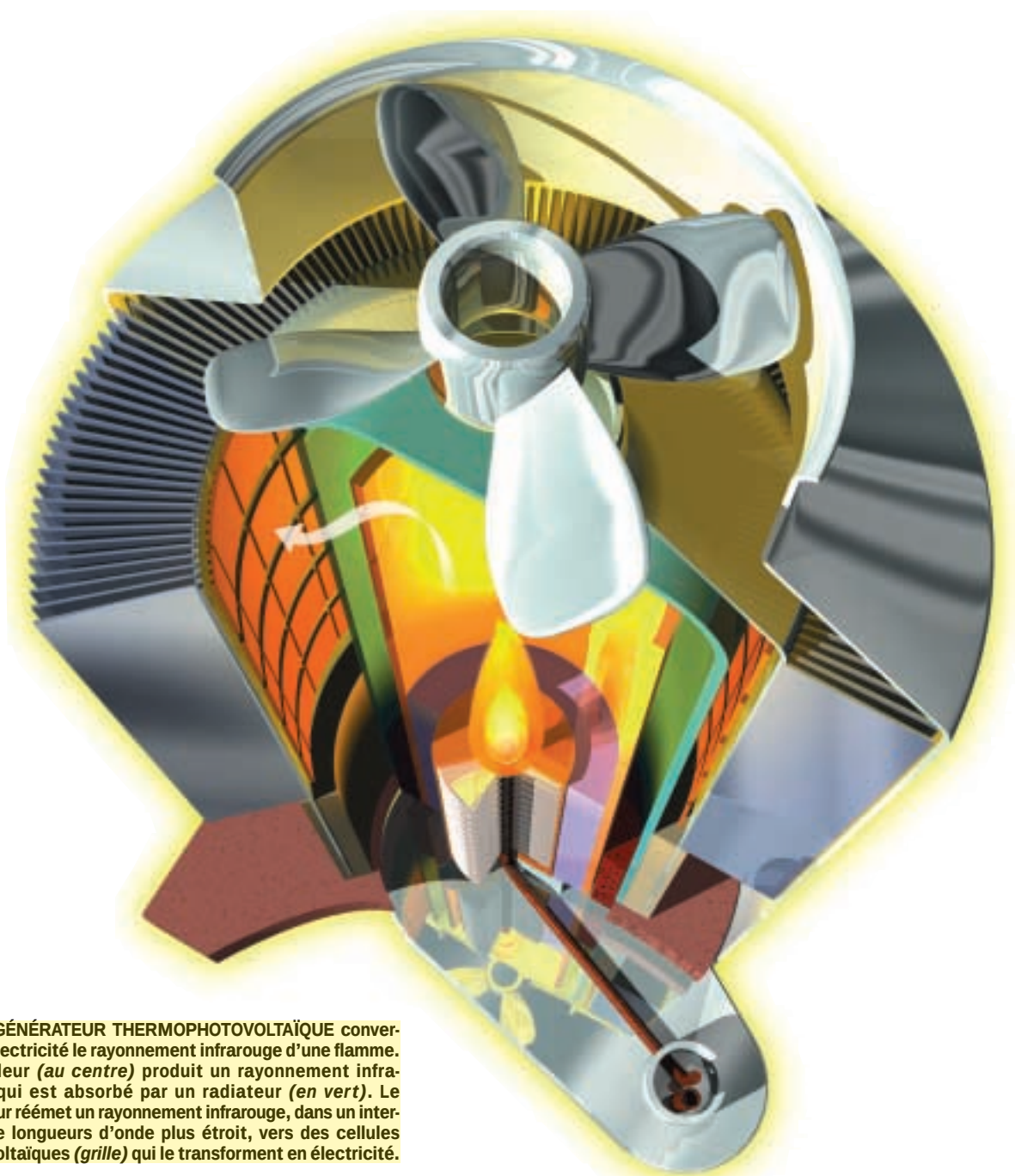
surface totale et ils sont portés à des températures supérieures à 1 000 °C.

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'ytterbium, l'erbium et l'holmium) ou plutôt large (pour le carbure de silicium).

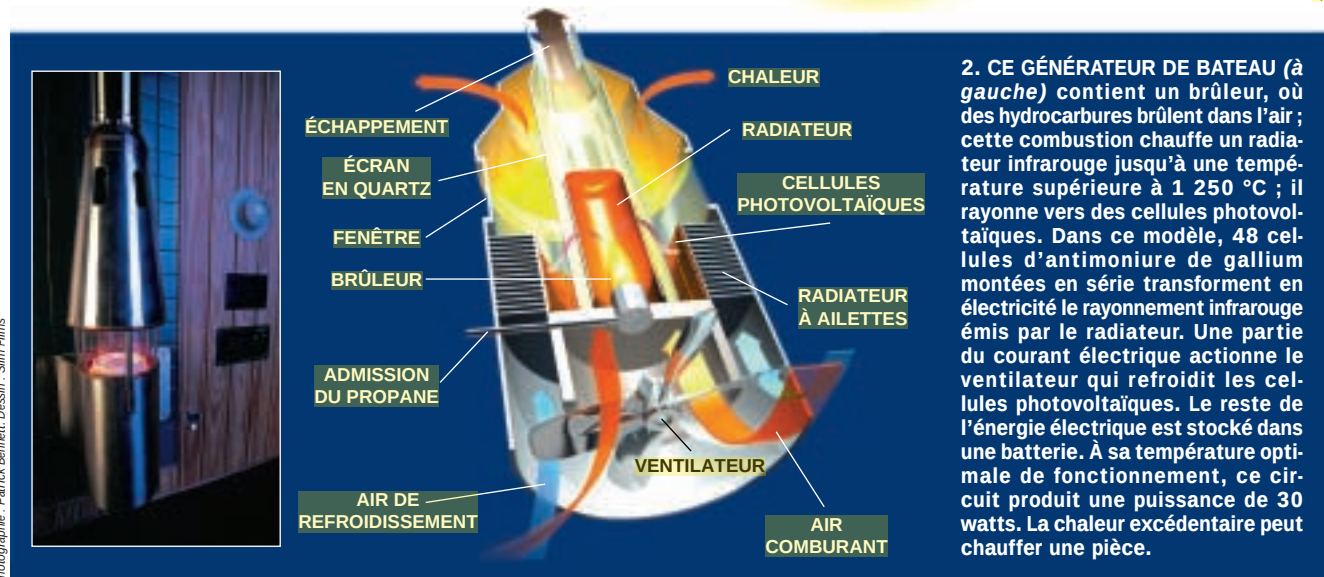
Les photopiles produisent de l'électricité si elles absorbent efficacement le rayonnement infrarouge provenant du radiateur. La caractéristique déterminante du matériau semi-conducteur qui compose les photopiles est sa « largeur de bande interdite », c'est-à-dire l'énergie que l'on doit fournir à un 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



1. UN GÉNÉRATEUR THERMOPHOTOVOLTAÏQUE convertit en électricité le rayonnement infrarouge d'une flamme. Un brûleur (au centre) produit un rayonnement infrarouge qui est absorbé par un radiateur (en vert). Le radiateur réémet un rayonnement infrarouge, dans un intervalle de longueurs d'onde plus étroit, vers des cellules photovoltaïques (grille) qui le transforment en électricité.

Slim Films



Photographie : Patrick Bennett. Dessin : Slim Films