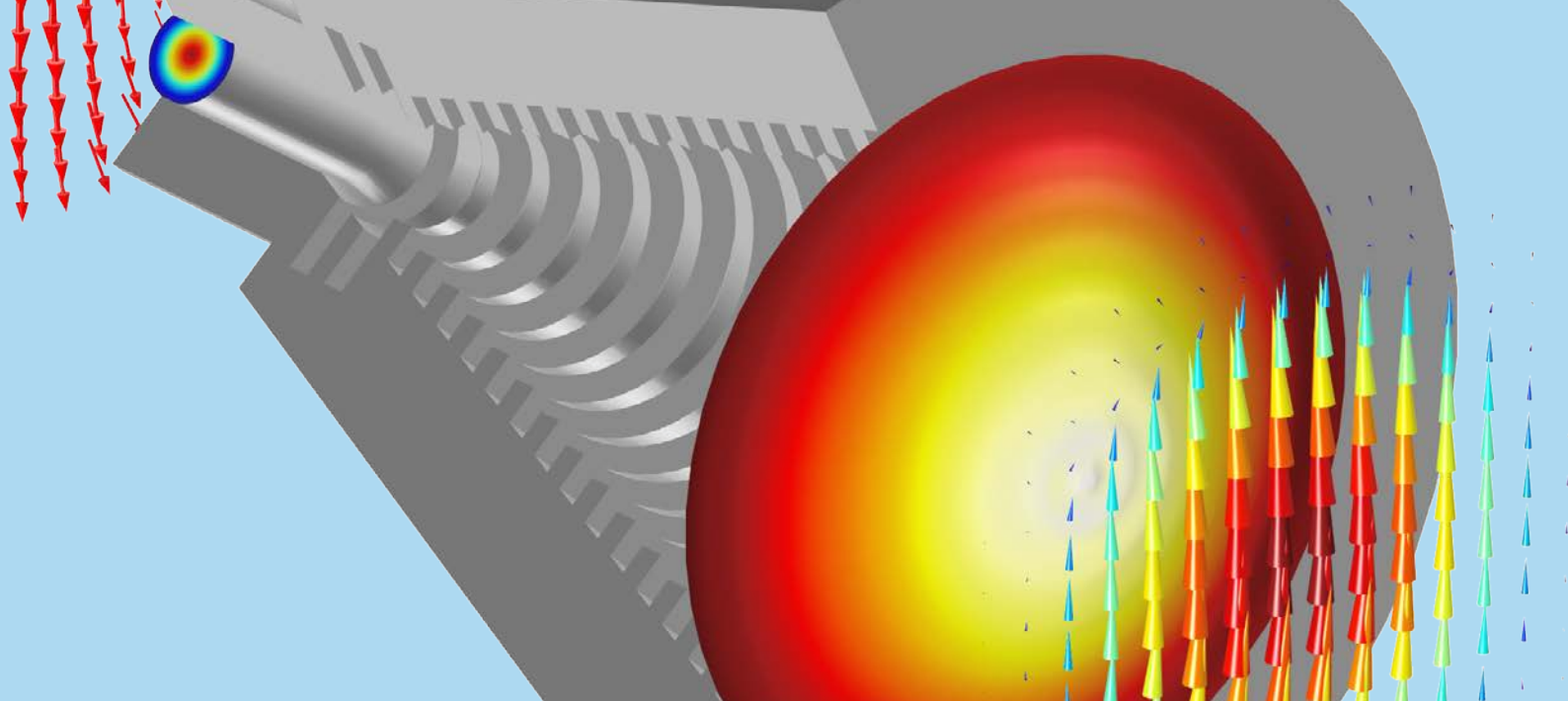




LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

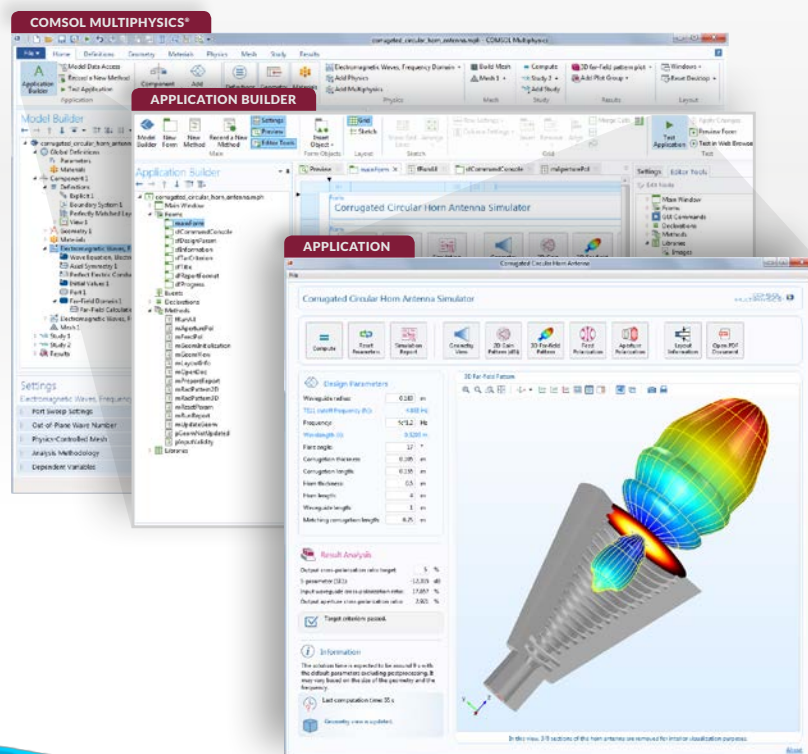
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

Des applis spécialisées sont désormais développées par les spécialistes en simulation avec l'application Builder de COMSOL Multiphysics®.

Une installation locale de COMSOL Server™, permet de diffuser les applis dans votre organisme et dans le monde entier.

Faites bénéficier à plein votre organisme de la puissance de l'outil numérique.

comsol.fr/application-builder



IDÉES DE PHYSIQUE

Quand la chaleur devient électricité

Au sein des matériaux conducteurs, le transport d'énergie et celui des charges électriques sont liés. L'effet Seebeck, où un écart de températures engendre un courant électrique, en est une conséquence. Il permet de concevoir des moteurs d'un type nouveau.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Finale 2013 du Google Science Fair, le concours international scientifique et technologique organisé par Google pour les 13-18 ans : Ann Makosinski, une adolescente canadienne de 16 ans, reçoit un prix pour la conception d'une lampe de poche qui puise son énergie uniquement dans la chaleur de la paume de la main. Le cœur de son dispositif est constitué par des modules thermoélectriques, qui permettent de générer de l'électricité à partir d'une différence de température – ici entre la peau et l'air ambiant. Comment fonctionnent ces éléments et peut-on en envisager une utilisation moins anecdotique ?

En 1834, le physicien français Jean-Charles Peltier a mis en évidence un effet surprenant associant électricité et chaleur et qui a, depuis, pris son nom. Lorsqu'un courant électrique traverse une soudure reliant deux métaux différents, cette dernière absorbe ou dégage de la chaleur, selon le sens du courant.

Machines thermiques sans éléments mobiles

Dans ce phénomène, la puissance thermique absorbée ou dégagée est proportionnelle à l'intensité du courant. L'effet Peltier diffère donc de l'effet Joule, qui consiste en un dégagement de chaleur dont la puissance est proportionnelle au carré de l'intensité.

Grâce à l'effet Peltier, on peut réaliser une machine thermique très fiable, sans pièce mobile ni écoulement de fluide. Il suffit de construire un circuit électrique fermé où se succèdent un fil d'un métal A, un fil d'un métal B, un fil d'un métal A et une source

L'effet Peltier : un dégagement ou une absorption de chaleur au niveau d'une soudure traversée par un courant

de tension électrique. Lorsque le courant circule, une soudure s'échauffe tandis que l'autre se refroidit. Las, les performances en termes de flux thermique étant limitées, l'utilisation de tels modules à effet Peltier a été réservée à des applications particulières, notamment en réfrigération.

Comment s'explique l'effet Peltier ? Au sein des métaux, des électrons dits de conduction sont libres de se déplacer, ce qui rend aisément possible le passage d'un courant électrique. À basse température, les électrons remplissent successivement tous les niveaux d'énergie disponibles à partir du niveau le plus bas. L'énergie maximale atteinte, appelée énergie de Fermi, dépend du matériau. Que se passe-t-il alors quand on met en contact deux métaux différents ? Des électrons passent du métal où les énergies sont les plus élevées à celui où les énergies

sont plus basses, jusqu'à ce que les deux niveaux les plus hauts s'égalisent. Autrement dit, l'un des matériaux se charge positivement, tandis que l'autre se charge négativement. Ce transfert de charges, produit par le simple contact des deux métaux, crée ainsi une différence de potentiel électrique, de l'ordre du volt : c'est l'effet Volta.

Et si la température n'est pas très basse ? Dans ce cas, certains électrons sont excités thermiquement, c'est-à-dire qu'ils quittent leur niveau initial pour occuper un niveau d'énergie supérieure au niveau de Fermi. Ces excitations et la façon dont se répara-

tissent en énergie les électrons au-dessus du niveau de Fermi dépendent de la nature du métal. Quand on force le transfert d'électrons d'un métal à l'autre en imposant un courant électrique, l'énergie moyenne des électrons change et il apparaît une discontinuité dans le courant d'énergie au niveau du contact, équivalente à une différence de potentiel de l'ordre du millivolt. Cette discontinuité se traduit par un dégagement ou une absorption de chaleur, dont la puissance est proportionnelle au nombre de charges qui passent, donc à l'intensité. C'est l'effet Peltier.

Cette interprétation microscopique nous éclaire sur un effet inverse : la production d'un courant à partir d'une différence de température. Prenons un fil de métal et portons ses extrémités à des températures différentes. Du côté chaud, les électrons libres seront plus excités thermiquement

■ LES AUTEURS



Jean-Michel COURT et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique

que du côté froid ; ils auront donc un écart moyen d'énergie, par rapport au niveau de Fermi, plus élevé : spontanément, ils s'écouleront du chaud vers le froid.

Dans un fil isolé, ce transfert de charges provoqué par l'écart de températures fait apparaître une différence de potentiel qui augmente jusqu'à ce que le champ électrique qui en résulte stoppe les mouvements des charges. Avec un fil fait d'un autre matériau, la différence de potentiel produite atteint une autre valeur. Par conséquent, si l'on boucle le circuit des deux fils, la différence de potentiel totale au bout d'un tour du circuit n'est pas nulle : un courant circule donc.

L'effet Seebeck, inverse de l'effet Peltier

Ainsi, on obtient un générateur électrique juste en portant les soudures des deux fils à des températures différentes. C'est l'effet Seebeck, découvert par le physicien allemand Thomas Seebeck en 1823, une dizaine d'années avant la mise en évidence de l'effet Peltier.

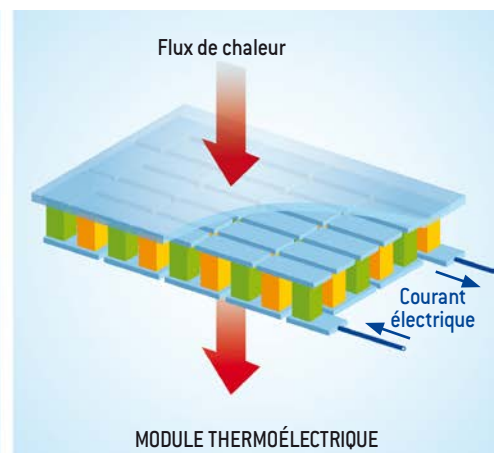
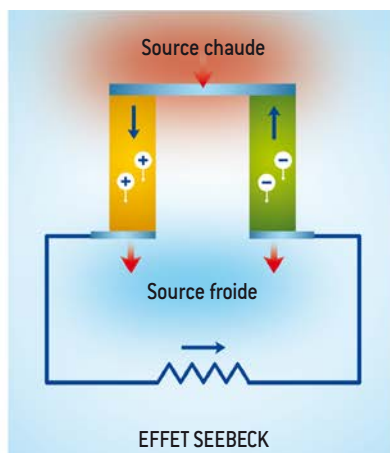
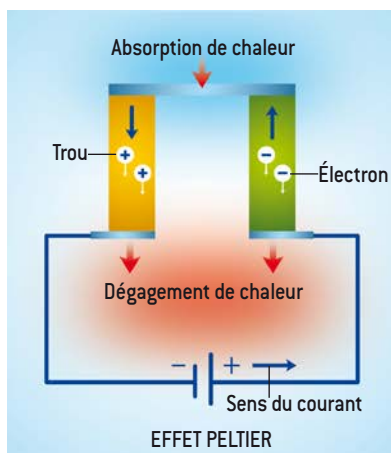
On peut tirer profit de l'effet Seebeck pour concevoir des modules thermoélectriques qui génèrent de l'électricité à partir de deux sources de chaleur de températures différentes. L'efficacité de ces modules ne dépend que d'une grandeur unique, le « facteur de

mérite », lequel est proportionnel au pouvoir thermoélectrique du matériau divisé par le produit de sa résistivité électrique et de sa conductivité thermique. La tentation est grande de prendre des métaux, très conducteurs, donc de faible résistivité. Malheureusement, leur pouvoir thermoélectrique est faible et leur conductivité thermique élevée.

En fait, ces trois grandeurs – pouvoir thermoélectrique, résistivité électrique et conductivité thermique – ne sont jamais indépendantes, car elles sont intimement liées à la structure électronique du matériau. Les recherches dans ce domaine restent donc très actives pour trouver le meilleur compromis en fonction des conditions d'utilisation, notamment la température.

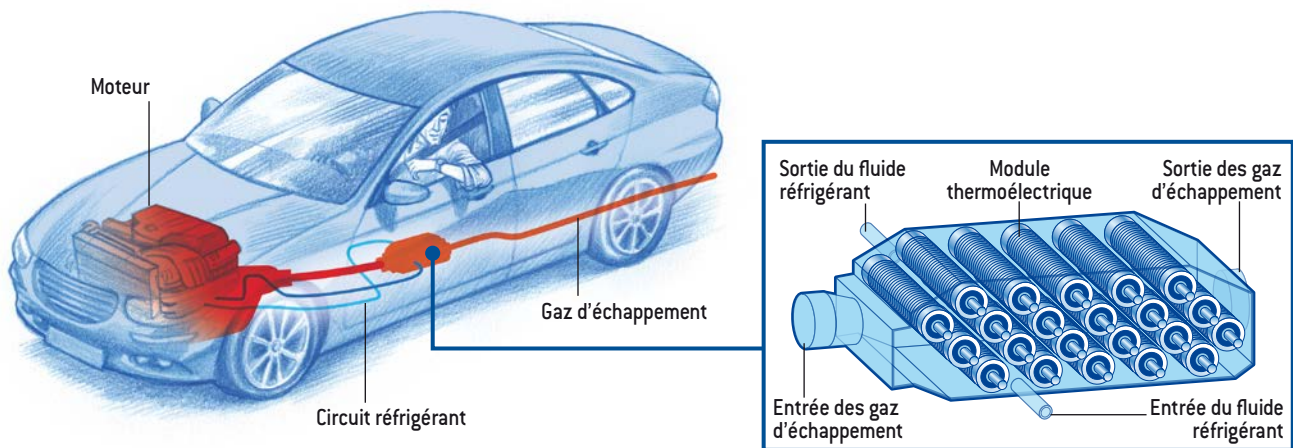
Bien souvent, les modules sont constitués de semi-métaux ou de semi-conducteurs fortement dopés. L'un des deux éléments du module est un matériau dopé de type n , où la conduction est assurée par les électrons (de charge négative, d'où le « n »), l'autre de type p , où la conduction est assurée par les trous, de charge positive (un trou correspond à l'absence d'un électron), et où le pouvoir thermoélectrique est de signe opposé. En les associant, on obtient la boucle de courant souhaitée (voir la figure ci-dessous).

Les sondes spatiales qui s'éloignent trop du Soleil pour que les panneaux photovoltaïques



L'EFFET PELTIER PEUT ÊTRE UTILISÉ comme un effet réfrigérant (à gauche) : traversée par un courant électrique, la jonction entre deux barreaux faits de semi-conducteurs différents absorbe de la chaleur, laquelle est évacuée aux autres extrémités des barreaux. L'effet

Seebeck, son inverse, permet de générer un courant électrique à partir de deux sources de chaleur de températures différentes (au milieu). En regroupant plusieurs circuits identiques, on construit des modules thermoélectriques fonctionnant selon l'un ou l'autre mode (à droite).



CERTAINS CONSTRUCTEURS AUTOMOBILES cherchent à récupérer la chaleur des gaz d'échappement pour générer de la puissance électrique. L'un des dispositifs proposés fait appel à des modules thermoélectriques cylindriques, dont la paroi extérieure est au contact des gaz chauds, tandis que l'axe central du cylindre est parcouru par un fluide réfrigérant.

puissent fonctionner sont équipées de tels générateurs thermoélectriques. Il s'agit de générateurs à radio-isotopes, où la source chaude est constituée par une pastille radioactive, tandis que la source froide est un radiateur rayonnant vers l'espace.

Récupérer la chaleur inutilement perdue

Le calcul montre qu'avec un facteur de mérite égal à 1, valeur typique de nos jours, et avec une différence de température entre les sources de l'ordre de 300 °C (respectivement 25 °C), on peut obtenir de l'ordre de 8 % (respectivement 1 %) du rendement théorique attendu pour un moteur, le rendement de Carnot, très loin des efficacités des moteurs classiques. Cela demeure modeste, mais les applications ne manquent pas.

Par exemple, pourquoi ne pas récupérer la chaleur du corps que nous dissipons à travers notre peau en pure perte dans l'air environnant ? Bien avant la lampe de poche d'Ann Makosinski, on a ainsi vu apparaître en 1982 une montre thermoélectrique, le modèle Thermatron de chez Bulova. D'autres montres thermoélectriques ont suivi au tournant des années 2000. Le modèle de chez Citizen avait sa pile alimentée par un ensemble de plus de 1 000 couples, délivrant une puissance de 14 microwatts et une tension de

500 millivolts par degré Celsius d'écart de température. Les projets fleurissent toujours, sans aboutir à la commercialisation, tels que le bracelet thermoélectrique de Dyson (2009) pour alimenter téléphones ou tablettes. La limitation réside dans le faible écart de températures : 25 °C d'écart à 10 °C, c'est un rendement de Carnot de 8 %, donc une efficacité de conversion inférieure à 0,1 % !

Une piste prometteuse concerne les automobiles (voir la figure ci-dessus). Près des deux tiers de la puissance d'une voiture à essence sont *in fine* dissipés sous forme de chaleur, dont un petit tiers dans le système d'échappement. Ainsi, une voiture qui en une heure consomme 7 litres de carburant évacue près de 20 kilowatts dans ses gaz d'échappement.

Or la température de ces gaz peut atteindre 700 °C. S'ils passent par des modules thermoélectriques dont la partie froide est maintenue à 100 °C par un fluide réfrigérant (l'air ambiant ne suffirait pas), on obtient un écart de températures de 600 °C et un très bon rendement de Carnot : 62 %. Même avec des modules peu coûteux, il est ainsi possible de générer quelque 200 watts de puissance électrique. Le recyclage de celle-ci pourrait alors faire baisser un peu la consommation d'essence. Plusieurs constructeurs ou sous-traitants, tels que BMW ou Valeo, poursuivent des recherches en ce sens. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Orr *et al.*, A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes, *Applied Thermal Engineering*, vol. 101, pp. 490-495, 2016.

S. Hébert, La recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques, *Reflets de la Physique*, n° 41, pp. 18-22, octobre 2014.

J.-P. Barrat, Effet Volta, effet Peltier, *Bulletin de l'Union des physiciens*, n° 705, pp. 779-785, juin 1988.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

QUESTION AUX EXPERTS

L'art préhistorique a-t-il existé ?

Bien que la valeur artistique des œuvres de la Préhistoire nous soit évidente, leurs créateurs étaient plutôt des artisans que des artistes au sens moderne du terme.

Romain PIGEAUD



La statuette de la Dame de Brassempouy, qui date de 21 000 ans.

Les témoignages les plus spectaculaires de l'activité artistique des hommes préhistoriques sont des dessins, des peintures ou des sculptures. Nous connaissons aussi quelques sifflets, flûtes, rhombes et tambours, mais nous n'avons aucune image, sinon difficile à interpréter, prouvant que nos ancêtres dansaient. Quant à l'architecture, les assemblages de concrétions de la grotte de Bruniquel, dans le Tarn-et-Garonne, démontrent à l'évidence que les Néandertaliens savaient organiser l'espace.

Toutefois, s'agissant d'art préhistorique, l'anachronisme menace. L'idée d'un créateur à la très forte personnalité, que sous-tend le cliché de l'artiste en Occident depuis la fin de la Renaissance, est aberrante dans ce contexte. Comme celui de la Renaissance, l'artiste préhistorique ne se distingue guère de l'artisan qui travaille anonymement pour sa communauté. Le tailleur d'outils en silex, par exemple, était un professionnel sans reconnaissance officielle.

On peut se demander comment l'art a débuté. Un débat court depuis la fin du XIX^e siècle pour déterminer si la sculpture – un travail dans l'espace, comme la taille – a précédé la peinture ou si c'est l'inverse. Après plus d'un siècle de discussions, le consensus actuel est que les deux formes sont apparues en même temps. Le fait, par exemple, que les dessins de la grotte Chauvet et les statues d'ivoire du Jura souabe datent tous d'environ 36 000 ans semble le corroborer.

Le dessin apparaît comme un processus mental si abstrait et complexe que l'on a eu du mal à admettre son ancienneté. Il faut cependant accepter que les humains dessinent des formes géométriques depuis très longtemps, comme l'illustre un zigzag gravé il y a 500 000 ans sur un coquillage par *Homo erectus*. Du reste, même les chimpanzés savent tracer des motifs identiques pour peu qu'on leur fournisse papier et pinceaux.

L'art, cet instinct animal...

En fait, il semble que la créativité, en tout cas la recherche de formes nouvelles, soit une activité assez partagée dans le monde animal. Ce « phénomène Eurêka » [recherche et plaisir de la découverte] conférerait un avantage évolutif certain, car en activant certaines zones du cerveau, il entretiendrait une certaine souplesse mentale. Son cerveau plus plastique rendrait l'animal davantage capable de s'adapter en cas de changement.

Ainsi, l'art s'enracinerait dans le monde animal. Dès lors, le débat s'est reporté sur l'apparition de l'art figuratif, plus noble sans doute, et ainsi plus à même de nous convaincre de la supériorité du genre humain. D'où la question : quand les premières reproductions d'animaux et d'hommes sont-elles apparues ? Certains préhistoriens pensent que seul *Homo sapiens* a su en réaliser. Le développement de cette compétence, il y a

quelque 50 000 ans, serait la conséquence d'un accroissement de la zone préfrontale du cerveau... C'est possible, mais l'anatomie cérébrale semble avoir peu changé depuis l'émergence d'*Homo sapiens* il y a environ 200 000 ans, sans parler du fait que le cortex préfrontal n'est pas la seule zone cérébrale sollicitée dans les processus créatifs.

D'après d'autres chercheurs, une phase présymbolique de plusieurs millénaires a précédé l'apparition du comportement symbolique chez l'homme moderne. Mais là encore, l'accent est mis sur *H. sapiens*. Et si l'homme de Néandertal avait aussi pratiqué l'art figuratif ?

Quant à la question « Pourquoi l'art figuratif ? », elle suscite aussi plusieurs théories. Certaines sont fonctionnalistes : l'art aurait servi à envoûter le gibier ou à communiquer avec les esprits. D'autres sont plutôt symboliques : les artistes auraient reproduit les mythes et les histoires de leur groupe, pour les faire revivre le temps d'une cérémonie ou pour en fixer le souvenir. Par exemple, le préhistorien français Norbert Aujoulat, décédé en 2011, pensait que dans la grotte de Lascaux, les Magdaléniens avaient reproduit le cycle des saisons. Pour se situer dans le monde naturel ? Interpréter l'art du passé est manifestement tout un art ! ■

Romain PIGEAUD est chercheur associé au Centre de recherche en archéologie, archéosciences, histoire (CReAAH, unité mixte de recherche 6566), à Rennes.