

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 répartissent 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.

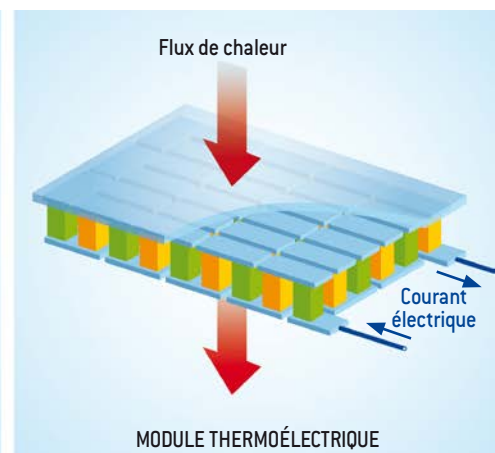
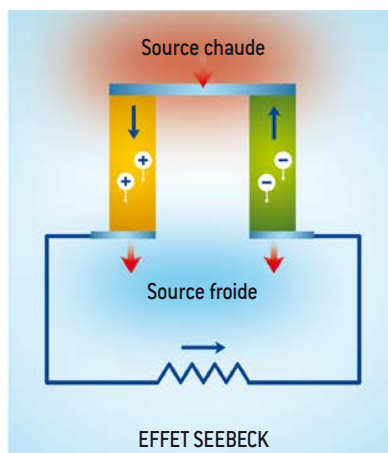
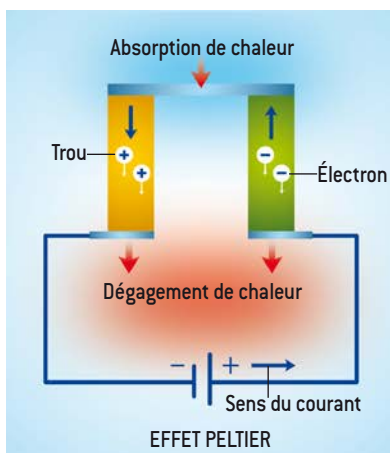
On peut tirer profit de l'effet Seebeck pour concevoir des modules thermoélectriques qui génèrent de l'électricité à partir de deux sources de chaleur de températures différentes. L'efficacité de ces modules ne dépend que d'une grandeur unique, le « facteur de

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



Dessins de Bruno Vacaro

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).