

Athanase Peltier (1785-1845) et la thermoélectricité

Benoît Boucher

Résumé Athanase Peltier est l'un des acteurs principaux de la thermoélectricité. Cependant, l'histoire l'a quelque peu négligé, lui attribuant souvent une autre nationalité et un autre portrait ! Cet article, étoffé de quelques éléments biographiques, essaie de rappeler la vérité sur Athanase Peltier.

Mots-clés Athanase Peltier, thermoélectricité, effet Peltier.

Abstract **Athanase Peltier (1785-1845) and the thermoelectricity**
Athanase Peltier is a main actor of thermoelectricity. However, he has been somewhat neglected by history since another citizenship and portrait are often attributed to him! This article, supported by biographical elements, comes to bring back the truth concerning Athanase Peltier.

Keywords Athanase Peltier, thermoelectricity, Peltier effect.

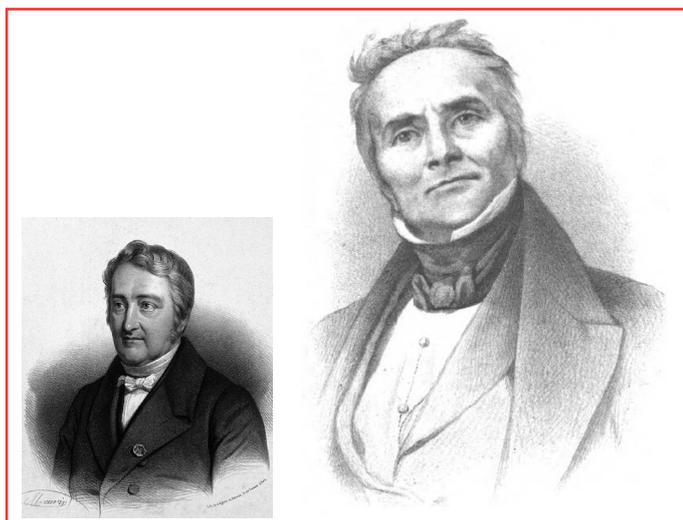


Figure 1 - Athanase Peltier (à droite) a souvent été confondu avec Joseph Pelletier (à gauche) (voir [4]).

Au fil des revues et livres traitant de la thermoélectricité, nous apprenons de Peltier, l'un des découvreurs de cette science, que c'était un horloger genevois, ou encore que son portrait est celui de gauche sur la *figure 1* [1-3]. Remettons les pendules à l'heure : Athanase Peltier est en fait né en France et son portrait est celui de droite sur la *figure 1*. Le portrait de gauche représente un de ses contemporains : le chimiste et codécouvreur de la quinine et de la strychnine Joseph Pelletier (nous le verrons plus loin, cette confusion existait déjà à leur époque). Il semblerait qu'Athanase Peltier ait été oublié assez rapidement après sa mort. Revenons sur certains de ses éléments biographiques.

Brève biographie d'Athanase Peltier

Tout d'abord, bien que certains parlent de Jean, d'autres de Jean-Charles ou d'autres encore de Jean Charles Athanase Peltier [1-3], son acte de décès faisant foi, il s'appelait Jean Charles Athanase Peltier (*figure 2*). Cependant, c'est

parce qu'il signait lui-même ses travaux scientifiques *Athanase Peltier* (*figure 3*) [5] que nous utiliserons ce prénom dans cet article. Ferdinand Athanase Peltier, son fils, dans la biographie qu'il écrit sur son père nous fournit un large résumé sur sa vie et son travail scientifique [4]. Cependant, quelques éléments n'y apparaissent pas ; or ils permettent de mieux connaître Athanase Peltier.

Athanase Peltier naquit à Ham (généralité d'Amiens, aujourd'hui Picardie) le 22 février 1785. Fils d'un sabotier, il présenta très tôt certaines aptitudes pour les sciences. Aux côtés de Michael Faraday, Joseph Fourier ou encore James Thomson (le père de William Thomson, Lord Kelvin), pour n'en citer que quelques-uns, Athanase Peltier se place parmi les nombreux exemples de scientifiques du XIX^e siècle qui, partis de rien à leur naissance ont, par leur travail acharné, laissé leur nom à la postérité. Il apprit le fonctionnement des montres d'abord à Saint-Quentin, près de Ham, avec un certain

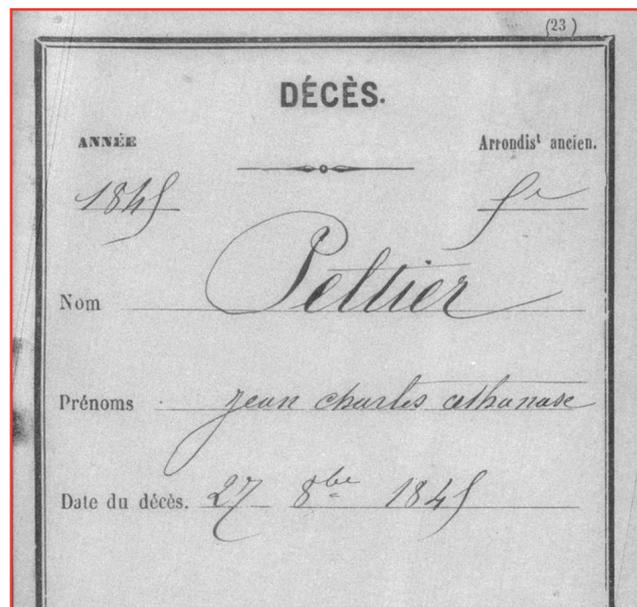


Figure 2 - Acte de décès d'Athanase Peltier (archives.paris.fr).

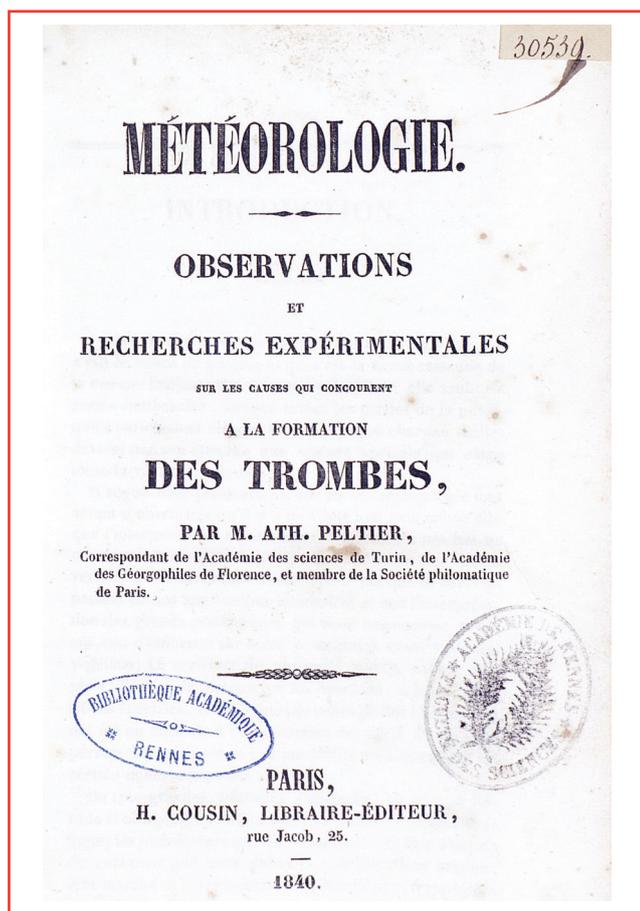


Figure 3 - *Traité de météorologie* de Peltier [5] (Service commun de la documentation de l'Université de Rennes 1).

Brown. Puis il se rendit à Paris chez Abraham-Louis Breguet, fondateur de l'entreprise de montres homonyme encore existante à l'heure actuelle (Swatch Group), pour qui il travailla avant d'établir son propre commerce en 1806. Il restera en bons termes avec la famille Breguet puisque c'est chez Louis-Antoine Breguet (fils du précédent), proche de Champceuil et Corbeil, que Peltier aura l'opportunité d'effectuer des mesures de l'électricité en altitude avec notamment des instruments, fournis par Breguet, qu'il placera sur un cerf-volant. Le 22 juillet de la même année, Athanase Peltier épousa Marie Magdeleine Dufaut à l'église Saint-Germain l'Auxerrois à Paris. Le 20 avril 1808 naquit leur unique enfant, Ferdinand Athanase. En 1815, à la mort de sa belle-mère, Athanase reçut un petit héritage qu'il décida de consacrer à l'éducation de son fils et à sa propre formation. Retiré du commerce et vivant de ses rentes, il débutait donc des études à l'âge de... 30 ans ! Il se procura quelques livres et assista à des cours publics. Ayant acquis un certain niveau scientifique, il fut amené à consulter les *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*. Toutefois, il ne négligea pas l'éducation de son fils puisque ce dernier devint médecin.

Peltier est décédé le 27 octobre 1845 à l'âge de soixante ans. Au cimetière du Père-Lachaise à Paris, sur la partie gauche du tombeau érigé par sa veuve et son fils, figure l'inscription suivante : « *Il a laissé des empreintes de son génie dans toutes les sciences dont il s'est occupé. Il a fait faire des progrès immenses à l'électricité dont il a donné la véritable théorie et il peut être considéré comme le fondateur de la météorologie* » (figure 4, à gauche). Dans son discours lors des obsèques de Peltier, Henry Milnes-Edward, médecin

et zoologiste, en sa qualité de président de la Société philomathique, dont Peltier faisait partie, y soulignait la réussite de Peltier, mais aussi l'originalité de ses recherches et la reconnaissance par ses pairs interrompue par sa disparition : « *Si la mort n'était venue avant le temps interrompre le cours de ses travaux, si fortement empreints du cachet de l'originalité, il aurait obtenu toutes les récompenses dues à son mérite ; car bientôt ses pairs, sans doute, l'auraient choisi pour être un de ses représentants de la science qu'il cultivait avec éclat* » [3]. En effet, Peltier n'avait aucune position académique qui aurait pu permettre d'en ouvrir les portes, il n'entra donc jamais à l'Académie des sciences française. Selon Edouard Diaz [6], il aurait été inscrit aux élections de 1837, 1840 et 1841 pour la section de physique, mais se vit préférer Claude Pouillet, Jacques Babinet et Jean-Marie Duhamel. Outre la Société philomathique de Paris, il fut correspondant des Académies des sciences de Turin, Lyon, Nancy, Liège, Pesaro, et plus encore.

D'après son fils, Athanase Peltier « *était voué aux opinions conservatrices les plus décidées* » [4]. En effet, habitant au 26 rue de la Poissonnière (aujourd'hui 2^e arrondissement), il refusa la mairie du 5^e arrondissement de Paris que la préfecture de la Seine lui offrit en 1834. C'était alors la monarchie de Juillet. De surcroît, en 1843 et 1844, il rendit visite au prince Louis-Napoléon qui était incarcéré au fort de Ham entre 1840 et 1846. Voici deux extraits de lettres du prince destinées à Hortense Cornu, filleule d'Hortense de Beauharnais, datées du 22 juin 1843 : « *J'ai la visite d'un savant, M. Pelletier (sic), et nous parlons physique. C'est un homme bien distingué* », et du 30 décembre 1844 : « *M. Peltier est venu me voir le 30 juillet. Je venais de renvoyer le manuscrit. Je lui ai parlé d'un mot que je ne pouvais pas lire et il me promit de charger M. Hoefer, auteur d'une Histoire de la Chimie, de déchiffrer ce mot* » [7]. Notons la confusion entre Pelletier et Peltier dans le premier extrait. À la même époque [8], Faraday, correspondant d'Athanase Peltier, écrivait à son concitoyen George Merryweather pour l'informer que le journal *London Gazette Medical* avait fait la même erreur. Erreur qui se retrouvait citée dans l'essai de Merryweather sur le baromètre à sangsues [9].

Aujourd'hui, un lycée porte son nom à Ham. En 2015, la Société Internationale de Thermoélectricité (ITS) offre une stèle en forme de module Peltier à la ville de Ham (figure 4, à droite). En Antarctique, son nom est donné à un chenal lors de la première des deux expéditions menées par Jean-Baptiste Charcot au début du XX^e siècle. J. Rey, chargé des



Figure 4 - À gauche : tombeau d'Athanase Peltier au cimetière du Père-Lachaise (photo B. Boucher, DR). À droite : Monument dédié à Athanase Peltier à Ham (Thomas Froehlich/Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0).

mesures liées à la météorologie, note dans le journal de l'expédition : « *Nous nous félicitons, en terminant ce rapide exposé, d'avoir pu rapporter de notre voyage quelques documents originaux pour l'étude d'une branche de la météorologie, qui, née en France des immortelles recherches, trop peu connues, du physicien Peltier, avait paru, pendant quelque temps, devoir devenir une science exclusivement allemande, et qui le fût devenue en effet sans les récents travaux de MM. Mascart, Langevin, André, Brunhes, Lecadet, Marchand, Nordmann, savants qui ne nous ont ménagé ni leurs encouragements ni leurs conseils, et à qui nous adressons nos respectueux remerciements* » [10].

Les prémices de l'effet Peltier

Le travail d'Athanase Peltier se place au début du XIX^e siècle. Le physicien italien Alessandro Volta était déjà célèbre pour sa pile inventée en 1800. Le Danois Hans Christian Ørsted découvrait les effets magnétiques du courant électrique en 1820. Les savants du monde entier s'emparèrent aussitôt de cette découverte. Ainsi André-Marie Ampère en France et Michael Faraday en Angleterre seront des personnalités phares dans cette nouvelle science dite électromagnétisme. En Allemagne, Thomas Johann Seebeck publiait sa découverte de la thermoélectricité en 1823 [11]. La même année, Ørsted et Fourier construisaient la première pile thermoélectrique (voir *encadré*) [12]. Dans l'élaboration de sa loi, l'Allemand Georg Simon Ohm utilisa une pile thermoélectrique dans son montage expérimental. En 1831 en Italie, Leopoldo Nobili et Macedonio Melloni (que Peltier rencontrera plus tard à Naples) associèrent une pile thermoélectrique à un galvanomètre et obtinrent ainsi un thermomètre d'une extrême sensibilité puisqu'il était affecté par la chaleur naturelle d'une personne placée à la distance de 25 à 30 pieds (un peu moins de dix mètres) [13]. Melloni utilisa ensuite ce montage dans ses études sur la chaleur rayonnante.

Peltier avait beaucoup étudié l'électricité et souhaitait même écrire un ouvrage sur le sujet afin de mettre à jour toutes les connaissances dans le domaine (ouvrage qui donnera finalement lieu à un mémoire publié par l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique [14]). Comme Ohm, Nobili et Melloni avant lui, Peltier introduisit la thermoélectricité dans ses travaux, et notamment pour la mesure de la température d'ébullition de l'eau. C'est ainsi qu'il fit la découverte de l'effet que l'on appelle aujourd'hui l'*effet Peltier*. Entre temps, Fourier publiait sa *Théorie analytique de la chaleur* en 1822. L'étude de la chaleur devint un sujet de recherche à la mode dans la communauté scientifique. Elle débouchera plus tard sur la thermodynamique. Mais Peltier, plutôt que de se concentrer sur l'étude de la chaleur en elle-même, préférera étudier les phénomènes électriques liés aux météores.

Pionnier de la météorologie

Peltier est aujourd'hui connu grâce à la thermoélectricité, mais c'est en s'appuyant sur cette science qu'il s'est intéressé à la météorologie. Il fut l'un des premiers à s'intéresser et à poser les bases de cette science qui, à cette époque, n'avait pas beaucoup évolué depuis le temps d'Aristote [5]. Son approche peut être placée dans la continuité des travaux du Britannique Luke Howard et avant lui du Français Jean-Baptiste de Lamarck [15]. En rupture avec le modèle humboldtien qui met l'accent sur les mesures et observations de terrain, Peltier apporte une approche électrique des météores

[15]. Bien que les phénomènes électriques liés aux météores étaient déjà connus à l'époque, grâce par exemple à Benjamin Franklin, ils n'étaient pourtant pas encore très étudiés. La méthode employée par Peltier était nouvelle et ne peut être mieux explicitée que par son séjour au mont Faulhorn (2 680 mètres d'altitude et plus haute habitation de l'époque dans les Alpes suisses) [16]. Après plusieurs jours d'observations pendant lesquels il ne fera que confirmer ses théories sur les météores, il retournera à Paris, laissant derrière lui Auguste Bravais – qui était déjà venu l'année précédente – ainsi que Charles Martins. Ces derniers, héritiers du modèle humboldtien, étaient présents au Faulhorn pour y accumuler des mesures et des observations [15]. Athanase Peltier fit le lien entre l'électricité et les perturbations météorologiques. Jusqu'à sa mort, il fut sollicité pour ses connaissances dans ce domaine, et c'est grâce à ses travaux que la trombe dévastatrice (des dizaines de morts et plus d'une centaine de blessés) d'août 1845 survenue en Normandie à Monville (aujourd'hui Montville) et Malaunay pu être considérée comme de nature électrique et obligea les assurances à intervenir [15].

Après son expédition sur le mont Faulhorn, sa santé commença à décliner et il débuta une course contre la montre pour rédiger son *Traité de météorologie*, synthèse de tout son travail (*figure 3*) [5]. En météorologie, Peltier se servait de pinces thermoélectriques. En effet, il avait construit un thermocouple fer/cuivre de 42 mètres de long qu'il étendait dans son jardin du fond de son puits jusqu'à son laboratoire, puis du haut de la cheminée jusqu'à son laboratoire. Avec un système ainsi disposé, il n'avait qu'à mettre la jonction dans un vase dans son laboratoire puis la refroidir ou la réchauffer jusqu'à obtention de l'équilibre thermique entre les deux jonctions. Il pouvait ainsi déterminer la température d'un milieu à distance, le tout en restant dans son laboratoire. Il se servait de systèmes du même type pour connaître la température dans un lac jusqu'à une certaine profondeur, ou bien la température de l'air jusqu'à une certaine altitude. Enfin, Peltier utilisait ce thermocouple pour analyser les échanges électriques entre l'atmosphère et le sol [17].

Et la chimie dans tout ça ?

Il faudra attendre plus d'un siècle après les découvertes de Seebeck et de Peltier pour voir la thermoélectricité évoluer et concurrencer les autres formes de générateurs électriques et les réfrigérateurs conventionnels. Aujourd'hui, un matériau thermoélectrique est défini par sa figure de mérite ZT, qui est proportionnelle au carré de son coefficient de Seebeck (propriété d'un matériau à transformer une différence de flux de chaleur en électricité), à sa conductivité électrique, et est inversement proportionnelle à sa conductivité thermique. Trois périodes jalonnent l'histoire de la thermoélectricité [18]. La première voit le développement de la théorie et la compréhension du phénomène. On cherche à découvrir des matériaux simples et qui pourraient présenter une valeur ZT élevée. Selon la température à laquelle on souhaite travailler, des composés dérivés de Bi₂Te₃ pour les basses températures, PbTe pour les moyennes températures et enfin SiGe pour les hautes températures seront préférés, avec une efficacité de conversion de l'ordre de 4-6 % et des valeurs ZT autour de 1. La deuxième période, des années 1990 au début des années 2010, vise à augmenter la figure de mérite ZT à l'aide de nouvelles idées théoriques, notamment basées sur l'effet de taille des matériaux [19-20]. Ceci débouchera sur de nouveaux composés avec une forte diminution de la

La thermoélectricité

La thermoélectricité, observée dans certains matériaux, se traduit par la transformation d'une différence de flux de chaleur en un courant électrique. Ce phénomène est réversible et un courant électrique peut se transformer en une différence de flux de chaleur.

Effet Seebeck

S'il est avéré aujourd'hui que la découverte de cet effet thermoélectrique est antérieure à Thomas Johann Seebeck, grâce notamment à Franz Aepinus, ou encore Alessandro Volta et Luigi Galvani [32], c'est bien Seebeck, correspondant de l'Académie des sciences de Prusse en 1823 devant de nombreux auditeurs dont Hans Christian Ørsted. Suite à la découverte d'Ørsted du phénomène électromagnétique, Seebeck se lança dans l'étude de l'électricité et fit la découverte suivante : deux demi-cercles d'antimoine (A) et de cuivre (K) sont connectés en *a* et *b* ; en chauffant (« warm ») la jonction *b* et/ou en refroidissant (« kalt ») la jonction *a*, l'aiguille d'une boussole placée à proximité du montage se dirigera alors vers l'est (O) (*figure a*). À l'inverse, en chauffant la jonction *a* et/ou en refroidissant la jonction *b*, l'aiguille se dirigera vers l'ouest (W) [11]. C'est ce montage que l'on appelle un thermocouple. Notons que déjà Seebeck pensait appliquer sa découverte pour juger de la pureté d'un alliage en comparant l'effet Seebeck de l'alliage considéré pur avec celui des alliages obtenus dans différentes usines. De plus, Seebeck pensait à tort, y voir la cause du champ magnétique terrestre puisqu'en effet, le globe terrestre est plus chaud à l'équateur et plus froid aux pôles. Cependant, Seebeck ne voyait pas la création d'une force électromagnétique, mais uniquement d'un champ magnétique. C'est alors Ørsted qui fit le pas suivant en France, de concert avec Joseph Fourier. En effet, Ørsted contribua à propager la découverte de Seebeck lors de son voyage à Paris. Ayant mieux compris ce phénomène que Seebeck, Ørsted fut le premier à suggérer le mot *thermoélectrique* [33]. Enfin, dans une série d'expériences, toujours en compagnie de Fourier, ils établirent ensemble la première pile thermoélectrique et conclurent ce qui se voulait déjà une des limites de la thermoélectricité : nous parlons ici d'un faible rendement des piles thermoélectriques comparées aux piles galvaniques (pile de Volta) [12].

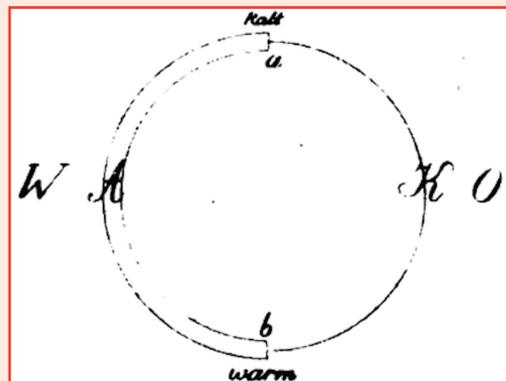


Figure a - Thermocouple de Seebeck [11].

Effet Peltier

Athanase Peltier, déjà très versé dans l'électricité, s'est intéressé à la thermoélectricité dans le cadre de son travail sur les météores. Le but visé était de connaître, lors d'un processus d'évaporation de l'eau, la température de l'eau restante dans le récipient. Pour ce faire, l'utilisation de l'hygromètre construit par l'Écossais John Leslie perdait son intérêt à cause de sa lenteur et son manque de sensibilité. Peltier construisit un nouvel appareil à l'aide d'une pile thermoélectrique. Pour reprendre les propos de Peltier, la qualité de ses hygromètres, contrairement à celui de Leslie, « *indiquent un centième de degré centigrade et l'indiquent promptement* » [5]. L'emploi de mauvais métaux tel le bismuth ou l'antimoine accroît la sensibilité de ces appareils. Dans l'élaboration de ces instruments, il analysa l'effet calorifique du courant (que l'on n'appelait pas encore effet Joule) dans le bismuth ou l'antimoine. C'est ainsi qu'il remarqua que pour ces deux métaux, la température à l'extrémité de la barre de métal était inférieure à la température ambiante au lieu d'être supérieure en raison de l'effet calorifique du courant. Pour confirmer cette découverte, il fabriqua une pince thermoélectrique capable de quantifier instantanément la chaleur émise à l'extrémité de la barre [34].

C'était en effet un phénomène nouveau que l'on appelle aujourd'hui l'effet Peltier. En prenant le même montage que sur la *figure a* et en faisant cette fois-ci passer un courant électrique dans le circuit fermé, le passage d'une densité des charges mobiles à une autre (d'un métal à un autre) s'accompagne alors d'un flux de chaleur avec le milieu extérieur. Ce phénomène rencontra de nombreuses contestations, tout comme celui qu'Antoine Becquerel crut avoir découvert avant lui (lire ci-après). Et il faudra attendre près de cinq ans pour que l'Allemand Emil Lenz confirme la découverte de Peltier en refroidissant de l'eau et la transformant en glace en 1838 [35].

Aujourd'hui, on peut facilement acheter des modules Peltier (*figure b*), qui sont des petits carrés de quelques millimètres d'épaisseur, composés de très nombreux thermocouples en série. En y faisant passer un faible courant, on crée une différence de température entre les deux faces carrées. À l'inverse, en chauffant un côté et/ou en refroidissant un autre, on crée un petit courant électrique continu. Nombreuses sont les vidéos sur Internet montrant comment recharger un téléphone portable ou créer un petit moteur à l'aide d'un module Peltier.

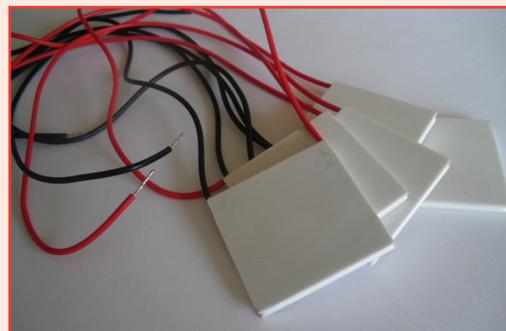


Figure b - Modules Peltier (photo B. Boucher, DR).

Effet Thomson

En 1823, rapidement après la découverte de la thermoélectricité par l'Allemand Seebeck, James Cumming en Angleterre avait observé qu'augmenter la différence de température entre les jonctions d'un thermocouple pouvait, dans certains cas, conduire à une diminution puis une inversion du courant. Cela est observé par exemple pour un thermocouple composé de fer et de cuivre. Quelques années après la découverte de l'effet Peltier et afin d'expliquer les observations faites par Cumming, William Thomson (Lord Kelvin) démontrera que de l'effet Seebeck résultent deux effets : l'effet Peltier (aux jonctions d'un thermocouple traversé par un courant), et un effet supplémentaire (le long des branches du thermocouple traversé par un courant et soumis à un gradient de température) : l'effet Thomson. Il s'efforça lui-même de trouver une expérience pour mettre ce second effet en évidence [36].

Ainsi, il construisit un montage qui permet de faire passer un courant électrique à travers un fil métallique échauffé en son milieu (un fil de cuivre dans de l'eau bouillante par exemple). La température du fil sera plus (pour le cuivre) ou moins importante dans la première moitié du fil que dans la seconde, et cela dépendra du métal.

Il est à noter que ce nouvel effet Thomson avait été touché du bout des doigts par Becquerel. Celui-ci pensait avoir découvert un effet thermoélectrique en utilisant un unique fil métallique qu'il contournait en spirale ou y faisait un nœud. Il fut démontré plus tard que cet effet était dû à une différence d'homogénéité du fil métallique produit par la torsion ou l'écroutissage du fil.

conductivité thermique et donc l'augmentation de ZT autour de 1,3-1,7 et une efficacité de conversion de l'ordre de 11-15 %. C'est l'heure des nanomatériaux. Enfin, la période actuelle fait la part belle à une chimie de synthèse élaborée. Les expérimentateurs cherchent à créer un désordre de l'échelle atomique à l'échelle mésoscopique (nanosynthèse endotaxiale, joints de grain, interfaces), le tout débouchant sur une approche dite *panoscopique* [18]. La chimie théorique tente aussi d'apporter sa pierre à l'édifice. Une analyse précise des propriétés électroniques et vibrationnelles de composés thermoélectriques permet d'obtenir des informations dont on peut tirer profit pour améliorer les propriétés de conceptions électrique et thermique et ainsi augmenter les performances thermoélectriques [21]. Les progrès récents en informatique offrent la possibilité de calculs massifs permettant le criblage virtuel d'un très grand nombre de composés potentiellement intéressants. Des composés avec des valeurs ZT de l'ordre de 1,8-2,2 et des efficacités de conversion de 15-20 % ont d'ores et déjà été rapportés, laissant entrevoir des possibilités d'application à grande échelle dans un avenir relativement proche.

Applications actuelles

En thermoélectricité, Peltier laisse son nom, comme nous l'avons vu, avec l'effet Peltier et le coefficient Peltier. La thermoélectricité est une solution pour récupérer la perte d'énergie dégagée sous forme de chaleur. Par exemple, on estime qu'environ deux tiers de l'énergie sont perdus sous forme de chaleur dans une voiture [22] ou dans une centrale nucléaire [23], et que près de la moitié de la production d'énergie mondiale est perdue sous forme de chaleur [24]. La thermoélectricité pourrait permettre de réduire fortement ces pertes de chaleur, mais aussi de remplacer nos réfrigérateurs et de diminuer les gaz à effet de serre. Le lecteur trouvera facilement des informations complémentaires sur la thermoélectricité en lisant la référence [25] et pour une approche thermodynamique du sujet, la référence [26] ou les cours d'Antoine Georges au Collège de France [27].

Les refroidisseurs thermoélectriques sont utilisés pour refroidir certains composants informatiques comme dans le MacBook Air d'Apple par exemple. Notons également comme autres applications, les glaciers et les caves à vin [28]. Les applications commerciales restent cependant des niches.

Les générateurs thermoélectriques ne sont pas en reste. Leur utilisation la plus célèbre est la génération d'électricité dans les sondes spatiales se servant de la désintégration de l'oxyde de plutonium (PuO_2) comme source de chaleur et du froid interstellaire comme source de refroidissement [29]. Cependant, le plutonium étant une ressource rare et onéreuse [30], ce type d'alimentation est parfois remplacé par le photovoltaïque, et cela même pour les sondes spatiales dirigées vers l'extérieur du système solaire à l'instar de la sonde Juno [31]. Aujourd'hui, la marque d'horlogerie japonaise Seiko commercialise une montre utilisant la chaleur du corps humain (opposée à la température ambiante, plus froide) comme source d'alimentation électrique. La boucle est ainsi bouclée puisque c'est dans une horlogerie que Peltier débute sa carrière.

L'auteur remercie Jean-François Halet, directeur de recherche au CNRS, Régis Gautier, professeur à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Rennes, et Danielle Fauque, historienne des sciences, Université Paris-Sud, pour leur généreuse contribution, ainsi que la Région Bretagne et la société Max-Planck pour leur soutien financier.

Références

- [1] Linder A., *La thermoélectricité*, Presses Universitaires de France, 1970, p. 5.
- [2] Zhang X., Zhao L.-D., Thermoelectric materials: energy conversion between heat and electricity, *J. Materiomics*, 2015, 1(2), p. 92.
- [3] Maciá-Barber E., *Thermoelectric Materials Advances and Applications*, CRC Press, Boca Raton, 2015, p. 8.
- [4] Peltier F.-A., *Notice sur la vie et les travaux scientifiques de J.-C.-A. Peltier*, E. Bauthruche, Paris, 1847.
- [5] Peltier A., *Météorologie*, H. Cousin, Paris, 1844.
- [6] Diaz E., Les méconnus ou ignorés de la science – J. C. Peltier, *La Science française : revue populaire illustrée*, 1898, Année 8, Numéro 2, p. 275.
- [7] *La Revue de Paris*, 1937, Année 44, Numéro 13, p. 33.
- [8] James F.A.J.L., *The Correspondence of Michael Faraday*, Vol. 4 1849-1855, F.A.J.L. James, Londres, 1999, p. 273.
- [9] Merryweather G., *An Essay Explanatory of the Tempest Prognosticator in the Building of the Great Exhibition for the Works of Industry of All Nations*, J. Churchill, Londres, 1851, p. 48.
- [10] Joubin L., *Expédition Antarctique française (1903-1905)*, Masson et Cie, Paris, 1908, p. 405.
- [11] Seebeck T.J., Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz, *Abh. Akad. Wiss. Berlin 1822-1823*, 1825, p. 265.
- [12] Ørsted H.C., Fourier J., Sur quelques nouvelles expériences thermoélectriques faites par M. le baron Fourier et M. Ørsted, *Ann. Chim. Phys.*, 1823, 22, p. 375.
- [13] Nobili L., Melloni M., Recherches sur plusieurs Phénomènes calorifiques entreprises au moyen du thermo-multiplicateur, *Ann. Chim. Phys.*, 1831, 48, p. 198.
- [14] Peltier A., Essai sur la coordination des causes qui précèdent, produisent et accompagnent les phénomènes électriques, *Mémoires couronnés et mémoires des savants étrangers*, 1845-1846, 19.
- [15] Locher F., Dans la brume électrique. La physique des météores sous la monarchie de Juillet, *Romantisme*, 2015, 3(169), p. 97.
- [16] Martins C., *Du Spitzberg au Sahara*, J.-B. Baillière et fils, Paris, 1866, p. 273.
- [17] Loos P.W., *Archives des découvertes et des inventions nouvelles*, Treuttel et Würtz, Paris, 1835, p. 148.
- [18] Zhao L.D., Dravid V.P., Kanatzidis M.G., The panoscopic approach to high performance thermoelectrics, *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7(1), p. 251.
- [19] Hicks L.D., Dresselhaus M.S., Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit, *Phys. Rev. B*, 1993, 47(19), p. 12727.
- [20] Slack G.A., *CRC Handbook of Thermoelectrics*, M. Rowe, CRC, Boca Raton, 1995, p. 407.
- [21] Zeier W.G., Zevalkink A., Gibbs Z.M., Hautier G., Kanatzidis M.G., Snyder G.J., Thinking like a chemist: intuition in thermoelectric materials, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2016, 55(24), p. 2.
- [22] Minet P., Un matériau thermoélectrique plus performant, *La Recherche*, 2012, 470, p. 30.
- [23] Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Le bilan énergétique de la France, 2015, p. 52.
- [24] www.llnl.gov (rubrique « Missions », « Energy », « Energy Flow Charts »).
- [25] Hébert S., La recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques, *Reffets de la physique*, 2014, 41, p. 18.
- [26] Diu B., Guthmann C., Lederer D., Roulet B., *Thermodynamique*, Hermann, Paris, 2007, p. 508.
- [27] www.college-de-france.fr (rubrique « Enseignement », « Physique et Chimie »).
- [28] Bell L.E., Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems, *Science*, 2008, 321, p. 1457.
- [29] LaLonde A.D., Pei Y., Wang H., Snyder G.J., Lead telluride alloy thermoelectrics, *Materials Today*, 2011, 14(11), p. 526.
- [30] Griggs M.B., Nasa can make 3 more nuclear batteries, and that's it, 2015 (www.popsci.com).
- [31] Stirone S., How Juno broke the distance record for solar powered spacecraft, 2016 (www.popsci.com).
- [32] Goupil C., Ouerdane H., Zabrocki K., Seifert W., Hinsche N.F., Müller E., *Continuum Theory and Modeling of Thermoelectric Elements*, C. Goupil (ed.), Wiley-VCH Verlag, 2016, p. 1.
- [33] Ørsted H.C., Nouvelles expériences de M. Seebeck sur les actions électromagnétiques, *Ann. Chim. Phys.*, 1823, 22, p. 199.
- [34] Peltier A., Nouvelles expériences sur la calorité des courants électriques, *Ann. Chim. Phys.*, 1834, 56, p. 371.
- [35] Lenz E., Einige Versuche im Gebiete des Galvanismus, *Ann. Phys.*, 1839, 120(6), p. 342.
- [36] Verdet E., *Théorie mécanique de la chaleur*. Tome 8, G. Masson, Paris, 1872, p. 193.



Benoît Boucher

est doctorant à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Rennes* et à l'Institut Max-Planck de chimie physique du solide de Dresde.

* Institut des Sciences chimiques de Rennes, UMR 6226 CNRS, Université de Rennes 1, ENSC de Rennes, 11 allée de Beaulieu, F-35708 Rennes Cedex 7.
Courriel : benoit.boucher@ensc-rennes.fr