

LES AUTEURS

OLIVIER BOURGEOIS
directeur de recherche
à l'institut Néel du CNRS
à Grenoble

DIMITRI TAINOFF
enseignant-chercheur
à l'université Grenoble
Alpes, membre
de l'institut Néel

**NATALIO MINGO et
BJORN VERMEERSCH**
chercheurs au
Laboratoire d'innovation
pour les technologies des
énergies nouvelles et les
nanomatériaux (Liten),
au CEA à Grenoble

JEAN-LOUIS BARRAT
professeur de physique
à l'université Grenoble
Alpes et membre
du Laboratoire
interdisciplinaire
de physique (LIPhy)



Les aérogels de silice sont des matériaux très légers qui ont de remarquables performances en termes d'isolation thermique. Cette résistance à la conduction de la chaleur est due à la structure nanométrique du matériau. À cette échelle, la loi de Fourier ne décrit plus correctement le transport de la chaleur.

► locale, valable au sein de tout matériau solide. «Locale» signifie ici que les divers termes contenus dans l'équation se rapportent à un même point de l'espace (par exemple, l'équation ne fait pas intervenir à la fois une quantité évaluée en un point A et une quantité évaluée en un point différent B)

L'équation trouvée par Fourier stipule que le courant ou flux de chaleur par unité de surface en un point est proportionnel au gradient de température en ce point, le gradient d'une fonction étant son taux de variation dans l'espace. Si, pour simplifier, on se place à une dimension (par exemple quand on considère la propagation de la chaleur le long d'un fil très peu épais), la loi de Fourier s'écrit :

$$J(x) = -k dT(x)/dx$$

où $J(x)$ désigne le flux de chaleur en x , $T(x)$ la température en x , et dT/dx la dérivée de la température T par rapport à la coordonnée x . La constante k (elle peut dépendre de la température) est un coefficient caractéristique du matériau considéré, nommé aujourd'hui conductivité thermique. Le signe moins présent dans cette équation a une interprétation simple : le flux de chaleur est de sens opposé au gradient de température, c'est-à-dire que la chaleur s'écoule du côté chaud vers le côté froid (voir la figure ci-dessous).

UNE LOI PHÉNOMÉNOLOGIQUE

La loi de Fourier est une loi phénoménologique ; autrement dit, elle décrit le phénomène observé (la propagation de la chaleur), mais ne repose pas sur une connaissance du mécanisme sous-jacent. Elle traduit aussi le caractère local du transport de la chaleur : cette forme d'énergie ne peut pas disparaître en un point pour réapparaître immédiatement en un point éloigné.

La formulation locale de la loi de Fourier a constitué une innovation conceptuelle considérable, dont se sont inspirés les physiciens du XIX^e siècle pour découvrir des lois régissant plusieurs autres phénomènes de transport. Il en est ainsi de la loi d'Ohm pour le transport de l'électricité, de la loi de Fick pour la diffusion d'un fluide dans un autre, de la loi de Darcy pour la pénétration d'un fluide dans un solide poreux...

En éliminant la possibilité d'échanges à distance et en séparant la propriété du matériau (sa conductivité thermique par exemple) de sa géométrie, l'approche locale de Fourier conduit à formuler les phénomènes de transfert sous la forme d'équations différentielles locales, où apparaissent la fonction à déterminer (par exemple la température en fonction de la position) et ses dérivées. Lorsque l'on complète ces équations par les conditions physiques imposées ou régissant au bord du domaine spatial considéré, on peut leur rechercher des solutions. C'est de cette façon que Fourier a été



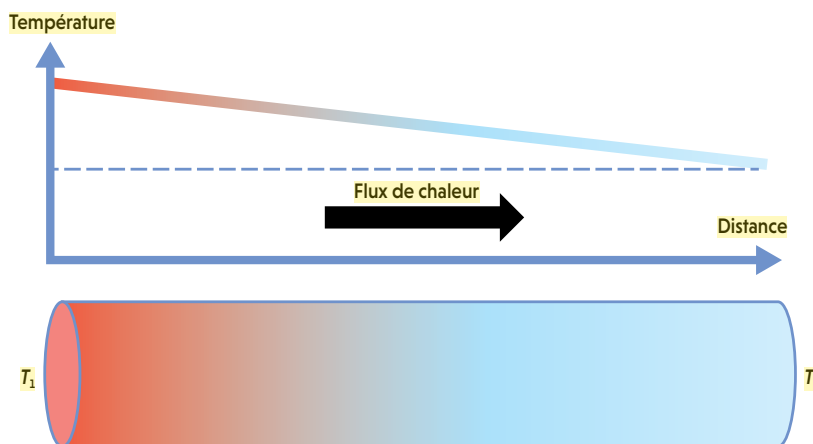
L'œuvre scientifique principale de Joseph Fourier (1768-1830) est sa *Théorie analytique de la chaleur*, publiée en 1822. Il y développe notamment ses méthodes mathématiques qui feront sa renommée. Outre sa carrière de scientifique, Fourier a été politiquement actif et a occupé plusieurs fonctions officielles, en particulier celle de préfet. Il a été l'un des membres de l'expédition scientifique lors de la Campagne d'Égypte de Bonaparte.

amené à introduire les bases de l'analyse mathématique qui porte son nom.

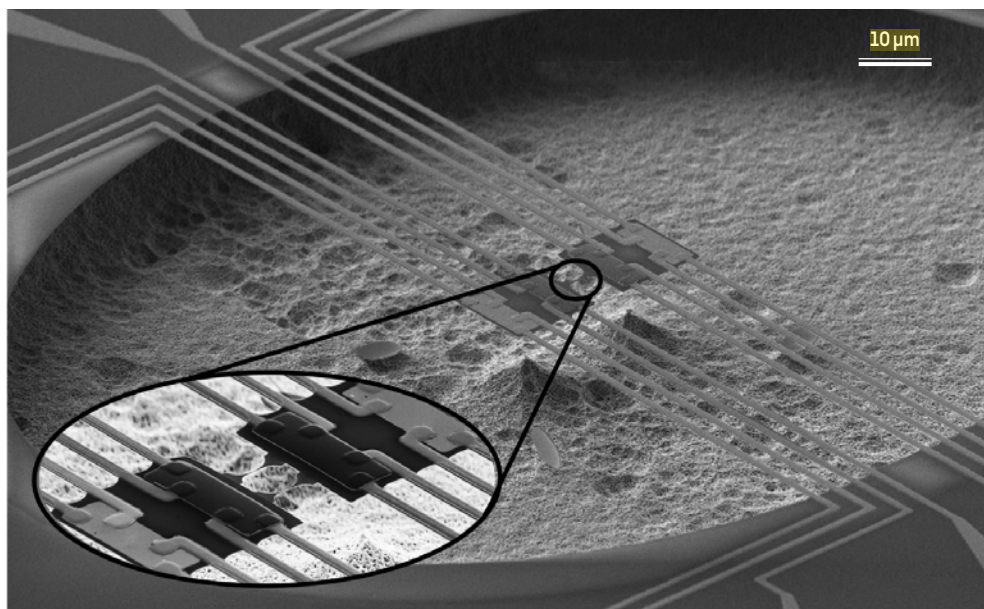
La loi de Fourier pour la propagation de la chaleur reflète le deuxième principe de la thermodynamique, qui implique notamment que la chaleur s'écoule du chaud vers le froid, mais cette «loi» ne présente pas un aspect fondamental : d'autres expressions mathématiques pour le courant de chaleur seraient envisageables. Elle est cependant remarquable par sa grande robustesse : la loi de Fourier se vérifie dans tous types de matériaux (solides, liquides ou gaz, même si, dans ces deux derniers cas, les transferts de chaleur se font surtout par convection, c'est-à-dire par des déplacements macroscopiques de la matière, et non par conduction) et dans toutes conditions.

Un défi scientifique est donc de comprendre l'origine microscopique de la loi de Fourier et dans quels cas la propagation de la chaleur pourrait en dévier. Mais l'enjeu n'est pas que scientifique, il est aussi technologique, ce phénomène de transport étant à l'œuvre dans d'innombrables dispositifs techniques.

Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, les physiciens écossais James Clerk Maxwell et allemand Ludwig Boltzmann ont élaboré des théories fondées sur l'idée qu'un gaz est un ensemble d'un grand nombre de particules indépendantes. Cette approche de nature microscopique a fait apparaître la chaleur comme une forme d'énergie associée aux mouvements désordonnés et erratiques – l'«agitation thermique» – des molécules du gaz, la température étant alors une grandeur proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne de chacune des molécules. Dans ce cadre, la diffusion de la chaleur correspond simplement à la diffusion, de proche en proche, de l'agitation thermique, par le biais des très nombreuses collisions entre molécules.



Selon la loi de Fourier, l'intensité du flux de chaleur en un point est proportionnelle, et de sens opposé, au gradient de température en ce point. Pour un barreau cylindrique, parfaitement isolé, d'un matériau homogène dont les deux extrémités sont maintenues à des températures T_1 et T_2 , la loi de Fourier implique que le profil de température est linéaire, et que le flux de chaleur est constant le long du cylindre, conformément à ce que l'on observe.



Ce dispositif, réalisé par l'équipe d'Olivier Bourgeois à l'institut Néel, mesure la conduction thermique de deux nanofils (voir le centre du zoom) suspendus entre deux membranes dont la température est contrôlée par des thermomètres en couche mince. Il fonctionne jusqu'à 50 millikelvins, température proche du zéro absolu, et permet d'étudier des régimes de conduction de la chaleur qui vont bien au-delà de ceux décrits par la loi de Fourier.

Au siècle suivant, ces théories ont été approfondies et généralisées dans le cadre de la physique statistique et de la théorie des solides; elles ont ainsi permis de justifier la loi de Fourier pour des matériaux suffisamment simples et homogènes. Dans certains cas, elles ont même permis de calculer la conductivité thermique du matériau considéré.

Toutefois, c'est seulement dans la fin du xx^e siècle qu'ont été développés des outils expérimentaux et numériques grâce auxquels les physiciens ont pu étudier les transferts de chaleur à une échelle très locale, microscopique (voir la figure ci-dessus). Ces travaux ont apporté une nouvelle compréhension de la conduction thermique dans les matériaux complexes et ont mis au jour des limitations de la loi de Fourier à des échelles pertinentes sur le plan technologique. Ces développements sont liés à l'essor des nanosciences et des nanotechnologies; ils sont aussi largement motivés par les enjeux liés à l'énergie, en particulier celui de la thermoélectricité (phénomène sur lequel nous reviendrons) qui permet de récolter de l'énergie utilisable (de l'électricité) à partir des flux de chaleur présents dans l'environnement.

DES ENJEUX TECHNOLOGIQUES

Au cours des deux siècles qui se sont écoulés depuis sa formulation, l'équation de la chaleur de Fourier a joué un rôle important dans la conception des machines thermiques, moteurs et autres systèmes techniques à usage industriel ou domestique. Mais en ce tournant du xxi^e siècle, la gestion de la chaleur passe d'une contrainte de conception à une limitation fondamentale.

De quoi s'agit-il? Avec les progrès réguliers de la miniaturisation en microélectronique, la

densité de puissance (énergie par unité de temps et par unité de volume) dissipée dans des composants tels que les transistors à haute mobilité électronique (HEMT) ou les diodes électroluminescentes (LED) est devenue de plus en plus importante. Il peut en résulter une surchauffe qui réduit considérablement la durée de vie du dispositif. Par exemple, quand la température de fonctionnement d'un HEMT augmente de 50 degrés Celsius, la durée de vie du HEMT est divisée par 10. De fait, la gestion de ces problèmes thermiques est devenue un

La gestion des problèmes thermiques est devenue un aspect clé en microélectronique

aspect clé de la conception des nouvelles technologies microélectroniques.

Plus généralement, le défi thermique se pose dans un très large éventail de technologies: stockage de données, matériaux isolants dans le secteur du bâtiment, récupération d'énergie thermoélectrique, matériaux de revêtement des turbines, composants CMOS (composants métal-oxyde-semi-conducteurs, >

ÉLECTRONS, PHONONS ET DIFFUSION DE LA CHALEUR

La loi de Fourier est une relation empirique et quantitative qui stipule qu'en tout point d'un solide, le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température. Mais par quels mécanismes la chaleur se transmet-elle d'un endroit à un autre? Dans la plupart des solides cristallins, où les atomes et les molécules ne font que s'agiter autour de leurs positions d'équilibre, sans pouvoir se déplacer, deux véhicules de chaleur sont en jeu à l'échelle microscopique: les électrons libres du matériau et ses phonons.

Commençons par les électrons. Ils véhiculent bien sûr le courant électrique dans les matériaux conducteurs, mais, par leurs mouvements et les collisions qui s'ensuivent, ils transmettent aussi de l'énergie sous forme de chaleur. Les électrons libres sont même les principaux porteurs de chaleur dans les métaux à température ambiante. Toutefois, leur contribution ne suffit

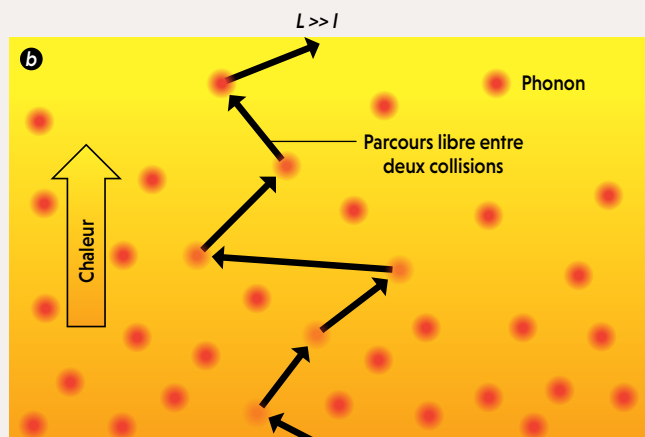
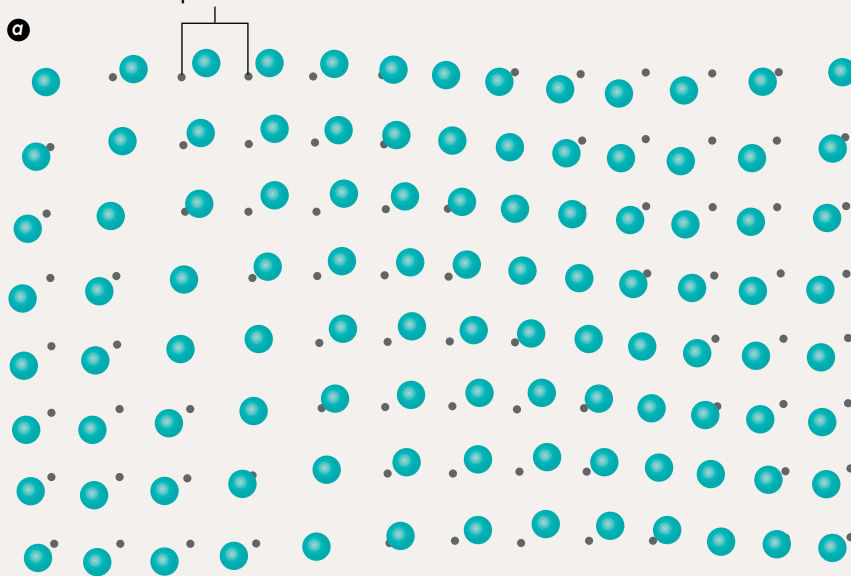
pas à rendre compte pleinement de la conduction thermique, en particulier aux basses températures.

D'autres porteurs de chaleur interviennent: les phonons. Au sein d'un isolant électrique (un matériau «diélectrique»), qui est dépourvu d'électrons libres, les phonons sont même les seuls porteurs de chaleur. De quoi s'agit-il? La matière solide est constituée d'atomes qui, à température absolue non nulle, sont en continuelle vibration autour de leurs positions d'équilibre. C'est ce qui constitue l'agitation thermique. Ces vibrations se couplent d'un atome à l'autre du réseau et donnent ainsi lieu à des ondes de vibration qui se propagent au sein du réseau cristallin (voir la figure a). Or les lois de la physique

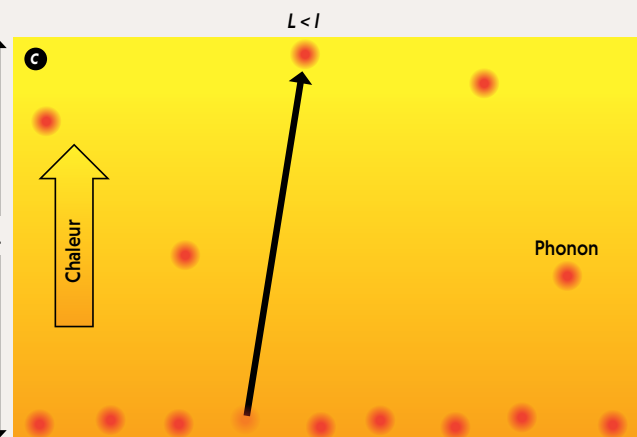
quantique montrent que l'énergie et la quantité de mouvement portées par les vibrations du réseau cristallin ne peuvent pas prendre n'importe quelles valeurs: ces grandeurs sont «quantifiées». Au sein du réseau cristallin, les échanges d'énergie et de quantité de mouvement dus aux vibrations se font donc comme si ces grandeurs étaient véhiculées par des particules d'énergie et de quantité de mouvement bien déterminées. On leur associe par conséquent des «quasiparticules» nommées phonons (ce nom provient du grec *φωνη* qui signifie «voix», car les phonons sont aussi responsables de la propagation du son dans les solides).

Comme toute particule, les phonons ont une quantité de mouvement p , une

Positions d'équilibre des atomes



Dans un réseau cristallin, des ondes de vibration des atomes (ou des molécules) autour de leurs positions d'équilibre se propagent. Le schéma a représente un instantané d'une telle onde. L'énergie de ces ondes est quantifiée: elle est véhiculée par des «phonons», entités qui se comportent de façon analogue à une particule. Lorsque le libre parcours moyen (distance



moyenne entre deux collisions successives) des phonons, l , est très inférieur à la distance L sur laquelle ils se propagent, la conduction de la chaleur est de nature diffusif et suit la loi de Fourier (b). En revanche, quand le libre parcours moyen l est supérieur à L , le régime de conduction est dit balistique et n'obéit plus à la loi de Fourier (c).