

longueur d'onde $\lambda = h/p$ (où h est la constante de Planck) et une énergie qui dépend de cette longueur d'onde. Comme les électrons, les phonons présents au voisinage du point chaud ont des énergies relativement élevées et se propagent le long du solide en rencontrant des obstacles (surfaces, dislocations et macles du réseau cristallin,

Le libre parcours moyen et la longueur d'onde des phonons sont deux paramètres essentiels

impuretés, électrons ou d'autres phonons). Au cours de ces chocs, les phonons changent à chaque fois de direction et cèdent une part de leur énergie. C'est par ce processus que la chaleur diffuse du point chaud vers le point froid.

La distance moyenne entre deux chocs successifs d'un phonon est appelée libre parcours moyen. Cette distance et la longueur d'onde des phonons sont les deux longueurs les plus importantes pour caractériser le transport de chaleur. La compétition entre ces deux grandeurs caractéristiques (qui vont, *grosso modo*, du nanomètre au micromètre) et les dimensions des solides considérés est à l'origine d'effets thermiques très particuliers et de la non-validité de la loi de Fourier aux courtes distances.

Ainsi, la loi de Fourier n'est valable que lorsque le solide a des dimensions bien supérieures à ces deux longueurs. Cela revient à dire que le transport thermique, caractérisé par la conductivité thermique, doit être observé à suffisamment grande échelle pour que cette conductivité ne dépende pas de la taille du système considéré. En revanche, pour des objets de faibles dimensions, en particulier quand l'une d'elles est plus petite que le libre parcours moyen des phonons, alors la taille de l'objet est déterminante pour le transport thermique.

> éléments de base de nombreux processeurs et circuits microélectroniques), etc.

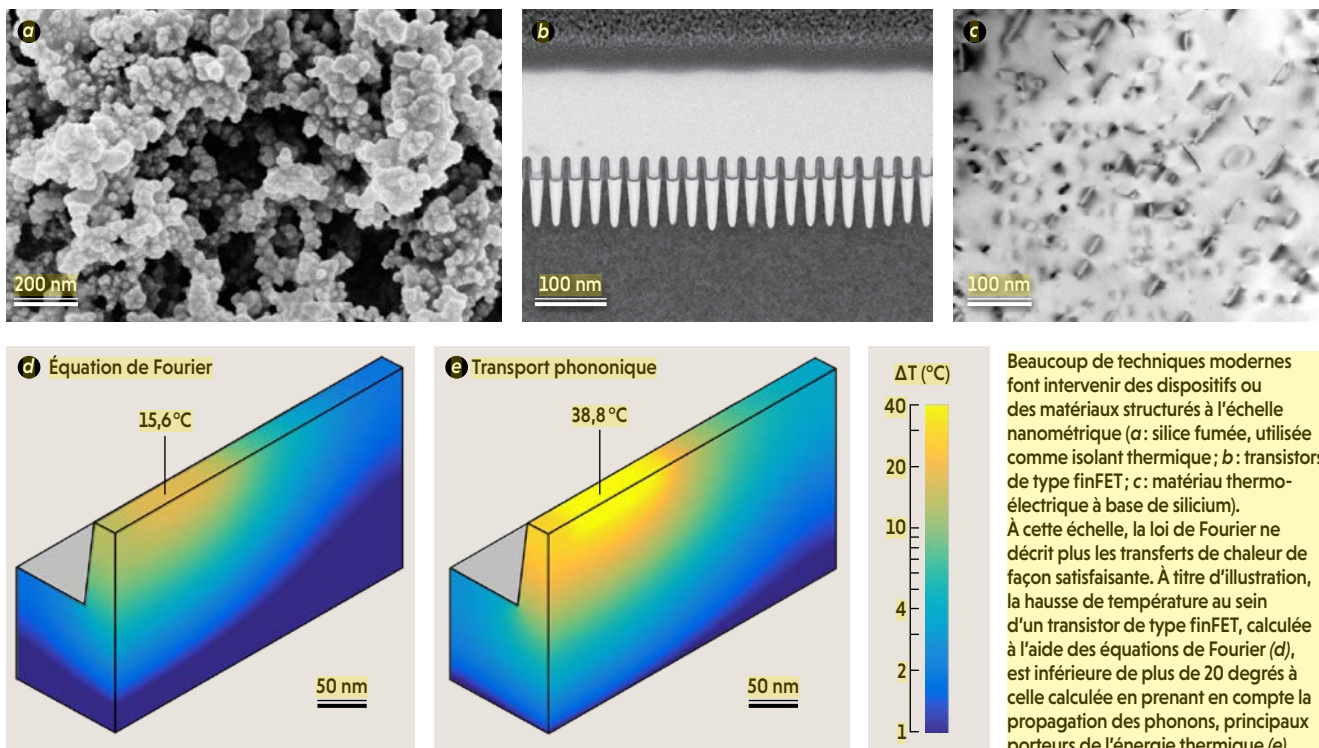
En 2014, David Cahill, de l'université de l'Illinois à Urbana, aux États-Unis, et des collègues ont publié une synthèse donnant quelques chiffres concrets relatifs à ces enjeux. Par exemple, augmenter l'efficacité thermique des nouvelles mémoires à changement de phase (mémoires PCM) pour le stockage des données pourrait conduire à une commutation plus rapide, des tailles plus petites et un fonctionnement plus efficace; l'énergie requise pour changer la valeur d'un bit serait alors inférieure à 1 femtojoule (10^{-15} joule), soit de l'ordre de 1000 à 10000 fois moins que les énergies de commutation d'un bit dans les mémoires actuelles. Autre exemple: réduire de 50% la conductivité thermique des revêtements actuels de turbine conduirait à un gain d'efficacité qui équivaut à 20 ans de développement de superalliages de turbine résistant à de hautes températures.

Malheureusement, l'équation de la chaleur de Fourier cesse d'être utile pour relever les défis thermiques posés par ces nouvelles technologies. Quand les dispositifs sont réduits à des dimensions inférieures au micromètre, les matériaux dont ils sont faits ne se comportent plus comme des conducteurs thermiques macroscopiques (*voir la figure page 64*). Par exemple, en 2003, l'équipe d'Arun Majumdar, de l'université de Californie à Berkeley, a mesuré pour la première fois la conductivité thermique d'un nanofil en silicium cristallin, dont le diamètre était de 100 nanomètres (soit 0,1 micromètre). Ces physiciens ont trouvé une conductivité thermique inférieure de moitié à celle d'un cristal de silicium macroscopique! Et la réduction devient plus importante encore pour des nanofils de diamètre inférieur.

QUAND LES PHONONS ENTRENT EN JEU

À quoi de tels effets sont-ils dus? Aux petites échelles, les phénomènes liés à la physique quantique se manifestent davantage. En particulier, l'énergie thermique ne se transmet pas en n'importe quelles quantités, mais par petits paquets, ou «quanta», d'énergie. Pour l'énergie vibratoire, qui est l'une des principales contributions à la chaleur, ces paquets sont nommés phonons (*voir l'encadré ci-contre*).

En 1929, le physicien allemand puis britannique Rudolf Peierls a pu obtenir une équation décrivant comment les phonons se propagent à l'échelle microscopique. L'équation de Peierls considère les phonons, c'est-à-dire les quanta de vibration du réseau cristallin, comme des particules qui voyagent librement jusqu'à ce qu'elles entrent en collision, soit avec des obstacles externes tels que des imperfections du réseau cristallin, soit entre elles, en se séparant >



ou se recombinant avec d'autres phonons. À température ambiante, certains phonons se propagent ainsi librement dans le réseau cristallin sur des centaines, voire des milliers, de nanomètres entre deux collisions consécutives. Par conséquent, dans de petites régions, la chaleur qu'ils véhiculent ne se propage pas par diffusion comme le suppose implicitement la loi de Fourier, mais avec certaines caractéristiques propres à un gaz raréfié, où les collisions entre molécules sont très peu fréquentes. Il s'ensuit qu'à ces échelles microscopiques, le transport de la chaleur obéit à des lois bien différentes de celles en vigueur à l'échelle macroscopique.

DES DÉVIATIONS IMPORTANTES

Les conséquences techniques de ce comportement différent peuvent être drastiques. À titre d'exemple, l'un de nous (Bjorn Vermeesch) a tout récemment calculé l'augmentation de la température locale au-dessus de la température ambiante dans un transistor de type finFET, similaire à ceux en cours de développement pour les puces électroniques de nouvelle génération (voir la figure ci-dessus). Pour une puissance typique de 100 microwatts dissipée dans le canal du transistor, long de 100 nanomètres, la hausse de température calculée en prenant en compte correctement le transport des phonons dépasse de plus de 20 degrés celle prédite par l'équation de Fourier.

Si la loi de Fourier est mise en défaut aux échelles nanométriques, elle redevient pertinente lorsque l'on considère à l'échelle

macroscopique des matériaux « nanostructurés ». De tels matériaux présentent des structures de quelques nanomètres (grains, fibres, domaines...), intermédiaires entre l'échelle moléculaire et l'échelle macroscopique. Ils sont structurés à l'échelle nanométrique et la loi de Fourier ne s'y applique donc pas localement. En revanche, à l'échelle macroscopique, un tel système apparaît de nouveau homogène, et l'on retrouve une proportionnalité entre le flux de chaleur et le gradient de température qui permet de définir une conductivité thermique macroscopique.

Les aérogels de silice constituent un exemple d'un tel matériau nanostructuré (voir la figure page 59). Matériaux composites complexes et extrêmement peu denses, ils comptent parmi les isolants thermiques les plus efficaces : pour une même performance thermique, les matériaux à base d'aérogels de silice sont environ trois fois plus minces que les matériaux isolants usuels. En France, l'utilisation systématique de ces nouveaux matériaux faciliterait la rénovation énergétique des bâtiments existants et, en particulier, leur isolation thermique de l'extérieur – des actions essentielles pour réduire la consommation énergétique finale de 20% d'ici à 2030, l'objectif fixé par la loi relative à la transition énergétique.

L'avènement des matériaux nanostructurés est également au centre des développements récents dans les technologies de récupération d'énergie thermique utilisant l'effet thermoélectrique. Cet effet, découvert au XIX^e siècle par