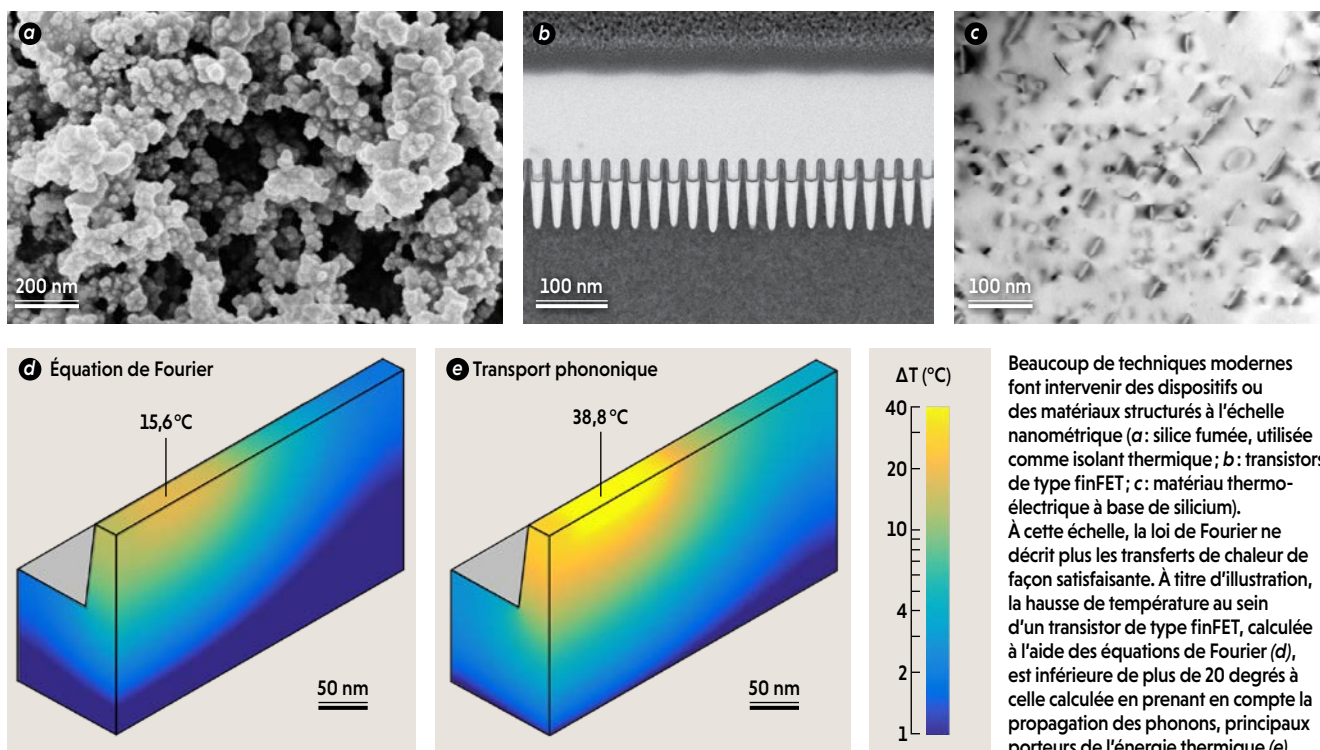




ou se recombinaient avec d'autres phonons. À température ambiante, certains phonons se propagent ainsi librement dans le réseau cristallin sur des centaines, voire des milliers, de nanomètres entre deux collisions consécutives. Par conséquent, dans de petites régions, la chaleur qu'ils véhiculent ne 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<sup>e</sup> siècle par

Jean-Charles Peltier et Thomas Seebeck, permet de convertir un flux de chaleur en différence de potentiel électrique ou, inversement, d'utiliser un courant électrique pour déplacer de la chaleur et, par exemple, refroidir. Actuellement, environ 40% de l'énergie produite par l'humanité est perdue sous forme de chaleur. L'utilisation de l'effet thermoélectrique pour convertir en électricité utile une partie, même infime, de cette chaleur perdue est donc particulièrement pertinente au regard des enjeux énergétiques actuels.

Malgré leur intérêt évident, le déploiement massif des technologies thermoélectriques a longtemps été freiné par la faible efficacité de conversion des matériaux thermoélectriques (dont le plus courant est le tellurure de bismuth,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), donc par des rendements trop faibles. Or la conduction thermique est un élément clé de cette efficacité. Par exemple, dans le dispositif thermoélectrique le plus répandu, le refroidisseur thermoélectrique ou « module Peltier » qui fait notamment fonctionner les réfrigérateurs silencieux des chambres d'hôtel, c'est une faible conduction thermique qui rend l'extraction de chaleur plus efficace: la basse conduction thermique du matériau empêche que la chaleur prélevée grâce au courant électrique revienne vers la partie refroidie du dispositif.

Depuis une vingtaine d'années, l'efficacité de la conversion thermoélectrique augmente sans cesse grâce à une meilleure compréhension du transport thermique aux petites échelles. Ainsi, une équipe réunie autour de Mercouri Kanatzidis, de l'université Northwestern, dans l'Illinois, a montré en 2012 que l'on pouvait doubler l'efficacité de la conversion en utilisant des matériaux semi-conducteurs dopés dont on abaisse la conductivité thermique par l'introduction de désordre à plusieurs échelles: celle du nanomètre grâce à un désordre d'alliage (des atomes du dopant remplacent ceux du semi-conducteur en divers sites du réseau cristallin, au hasard), l'échelle de la dizaine de nanomètres via l'introduction d'inclusions métalliques et l'échelle du micromètre grâce à la texturation des joints de grains (en modulant les traitements appliqués au matériau lors de son élaboration, on joue sur la concentration d'atomes dopants qui s'accumulent aux frontières entre microcristaux).

Le désordre au sein du matériau est ainsi poussé à l'extrême, ce qui perturbe fortement la propagation des phonons à l'échelle locale. Bien que ces conditions ne permettent pas de définir localement une conductivité thermique au sens de la loi de Fourier, cette dernière redevient valable à échelle plus grande, celle des dispositifs thermoélectriques.

Grâce à des matériaux thermoélectriques plus efficaces, plusieurs innovations intéressantes deviennent envisageables: par exemple

la récupération d'énergie dans les gaz d'échappement des moteurs thermiques, ou le développement de capteurs complètement autonomes, qui fonctionnent sans pile et sans fil, leurs besoins en énergie électrique étant assurés grâce aux flux de chaleur présents dans l'environnement. De tels capteurs sont aujourd'hui

## On envisage des capteurs autonomes, qui puisent leur énergie dans les flux de chaleur ambiants

développés par exemple par Moiz, une jeune entreprise issue des travaux du CNRS.

Ce que l'on vient de décrire pour la thermoélectricité illustre un principe général qui guide aujourd'hui les chercheurs pour faire de la nano-ingénierie thermique innovante: en structurant des matériaux à l'échelle du nanomètre, on modifie à volonté leurs propriétés de transport des phonons et l'on obtient ainsi des fonctionnalités nouvelles, par exemple une conductivité thermique très faible, de la rectification de chaleur (avec des diodes thermiques, dispositifs qui ne laissent la chaleur se propager que dans un sens) ou encore de la concentration artificielle de chaleur. Les physiciens ont pu démontrer ces effets de confinement thermique sur des systèmes tels que les super-réseaux (empilements périodiques de couches minces de différents matériaux cristallins), les nanofils, des membranes ou même des matériaux massifs, mais structurés à très petite échelle.

Les recherches en nano-ingénierie thermique sont concentrées autour de quelques grandes équipes aux États-Unis (au MIT, à Berkeley...) et, en Europe, autour de consortiums impliquant plusieurs dizaines de laboratoires, à l'instar du groupement de recherche européen « Thermal nanosciences and nanoengineering » impulsé par Sebastian Volz, physicien au CNRS. Ces efforts, on l'a vu, sont à la clé de nombreuses applications mettant en œuvre l'isolation thermique, la conversion de la chaleur en électricité, son évacuation, son guidage... Certains chercheurs envisagent même d'utiliser la chaleur pour véhiculer de l'information. De la loi de Fourier à l'informatique du futur, que de chemin parcouru! ■

### BIBLIOGRAPHIE

S. Volz et al., **Nanophononics: state of the art and perspectives**, *European Physical Journal B*, vol. 89, article 15, 2016.

D. G. Cahill et al., **Nanoscale thermal transport. II. 2003–2012**, *Applied Physics Reviews*, vol. 1, article 011305, 2014.

B. Jusserand et B. Perrin, **La nanophononique: un outil pour l'acoustique térahertz**, *Images de la physique*, CNRS, 2009 (<https://bit.ly/2EbL7Ip>).

T. N. Narasimhan, **Fourier's heat conduction equation**, *Reviews of Geophysics*, vol. 37, pp. 151–172, 1999.

**Groupement de recherche européen « Thermal Nanosciences & Nanoengineering » :** [www.thermalnano.eu](http://www.thermalnano.eu)