

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, Bi_2Te_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

Ces amanites tue-mouches et des espèces voisines font pousser dans les sous-bois des organes producteurs de spores. Ce sont des champignons ectomycorhiziens qui vivent en symbiose avec des plantes.



Mycorhize, la symbiose qui a fait la vie terrestre

L'ESSENTIEL

> Depuis plus de 400 millions d'années, les plantes et les champignons se rendent des services mutuels cruciaux.

> 5 % des espèces de plantes s'associent à des champignons ectomycorhiziens, qui entourent leurs racines d'un manchon.

> 80 % des espèces de plantes s'associent à des champignons

glomérromycètes, qui entrent dans les cellules racinaires et y forment des arbuscules.

> Les glomérromycètes ont rendu possible la sortie des eaux des algues, il y a environ 450 millions d'années, en les aidant à exploiter le sol.

> L'agriculture remplace par des engrais les apports habituels des champignons.

L'AUTEUR



MARC-ANDRÉ SELOSSE
mycologue et botaniste,
professeur au Muséum
national d'histoire
naturelle, à Paris

Sans les champignons, les plantes que nous connaissons n'existeraient pas ! Des champignons aident les plantes en les nourrissant et en les protégeant, en échange de produits de leur photosynthèse. Cette symbiose plante-champignon est à l'origine des écosystèmes terrestres actuels.

Au temps des colonies, les Européens ont tenté de faire pousser en Amérique du Sud et en Afrique des pins pour en faire des mâts de bateaux. Mais les semis échouaient : les plantules végétaient puis mouraient, ou survivaient sans croître... Vigoureux dans l'hémisphère Nord, les pins semblaient incapables de se nourrir sous les tropiques. Puis on découvrit qu'importer du sol européen restaurait la croissance normale des jeunes arbres : sans le savoir, on venait d'introduire les champignons européens sous les tropiques !

La survie de la plupart des plantes dépend en effet des champignons, au point que les pins, accompagnés de leurs champignons, sont devenus aujourd'hui envahissants sous les tropiques. Cette association à bénéfices mutuels entre végétaux et champignons est ancienne : elle date de plus de 400 millions d'années. Très actives, les recherches génétiques et paléontologiques permettent désormais de retracer l'évolution de cette symbiose.

Tout a commencé au Précambrien (avant 541 millions d'années) dans de minces communautés de microbes vivant à la surface des roches. Au sein de ces biofilms attestés par des microfossiles, certaines microalgues et bactéries étaient photosynthétiques tandis que d'autres se nourrissaient des premières. Ces biofilms se développaient à l'interface de l'air et du sol, et

accédaient d'un côté aux ressources minérales et de l'autre aux gaz et à la lumière. La biomasse ainsi formée restait toutefois très limitée.

Puis, à l'Ordovicien (485 à 443 millions d'années), de grandes algues sont sorties des eaux. Submergée, une algue trouve dans l'eau à la fois la lumière, les gaz (notamment le dioxyde de carbone, ou CO_2) et les sels minéraux (nitrate, phosphate, etc.) nécessaires à son alimentation. Elle n'a donc pas de racines, même si elle peut s'accrocher à un rocher. En revanche, survivre à terre signifie s'adapter à un milieu où les ressources sont compartimentées : les gaz et la lumière sont dans l'air ; l'eau et les minéraux sont dans le sol et, de surcroît, le plus souvent peu abondants.

On sait que les algues qui ont réussi cette adaptation sont sorties des eaux douces, car leurs plus proches parents actuels – les characées (une famille d'algues vertes) ou les spirogyres (des algues vertes filamenteuses) – y vivent toujours. Pour donner un âge à cette adaptation, l'équipe de Philip Donoghue, de l'université de Bristol, en Grande-Bretagne, a compté en 2018 les mutations accumulées au cours du temps dans ces différentes lignées, depuis leur ancêtre commun. Cette méthode, dite de l'horloge moléculaire, a daté la divergence entre les algues et les plantes terrestres à quelque 500 millions d'années.

Une fois à terre, les premières plantes ont produit bien plus de biomasse en exploitant les >