

La topologie guide la lumière

Réputées plus économes et plus rapides, les puces utilisant la lumière au lieu de l'électricité – les puces photoniques – pourraient équiper les calculateurs du futur. Or les photons se manipulent plus difficilement que les électrons. Une stratégie prometteuse consiste à recourir à des propriétés d'une discipline appelée « topologie », qui étudie les formes afin de concevoir des circuits structurés avec une certaine symétrie; celle-ci permettrait d'améliorer l'efficacité du transport photonique, notamment dans les virages, alors que la lumière se déplace de façon privilégiée en ligne droite.



Alberto Amo
PHYSICIEN,
UNIVERSITÉ
DE LILLE
Chercheur CNRS, il mène ses recherches au laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules (UMR 8523 CNRS-université de Lille).

(*) Un semi-conducteur est un matériau tantôt isolant tantôt conducteur qui est à la base de l'industrie électronique. Les plus utilisés sont des cristaux comme le silicium ou le germanium.

La topologie est l'étude des propriétés d'un système qui restent inchangées lorsqu'on le déforme. Ce domaine des mathématiques est utilisé depuis quelques années : le prix Nobel de physique 2016 a ainsi récompensé trois pionniers dans son utilisation pour créer de nouveaux types de circuits électroniques – les Britanniques David Thouless, Michael Kosterlitz et Duncan Haldane. Aussi étonnant que cela puisse paraître, cette notion abstraite est désormais utilisée pour concevoir des circuits qui guident la lumière efficacement. En structurant la matière de manière subtile, on parvient à piéger la lumière et à l'acheminer par de tout petits chemins – à l'échelle du micromètre – et surtout à lui faire prendre des virages sans perte d'intensité. Une performance critique quand on sait que la lumière aime se déplacer en ligne droite. À la clé, un bouleversement du domaine de l'optique intégrée : la création de puces photoniques (le photon est la particule de la lumière) qui seraient

utiles pour les télécommunications ou les ordinateurs fonctionnant à l'aide de lumière, appelés ordinateurs photoniques.

D'où vient l'utilisation de la topologie en physique? L'histoire commence par la matière. Dans les années 1980, David Thouless s'intéresse à la topologie dans les systèmes électroniques. La topologie en question n'est pas celle des surfaces, mais celle de la structure électronique des matériaux étudiés. Cette structure, que l'on calcule à l'aide de la physique quantique, comprend des bandes. Or lorsque deux matériaux juxtaposés ont des bandes dont les structures topologiques diffèrent, les électrons se propagent à l'interface toujours de la même façon. Les physiciens comprennent alors que cette « robustesse », cette propriété de conservation de la propagation, résulte directement des structures topologiques. En 2005, Duncan Haldane a l'idée d'appliquer ces idées de topologie développées pour la physique de l'état solide – les électrons qui se propagent sur des métaux et des semi-conducteurs (*) – à la lumière. Il écrit un article fondateur qui fait la jonction entre ces domaines (1). C'est à partir de ses travaux que beaucoup d'équipes, dont la nôtre, ont tenté de créer des circuits topologiques pour la lumière.

DES SYSTÈMES OÙ LUMIÈRE ET MATIÈRE SONT VOLONTAIREMENT « MÉLANGÉES »

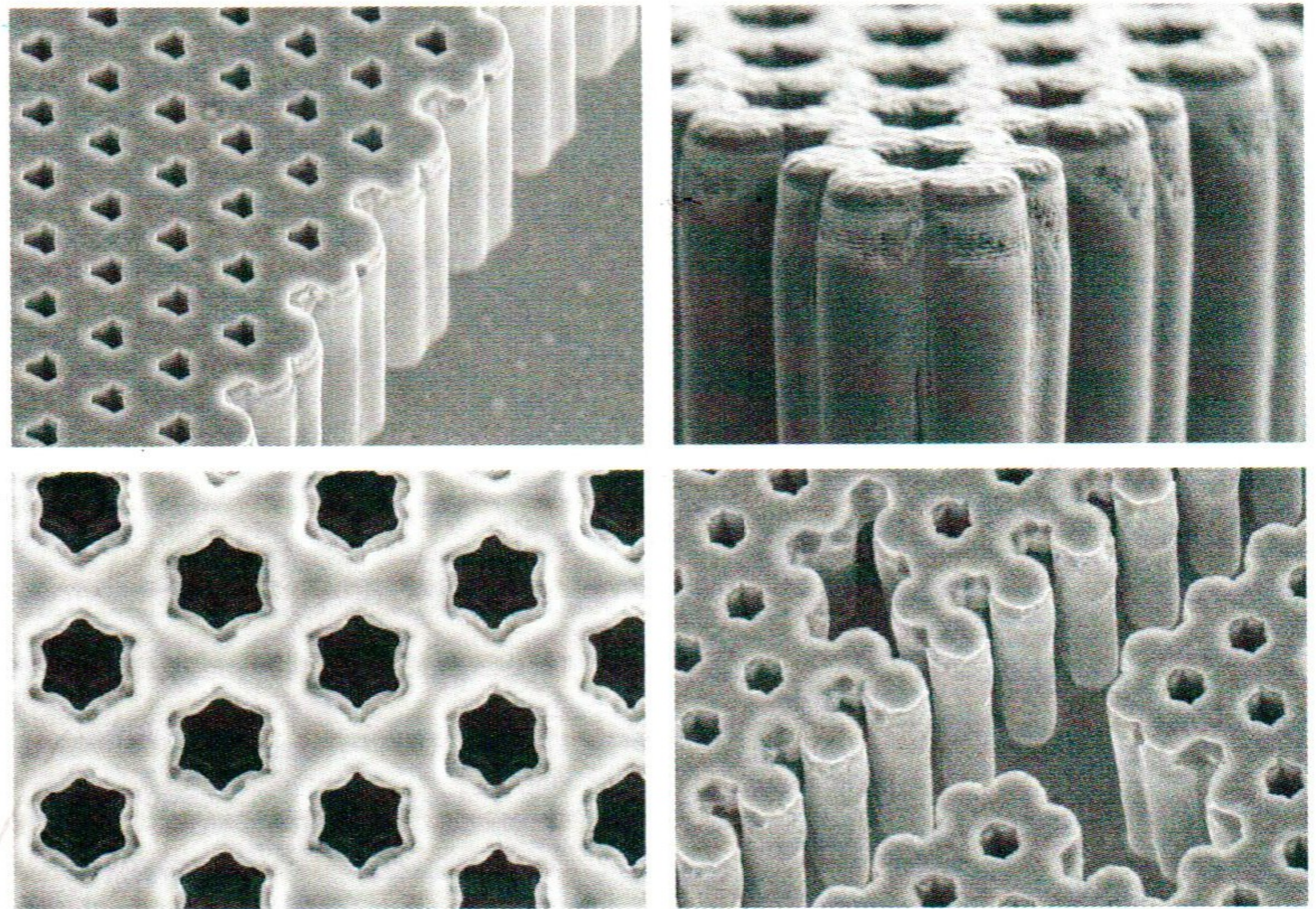
La difficulté principale est qu'en électronique, ces propriétés topologiques sont créées par la présence d'un champ magnétique auquel les électrons sont sensibles. Or les photons sont neutres : ils sont donc insensibles à tout champ magnétique. Dès lors, il s'agit de créer des systèmes où lumière et matière sont volontairement « mélangées », de sorte à les rendre sensibles au champ. Par exemple, les photons peuvent être piégés dans une microcavité où ils subissent une série d'absorptions-réémissions. Ce processus – qui les transforme en photons dits « habillés » – les rend sensibles au champ magnétique. Nous étudions la physique de ces quasi-particules nommées « polaritons », qui ne sont ni tout à fait de la lumière ni tout à fait de la matière, en collaboration avec l'équipe de Jacqueline Bloch, au Centre de nanosciences et de nanotechnologies à Palaiseau (CNRS-univer-

sité Paris-Saclay), dans l'Essonne. Nous recourons aussi à une autre manière de procéder, qui consiste à modifier les symétries dans un réseau de semi-conducteurs afin d'induire un champ magnétique effectif. En pratique, le matériau avec lequel nous travaillons est l'arséniure de gallium (GaAs), un semi-conducteur moins courant que le silicium mais dont les propriétés optiques sont bien meilleures, notamment pour fabriquer des lasers sur puce.

CRÉER DES PUCES PHOTONIQUES AVEC DE NOUVELLES SYMÉTRIES

Quelles sont les symétries à implémenter dans ce matériau afin de créer un guide topologique ? Une stratégie consiste à créer une interface dans le semi-conducteur qui sépare un réseau de trous avec une certaine symétrie spatiale – par exemple « en nid d'abeille dilaté » – d'un réseau de symétrie différente – en « nid d'abeille comprimé ». Les bandes photoniques diffèrent dans chaque partie du réseau, laissant apparaître à l'interface un canal topologique pour les photons. Nous avons mis au point plusieurs de ces circuits et obtenu dans certains une propagation sans perte, soit l'équivalent pour la lumière de ce qu'est un matériau supraconducteur pour l'électricité ; les photons possédaient une longueur d'onde de 800 nanomètres, autrement dit ils se situaient dans l'infrarouge proche (2). De façon analogue, nous avons créé le premier « laser topologique » : à l'interface entre un réseau et le vide (le vide a une topologie particulière dite « triviale », différente de celle du réseau), un état de lumière apparaît bien localisé et cohérent (3). Quel est l'intérêt de ces interfaces topologiques ? Elles permettent de réaliser des circuits photoniques à l'échelle micrométrique particulièrement résistants au désordre : la propagation est « protégée » par la topologie.

Pour le moment, nous concentrons sur les aspects fondamentaux de ces matériaux, nous n'avons pas encore évalué ces guides avec les longueurs d'onde qui sont privilégiées pour les télécommunications (1,5 micromètre). Néanmoins, nous avons lancé un projet pour utiliser cette technique dans le domaine des térahertz (entre 0,1 et 10 THz), une bande de fréquences prometteuse pour les applications en méde-



▲ Différentes symétries gravées dans de l'arséniure de gallium créent des canaux topologiques : les photons se propagent sur les bords des structures bidimensionnelles (chaque trou a un diamètre de 3 micromètres).

cine (imagerie, détection) mais aussi dans le domaine de l'astronomie.

Dans le cadre du projet EmergenTopo, pour lequel j'ai reçu en 2020 un financement européen, nous cherchons en outre à mettre au point de nouvelles stratégies pour manipuler efficacement la lumière dans des circuits photoniques sur puce (4). L'une des voies pour y parvenir consiste à profiter de la sensibilité à l'intensité lumineuse de certains matériaux pour créer des puces photoniques avec de nouvelles symétries. Outre l'intérêt fondamental dans le domaine de la physique des matériaux topologiques (mettre en évidence de nouvelles phases topologiques en photonique), les résultats attendus ouvriraient la voie à la conception de puces photoniques où le transport de la lumière pourrait être contrôlé très rapidement. L'avantage de ces systèmes est en effet la manipulation directe de l'information qui est déjà sous forme de lumière. Ceci permettrait de traiter directement l'information lumineuse qui arrive dans les serveurs de calcul et de données via des fibres optiques, sans avoir besoin de la transformer en signaux électriques, avec à la clé une économie appréciable. ■

(1) F. D. M. Haldane et S. Raghu, *Phys. Rev. Lett.*, 100, 013904, 2008.

(2) O. Jamadi et al., *Light. Sci. Appl.*, 9, 144, 2020.

(3) P. St-Jean et al., *Nat. Photon.*, 11, 651, 2017.

(4) www.hauts-de-france.cnrs.fr/fr/evenerment/lancement-de-lerc-emergen-topo

POUR EN SAVOIR PLUS

■ « Topological Photonics », T. Ozawa et al., *Rev. Mod. Phys.*, 91, 15006, 2019.

■ « La topologie bouleverse la physique », dossier *La Recherche*, n° 530, décembre 2017.