

quantique. Mais cette approche repose sur des principes de la physique quantique (la superposition des états et l'intrication) qu'il est très difficile d'intégrer dans un dispositif macroscopique. Quelques premiers prototypes ont vu le jour ces dernières années, mais ils ne manipulent qu'un nombre limité de bits quantiques (ou qubits).

## DES OBSTACLES SUR LA ROUTE DE LA PHOTONIQUE INTÉGRÉE

Une autre approche, moins radicale, consiste à développer une photonique intégrée où l'information serait transportée et au moins partiellement traitée de façon photonique. On remplacerait alors les électrons des semi-conducteurs par les photons de la lumière. Il serait alors possible d'atteindre des fréquences de cadencage nettement plus élevées, proches du térahertz (1000 gigahertz). La contrepartie est que ces systèmes sont actuellement plus gros et plus gourmands en énergie que ceux constitués de semi-conducteurs. Avant de réaliser un supercalculateur photonique intégré, de nombreux obstacles sont à franchir, l'un des plus importants étant lié à ce qu'on nomme le « caractère réciproque du transport de la lumière ». Cependant, grâce à des idées issues de la topologie, une branche des mathématiques, il est en passe d'être résolu.

# Avec la photonique intégrée, les ordinateurs traiteront 1000 fois plus de données par seconde

Lorsqu'une particule se propage dans l'espace libre, toutes les directions de propagation sont équivalentes. Si un photon se propage dans une fibre optique dans un sens et y rencontre un défaut ou une interface avec un capteur, il pourra être rétrodiffusé et se propager dans le sens opposé. Le caractère réciproque du transport de la lumière correspond à cette absence de direction privilégiée de propagation. C'est un problème pour les systèmes photoniques : par exemple, lorsque la lumière produite par un laser est injectée dans une fibre optique, le changement d'indice optique fait qu'une partie de la lumière est réfléchi et retourne dans le laser

dont elle perturbe le fonctionnement (*voir la figure page ci-contre*).

Pour obtenir un transport non réciproque, une solution est d'ajouter une force externe qui impose une direction de mouvement aux particules. Pour les électrons, porteurs d'une charge électrique, on utilise un champ électrique qui oriente leur flux. Rien d'aussi simple n'est envisageable pour les photons, qui sont des particules neutres. Une solution consiste à placer un « isolateur optique » entre le laser et la fibre, composant de taille centimétrique.

De façon générale, ces réflexions parasites, la réciprocity du transport photonique et l'absence d'isolateurs optiques miniaturisés et intégrables sont rédhibitoires pour la réalisation de circuits photoniques intégrés comportant de nombreux composants logiques. Pour les physiciens, le défi est donc de concevoir des systèmes présentant de façon intrinsèque un transport non réciproque de la lumière.

Des phénomènes physiques présentant un tel comportement sont connus depuis longtemps. C'est le cas de la superfluidité, découverte en 1937 par le physicien soviétique Piotr Kapitsa, à savoir la perte de viscosité d'un fluide à très basse température. Les propriétés de ce fluide sont déterminées par des processus quantiques, où l'énergie des interactions des particules est plus élevée que l'énergie cinétique du superfluide en mouvement. Le fluide présente alors un comportement collectif de toutes ses particules, qui inhibe les processus de diffusion à l'origine du désordre dans le milieu. Or, dans un fluide classique, ce désordre dissipe l'énergie du mouvement des particules et est à l'origine de la viscosité du fluide. Ces perturbations étant absentes dans le superfluide, la viscosité est alors nulle. Les molécules du superfluide s'écoulent dans une seule direction, le transport est non réciproque.

## LE DÉFI DU TRANSPORT NON RÉCIPROQUE

En principe, il est possible de créer un superfluide de lumière dont le flux est insensible au désordre. Pour ce faire, il faut engendrer une interaction photon-photon assez importante et avoir une forte densité de ces particules. Les lois qui régissent le comportement des particules élémentaires indiquent qu'un photon n'interagit pas directement avec un autre photon. Il est néanmoins possible de satisfaire cette condition en considérant des « excitons-polaritons ».

Il s'agit de quasiparticules, c'est-à-dire des entités abstraites qui décrivent des comportements collectifs de particules et qui ont des propriétés analogues à celles de particules réelles. Parmi les quasiparticules les plus connues, les phonons rendent compte des vibrations dans un matériau, et les trous traduisent des lacunes >

> formées par des électrons absents dans certains matériaux (métaux ou semi-conducteurs). Un électron (de charge négative) et un trou (de charge positive) fortement liés constituent un exciton. Le système formé par un exciton interagissant fortement avec un photon est nommé exciton-polariton. Et des excitons-polaritons peuvent interagir les uns avec les autres *via* leur partie électronique.

En 2010, l'équipe d'Alberto Bramati, du laboratoire Kastler-Brossel, à Paris, a réussi à produire un superfluide d'excitons-polaritons à basse température. Puis, en 2017, Daniele Sanvitto, du laboratoire CNR Nanotec, à Lecce, en Italie, et ses collègues ont obtenu ce comportement à température ambiante. L'inconvénient de ces superfluides de lumière est qu'ils nécessitent beaucoup d'énergie pour créer un fluide de haute densité, ce qui rend leur utilisation pratique peu envisageable et pertinente.

## LA TOPOLOGIE AU SECOURS DE LA MATIÈRE CONDENSÉE

Pour les physiciens, les travaux sur les superfluides ont aussi été l'occasion de s'initier aux concepts de la topologie et de généraliser leur utilisation dans l'étude de la matière condensée. La topologie est la branche des mathématiques qui s'intéresse aux caractéristiques globales d'un objet que l'on peut déformer à volonté (sans le déchirer ou en recoller des parties). Dans ce genre de transformations, les distances ou les angles ne sont pas préservés. En revanche, d'autres quantités sont conservées, comme le nombre de trous à travers une surface. Ainsi, un tore peut être transformé en tasse et le trou du premier devient l'anse de la seconde. Avec des déformations continues, il est impossible de faire disparaître le trou ou d'en créer un deuxième.

Les physiciens et les mathématiciens ont noté une analogie fondamentale entre les propriétés topologiques et le fait que les caractéristiques d'un superfluide, comme sa viscosité nulle, résultent d'un comportement global et non défini localement (comme le serait l'angle obtenu à l'intersection de deux droites). Il est ainsi possible de définir des invariants topologiques dans des systèmes physiques. Les outils de la topologie ont dès lors été utilisés pour mieux comprendre la matière.

Par exemple, on observe expérimentalement des vortex (des tourbillons de matière) au sein des superfluides, phénomène qui avait été prévu en 1947 par Lars Onsager, chercheur d'origine norvégienne. Ces excitations ont un moment cinétique quantifié, c'est-à-dire que la vitesse de rotation du fluide autour de l'axe du vortex ne peut prendre que certaines valeurs. On retrouve cette idée en topologie avec le nombre d'enroulements (qui définit combien de fois une courbe enlace un objet). Et si l'on regarde la fonction d'onde du superfluide, c'est-à-dire l'objet

mathématique qui décrit le comportement quantique du superfluide, on constate qu'elle s'annule au centre du vortex. Conséquence: une fois qu'un vortex est créé, il ne peut pas être éliminé par une déformation continue de la fonction d'onde, de la même façon que le trou de la tasse. On parle alors de défauts topologiques.

Ces observations sont plus que des analogies: il est possible d'utiliser les outils de la topologie pour décrire efficacement des superfluides, mais aussi des supraconducteurs (matériaux où le courant électrique circule sans résistance). Ces dernières décennies, la topologie a aussi été fondamentale pour l'étude et la compréhension des «isolants topologiques». Ces nouveaux matériaux se comportent comme des isolants électriques dans leur volume, mais comme des conducteurs sur leurs bords et la circulation des électrons n'y est possible que selon une unique direction.

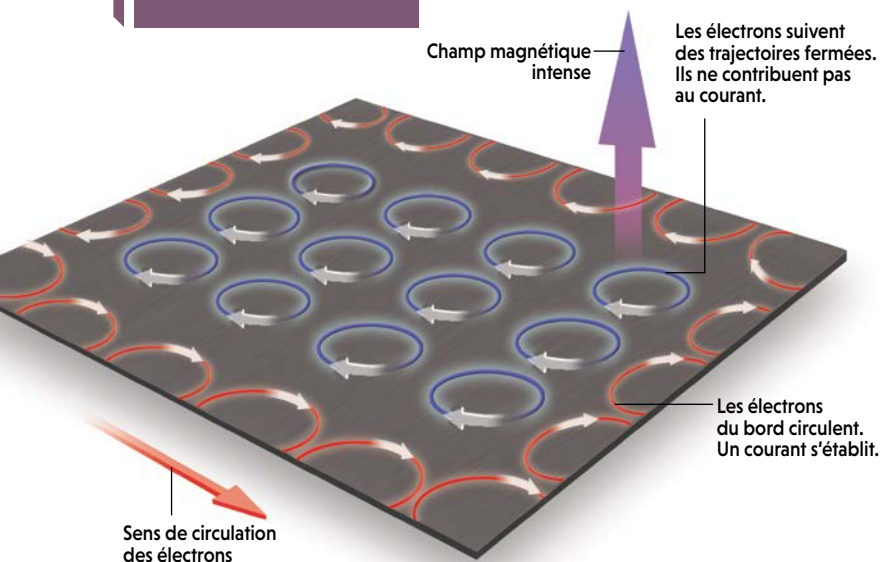
Les isolants topologiques présentent aussi des «vortex», mais d'un type particulier. Ces vortex ne sont pas des tourbillons de matière comme précédemment. Ils sont associés à la fonction d'onde d'une particule de l'isolant dans l'espace réciproque des impulsions, un espace abstrait plus approprié pour décrire des ondes que l'espace tridimensionnel ordinaire. Dans l'espace réciproque des impulsions, un objet, ici la fonction d'onde, n'est pas représenté en fonction des coordonnées d'espace et de temps, mais en fonction de son énergie et de son impulsion ou vecteur d'onde (qui indique la direction de propagation de l'onde et est inversement proportionnel à sa longueur d'onde). Les vortex des isolants topologiques sont caractérisés par un invariant topologique quantifié, le «nombre de Chern», assez similaire au nombre d'enroulements des vortex d'un superfluide.

Historiquement, Klaus von Klitzing, alors au Laboratoire des champs magnétiques intenses, à Grenoble, a identifié les premiers isolants topologiques en 1980, en mettant en évidence l'effet Hall quantique. Il a été récompensé par le prix Nobel en 1985 pour cette découverte. L'effet est

**Grâce à la protection topologique, le courant circule malgré la présence d'impuretés**

## L'EFFET HALL QUANTIQUE

**E**n 1879, le physicien américain Edwin Hall a découvert la version classique de l'effet qui porte son nom. Il a appliqué un champ électrique au matériau conducteur afin de faire circuler ses électrons, tandis que le dispositif était placé dans un champ magnétique perpendiculaire. Ce dernier exerce sur les électrons une force dite de Lorentz, qui les dévie



dans la direction orthogonale aux deux champs. Cela donne naissance à un courant et une tension électrique transverse, dont la résistance associée, dite de Hall, est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique.

En 1980, Klaus von Klitzing, au Laboratoire des champs magnétiques intenses, à Grenoble, a repris cette expérience dans des conditions particulières : le matériau, très mince et donc quasi bidimensionnel, est refroidi à une température proche du zéro absolu et soumis à un champ magnétique intense. Il a remarqué que la résistance de Hall est quantifiée : elle augmente par paliers quand on augmente l'intensité du champ magnétique. En effet, lorsque le champ magnétique est assez intense, la trajectoire des électrons se courbe assez pour se refermer. Ils sont donc localisés et ne participent pas à la conduction électrique. Ces états électroniques sont appelés « niveaux de Landau » et leur énergie est quantifiée. En revanche, les électrons du bord forment des demi-orbitales et peuvent se déplacer dans une unique direction de propagation définie par l'orientation du champ magnétique.

L'aspect remarquable de cette découverte est que la conductivité de ces états de bord est rigoureusement quantifiée et proportionnelle à un nombre (un invariant topologique), qui dépend de l'état des électrons au sein du matériau bidimensionnel et non sur le bord. Les propriétés de ce courant ont donc un caractère global. Il est alors topologiquement protégé : une impureté n'empêche pas sa circulation.

observé en partant d'un matériau semi-conducteur très plat et considéré bidimensionnel, soumis à un champ magnétique orthogonal qui impose une trajectoire courbée aux électrons. À l'intérieur du matériau 2D, les électrons sont piégés dans des trajectoires circulaires et ne contribuent pas à l'établissement d'un courant : le matériau est isolant. En revanche, sur les bords, le champ magnétique amène les électrons à suivre le bord selon un sens imposé par l'orientation du champ magnétique : le matériau est conducteur (voir l'encadré ci-dessus).

### ISOLANT EN VOLUME, CONDUCTEUR EN SURFACE

On a d'abord cru que ce phénomène d'isolant en volume, mais conducteur sur les bords, était intimement associé à cette configuration particulière des trajectoires fermées pour les électrons de l'effet Hall quantique. Mais en 1988, le chercheur britannique Duncan Haldane, Prix Nobel de physique en 2016, a démontré que ce phénomène était beaucoup plus général.

Mais pourquoi tel matériau est-il conducteur, isolant ou isolant topologique ? Pour le comprendre, il faut évoquer la théorie des bandes. Dans un atome isolé, les électrons, vus comme des ondes, n'accèdent qu'à des énergies particulières, discrètes, déterminées par la

physique quantique. Dans un matériau doté d'un réseau cristallin, ces ondes interfèrent et les énergies accessibles aux électrons s'étendent à des intervalles continus, ou bandes, séparées par des domaines de valeurs d'énergie interdites aux électrons, domaines nommés bandes interdites ou « gaps ». Selon le remplissage des bandes par les électrons et la disposition des bandes, le matériau est conducteur, isolant ou semi-conducteur (voir l'encadré page 66).

À partir des années 1980, les physiciens ont constaté que le spectre d'énergie des bandes était insuffisant pour décrire tous les aspects de la conductivité, et notamment le cas des isolants topologiques. Ils ont compris que la structure des fonctions d'ondes associées aux électrons avait aussi son importance.

L'aspect topologique émerge quand on considère une grandeur, la courbure de Berry, associée à la fonction d'onde qui décrit un électron dans une bande. Le Britannique Michael Berry a introduit cette notion en 1984 pour décrire certains phénomènes quantiques. Elle est mathématiquement analogue à un champ magnétique. Or, quand on intègre la courbure de Berry sur l'ensemble des électrons dans une bande complète, on obtient une quantité que le mathématicien sino-américain Shiing-Shen Chern avait étudiée dans les ➤

> années 1950. Cette quantité, le «nombre de Chern», est un invariant topologique qui ne peut prendre que des valeurs entières. Elle caractérise la topologie de la bande considérée, sa courbure globale et l'existence ou non d'un vortex dans l'espace réciproque.

Un gap est dit topologique lorsque le nombre de Chern total, obtenu par l'addition des nombres de Chern des bandes sous ce gap est non nul. Dans ce cas, il existe un niveau d'énergie autorisé dans le gap. Les électrons qui occupent cet état peuvent circuler dans le matériau. Mais

physiquement, cet état propagatif est localisé uniquement à la surface du matériau. On parle de correspondance volume-surface, car la topologie des bandes (définies par les électrons dans le volume du matériau) détermine l'existence et les propriétés des états de surface.

Autre particularité de ces états : la circulation du courant en surface est unidirectionnelle ; on obtient donc un transport non réciproque. Par ailleurs, ces états sont dits protégés topologiquement : comme cette conduction unidirectionnelle est une propriété topologique, et donc

## THÉORIE DES BANDES ET TOPOLOGIE

D'après les règles de la physique quantique, dans un atome isolé, les électrons occupent des niveaux d'énergie discrets. En revanche, dans le réseau cristallin d'un matériau, les valeurs possibles de l'énergie électronique s'étendent sur des intervalles continus, ou bandes, séparées par des intervalles

nommés bandes interdites, ou « gaps ».

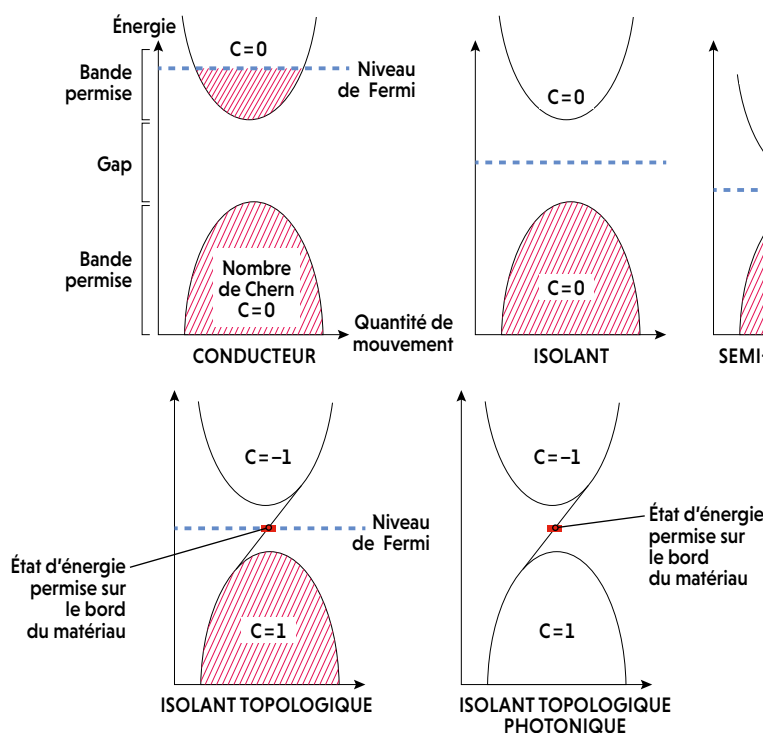
Cette structure énergétique résulte du comportement ondulatoire des électrons. En raison de la périodicité du réseau cristallin, leurs ondes interfèrent et créent cette structure de bandes. Les électrons remplissent les bandes en obéissant à certaines règles. Ce sont des fermions, ce qui implique qu'il ne peut y avoir deux électrons dans le même état quantique. Ils remplissent donc les bandes d'énergies permises en commençant par les plus basses. Ce remplissage définit le niveau de Fermi, qui correspond à peu près au niveau de plus haute énergie occupé par un électron au zéro absolu ( $-273^{\circ}\text{C}$ , ou 0 kelvin).

Si le niveau de Fermi appartient à une bande permise, le matériau est conducteur, et caractérisé par un transport réciproque (pas de direction privilégiée du courant) : les électrons circulent facilement si l'on applique une tension électrique. Si le niveau de Fermi est dans une bande interdite assez large, le matériau est un isolant. Si le gap est étroit, il suffit d'apporter un peu d'énergie pour que l'électron passe dans la bande supérieure, la bande de conduction ; le matériau est alors semi-conducteur.

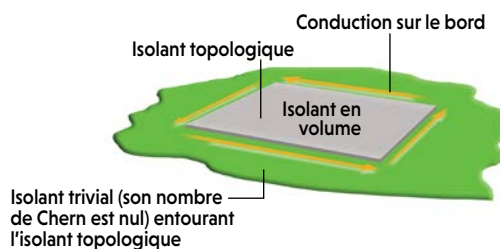
Dans les années 1980, les physiciens ont découvert que l'énergie des bandes n'est pas le seul critère à prendre en compte pour décrire les propriétés électroniques d'un matériau. Ils ont mis en évidence un paramètre pour

chaque bande : un invariant topologique nommé nombre de Chern qui, s'il est non nul, implique un comportement particulier du matériau, celui des isolants topologiques. Ainsi, si le niveau de Fermi est dans un gap et que les nombres de Chern sont non nuls, le matériau est isolant en volume. Mais un état d'énergie autorisé existe alors dans le gap sur le bord du matériau (à l'interface avec un isolant trivial comme l'air). On a donc un courant en surface qui est unidirectionnel et dont le sens dépend du signe de la somme des nombres de Chern des bandes situées sous le gap.

Dans un matériau photonique, les photons étant des bosons, ils ne remplissent pas les bandes comme les électrons (il n'y a pas de niveau de Fermi). Cependant, dans certaines configurations, comme dans un cristal photonique, il est possible d'avoir un comportement d'isolant en volume car un photon ne peut pas se propager à l'énergie du gap dans le volume du matériau. Et les nombres de Chern peuvent être non nuls, ce qui peut conduire à l'existence d'un état de propagation unidirectionnelle sur la surface, à l'énergie du gap.



### CORRESPONDANCE DANS L'ESPACE RÉEL POUR UN ISOLANT TOPOLOGIQUE



## L'UBIQUITÉ DE LA TOPOLOGIE

**En 2005, Duncan Haldane a montré que les principes de topologie qui s'appliquent aux systèmes électroniques et photoniques sont très généraux et sont généralisables à n'importe quel type d'ondes. Aujourd'hui, des physiciens utilisent des arguments topologiques pour interpréter, par exemple, le mouvement d'ondes géophysiques équatoriales. En 2017, une équipe de l'ESPCI, à Paris, et de l'EPFL, à Lausanne, a mis en évidence des effets topologiques en étudiant des ondes acoustiques se propageant dans des réseaux faits de canettes de Coca-Cola !**

globale, le courant circule sans être perturbé par des fluctuations locales telles que des défauts ou des impuretés dans le réseau cristallin. C'est la même idée que dans le superfluide, où les perturbations responsables de la viscosité du fluide sont supprimées.

Grâce à la topologie et au nombre de Chern, il a été possible de développer une description mathématique rigoureuse de l'effet Hall quantique. Et grâce à cette approche, Duncan Haldane a montré qu'il était possible d'avoir des bandes avec une courbure globale non nulle sans que les électrons suivent des trajectoires circulaires fermées – ce qu'il a nommé l'effet Hall quantique anormal.

Ainsi, pour obtenir une description complète de la conductivité d'un solide, il faut étudier les bandes électroniques et leur remplissage, mais aussi leur nombre de Chern. Ce constat a suscité de nombreux développements théoriques et expérimentaux pour trouver de nouveaux isolants topologiques.

En 2005, Charles Kane et Eugene Mele, de l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis, ont proposé un type d'isolant topologique qui ne se manifeste pas grâce à un champ magnétique externe comme dans l'effet Hall quantique, mais qui est fondé sur le couplage spin-orbite des électrons. Cette interaction relie le mouvement de l'électron à son spin (son moment magnétique intrinsèque, que l'on peut se représenter comme une flèche qui pointe vers le haut ou vers le bas). Du fait de ce couplage, l'électron dans un solide ressent une force similaire à celle qu'il subirait en présence d'un champ magnétique et dont la direction dépend de son spin.

On obtient ainsi des états de surface correspondant à deux courants de sens opposés, en fonction de l'orientation du spin. Ces courants de spin sont topologiquement protégés ; on parle alors d'effet Hall quantique de spin. Ce nouveau type d'isolant topologique est très intéressant, car il ne nécessite pas un champ magnétique externe et apparaît davantage comme une propriété intrinsèque au matériau. L'effet Hall quantique de spin a été observé très vite après sa prédiction et fait encore aujourd'hui l'objet d'intenses recherches.

## ET LES PHOTONS ?

Ces derniers isolants topologiques sont la preuve qu'il est *a priori* possible d'avoir un transport non réciproque sans faire appel à un agent extérieur tel qu'un champ électrique ou magnétique. Il ne serait donc pas obligatoire d'utiliser des particules chargées, mais ces principes sont-ils pour autant transposables aux photons ? La réponse est oui.

Une première étape a été franchie en 1988 lorsque Eli Yablonovitch, de la société Bell Communications Research, et Sajeev John, de l'université de Princeton, ont inventé les

cristaux photoniques. Ces dispositifs reposent sur une modulation périodique de l'indice de réfraction au sein du matériau. Comme pour les électrons, l'interférence des ondes électromagnétiques avec ce milieu périodique conduit à une structure de bandes d'énergies permises et de bandes interdites. Autrement dit, les photons qui se propagent dans le cristal photonique ont une énergie compatible avec les bandes permises, mais ne peuvent pas accéder aux énergies des gaps.

Deuxième étape, en 2005, Duncan Haldane a encore généralisé la portée de la physique topologique en montrant que ses concepts s'appliquaient aussi aux systèmes photoniques, et plus généralement à n'importe quel type d'onde se propageant dans un milieu. Plus précisément, il a montré que les bandes d'énergies photoniques sont caractérisées par la même courbure globale que leurs homologues électroniques, ce qui a donné naissance à la photonique topologique.

Son article a mis trois ans à être publié, ce qui témoigne de la forte opposition à laquelle il a dû faire face à l'époque. Il y a en effet plusieurs différences essentielles entre les photons et les électrons. Même si des bandes d'énergie existent pour les photons dans un cristal photonique, le concept de remplissage des bandes, lié à la nature fermionique des électrons est absent. Parce qu'ils ont un spin  $1/2$ , demi-entier (ce qui en fait des fermions), les électrons obéissent au principe d'exclusion de Pauli selon lequel il ne peut y avoir deux électrons dans le même état quantique. Ils occupent donc différents niveaux d'énergie dans les bandes, ce qui permet de les remplir. Les photons, eux, sont des bosons (car ils ont un spin entier, égal à 1) et ne sont donc pas soumis au principe d'exclusion de Pauli. Ainsi, lorsqu'on parle d'isolant en photonique, on veut simplement dire qu'il existe un gap et que la propagation de la lumière dans le milieu est interdite aux énergies du gap.

Par ailleurs, les électrons sont chargés. Ils sont donc sensibles à un champ magnétique *via* la force de Lorentz. En appliquant un tel champ (externe ou par le couplage spin-orbite) à des électrons, leur évolution n'est plus symétrique si l'on inverse le sens d'écoulement du temps. Or, au niveau le plus fondamental, c'est la brisure de la symétrie temporelle (peu importe son origine) qui donne un nombre de Chern non nul.

Si une telle brisure de symétrie n'est pas évidente *a priori* pour les photons, il faut noter que l'onde électromagnétique associée aux photons présente une polarisation (linéaire, circulaire, etc.), qui caractérise la direction dans laquelle son champ électrique oscille au cours de sa propagation. Dans certains cas, il est possible d'associer à la polarisation une courbure de Berry non nulle (et donc un nombre de Chern non nul). Pour y parvenir, il faut utiliser des matériaux ➤

## DE LA TOPOLOGIE AUX NOMBRES DE CHERN

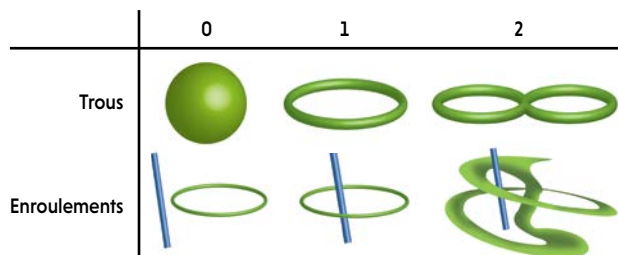
**L**a topologie est la partie des mathématiques qui s'intéresse aux caractéristiques globales de la géométrie des objets. Les invariants topologiques sont des nombres entiers ou demi-entiers correspondant à ces caractéristiques. Pour un solide en 3D, l'invariant le plus connu est le « genre », qui décrit le nombre de trous que présente sa surface. Le genre (une propriété globale de l'objet) est calculé à partir de l'intégrale de la courbure, définie localement en chaque point de la surface. Un ballon de rugby et un ballon de football sont géométriquement distincts, mais leur genre est le même et ils sont topologiquement équivalents. On peut déformer continûment l'un en l'autre sans créer de trous dans la surface. Pour des courbes, on peut définir le nombre d'enroulements (combien de fois cette courbe enlance

un objet), qui se calcule avec l'intégrale de l'angle polaire du point qui se déplace le long de la courbe. On constate que les invariants sont en général les intégrales des propriétés locales (courbure, angle polaire), et ces intégrales conservent uniquement les informations sur les propriétés globales des systèmes.

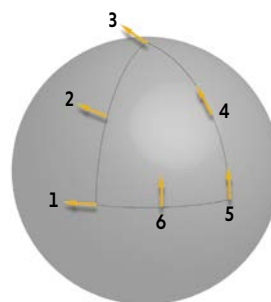
Le théorème de Gauss-Bonnet est fondamental en topologie, car il relie de façon très générale les propriétés locales d'un objet à l'une de ses propriétés globales. Par exemple, l'intégrale, sur toute la surface  $\Sigma$  d'un objet, de sa courbure locale  $F$  (intégrée sur tous les éléments de surface  $dS$ ) est reliée au genre  $\nu$  (le nombre de trous de l'objet). Or si l'on déforme la surface de l'objet, le genre reste, lui, inchangé.

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\Sigma} F dS = 2(1-\nu)$$

En physique de la matière condensée, les outils de la topologie ne s'appliquent pas à l'objet physique mais à la structure des bandes d'énergie accessibles aux particules mobiles dans ce matériau. On définit d'abord la courbure de Berry. Pour comprendre ce paramètre, une analogie est celui du transport parallèle d'un vecteur sur une surface



La topologie classe les objets selon le nombre de trous ou d'enroulements qu'ils exhibent, des propriétés invariantes lorsque l'objet est déformé de façon continue.



courbe. En évoluant sur un circuit fermé en respectant certaines contraintes sur son orientation, le vecteur final et le vecteur initial ne pointent pas dans la même direction. Le transport parallèle sur la surface courbe a induit l'apparition d'un angle entre les deux vecteurs (voir ci-dessus). De la même façon, on peut assimiler à un vecteur la fonction d'onde qui décrit un électron dans

Dans le transport parallèle sur une sphère, on constate qu'un vecteur que l'on fait glisser de l'équateur (1), vers le pôle nord (3) puis de nouveau vers l'équateur (5) en passant par un autre méridien et en gardant le même angle avec chaque branche de son trajet, a subi une rotation en revenant au point de départ (6).

une bande. On peut associer une courbure, la courbure de Berry, au changement d'orientation de ce vecteur lorsqu'un électron se déplace dans l'espace réciproque des impulsions. En intégrant cette courbure sur une bande complète, on applique le théorème de Gauss-Bonnet et on obtient un invariant topologique, le nombre de Chern, qui caractérise la topologie de la bande.

> gyromagnétiques, qui ont la particularité d'avoir un indice optique différent pour les polarisations circulaires droite et gauche de la lumière.

Ainsi, dans un cristal photonique fait de matériaux gyromagnétiques, le gap photonique peut être associé à un nombre de Chern non nul. En 2009, le groupe de Marin Soljačić, au MIT (l'institut de technologie du Massachusetts) a confirmé expérimentalement cette prédiction théorique. Le problème est que les matériaux ayant une activité gyromagnétique fonctionnent typiquement dans le domaine fréquentiel des microondes, très loin des fréquences optiques qui sont celles généralement utilisées pour transporter l'information.

La piste des isolants topologiques liés à l'effet Hall quantique de spin a aussi été explorée. Ceux-ci ont l'avantage de fonctionner sans champ magnétique. Il faut cependant définir un équivalent du spin de l'électron pour le photon : comme la polarisation de la lumière peut toujours être décomposée en deux composantes linéaires (souvent nommées « horizontale » et

« verticale »), on obtient une description de l'onde électromagnétique comme un système à deux niveaux associés à un pseudo-spin.

En 2011, Mohammad Hafezi et ses collègues, de l'université du Maryland, aux États-Unis, se sont inspirés de cette idée de pseudo-spin pour proposer une autre solution. Ils ont construit un réseau photonique périodique constitué de résonateurs optiques circulaires (des guides d'onde où la lumière s'accumule par interférences constructives) dans du silicium. Chaque résonateur a deux états différents, selon le sens dans lequel circule la lumière, et que l'on identifie aux états d'un pseudo-spin. Le défaut de cette approche est que la protection topologique du sens de propagation n'est pas totale, car on n'a pas un vrai spin comme pour un électron. Pour ce dernier, la direction du spin, qui définit le sens de propagation, ne peut être inversée. Mais avec le pseudo-spin du photon, l'inversion reste possible.

D'autres importantes avancées sont fondées sur le potentiel des quasiparticules mixtes

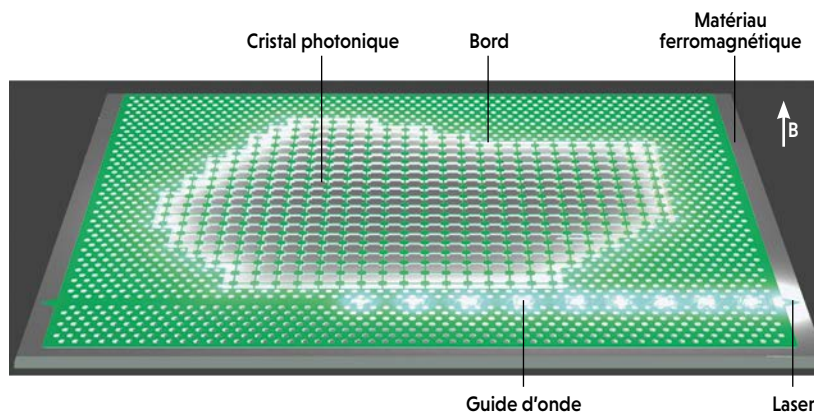
lumière-matière, les excitons-polaritons, dont nous avons déjà évoqué l'intérêt pour constituer un superfluide de lumière. Ici, en raison de leur partie électronique, ces quasi-particules ont une activité magnétique pour des ondes se propageant à des fréquences optiques.

Ainsi, en 2015, notre équipe a montré théoriquement qu'en plaçant ces excitons-polaritons dans un réseau périodique approprié, il était possible d'obtenir un analogue polaritonique de l'effet Hall quantique anormal. L'observation expérimentale de cet effet vient d'être rapportée par le groupe de Sven Höfling, de l'université de Würzburg, en Allemagne. Nous avons aussi montré qu'il était possible d'utiliser cet effet pour réaliser des micro-isolateurs photoniques fonctionnant à des longueurs d'onde optiques, ce qui est un prérequis indispensable à leur utilisation pratique. En garantissant un transport non réciproque, ces micro-isolateurs, placés en série après une diode laser, empêchent la lumière de revenir dans la diode et d'en perturber le fonctionnement. Nous sommes donc en passe de résoudre le problème de la photonique intégrée et de la question du transport non réciproque.

## UN LASER INTÉGRÉ

La richesse du domaine nous permet d'aller plus loin encore, avec le développement des lasers topologiques. Notre équipe a proposé cette idée en 2016 : l'effet laser se développerait directement dans un état topologiquement protégé, ce qui permet d'intégrer dans le même composant le laser et l'isolateur. Dès 2017, le groupe de Jacqueline Bloch, au C2N (le Centre de nanosciences et de nanotechnologies, à Palaiseau, près de Paris), a concrétisé cette idée dans des réseaux à une dimension. La même année, Boubacar Kanté, de l'université de Californie à San Diego, et ses collègues ont fait état d'un laser topologique bidimensionnel, fondé sur l'effet Hall quantique anormal (voir l'image ci-dessus).

Cette démonstration résulte d'un tour de force technique, à savoir obtenir un effet magnétique pour des modes photoniques aux fréquences « télécoms » proches de l'optique. En effet, les semi-conducteurs ont normalement une faible réponse magnétique dans ce domaine de longueurs d'onde. L'équipe de Boubacar Kanté a combiné son réseau bidimensionnel avec un matériau ferromagnétique qui amplifie l'effet d'un champ magnétique appliqué, en permettant aux électrons du semi-conducteur de ressentir une intensité de champ d'une quinzaine de teslas. Ce champ magnétique a permis la formation d'un gap topologique, et l'existence d'un état de bord unidirectionnel autour du cristal photonique. Ce dispositif s'est aussi comporté comme une cavité où l'effet laser s'est développé. Une partie de la lumière était ensuite



En 2017, Boubacar Kanté et son équipe ont mis au point un laser topologique. Sur un matériau ferromagnétique qui amplifie un champ magnétique  $B$ , les chercheurs ont gravé un cristal photonique dans un matériau semi-conducteur au bord duquel se développe un mode photonique unidirectionnel. Ce système forme une cavité où l'émission stimulée du laser se développe. Un guide d'onde placé à proximité permet d'extraire la lumière.

extraite en couplant le dispositif à un guide d'onde. Grâce au caractère unidirectionnel du mode topologique du dispositif, une onde rétro-diffusée dans le guide d'onde ne pénètre pas dans la cavité laser. Le dispositif se comporte donc comme un laser suivi d'un isolateur, les deux intégrés dans la même structure.

En 2018, Mordechai Segev, du Technion, en Israël, et ses collègues ont développé un autre type de laser topologique, cette fois fondé sur un analogue de l'effet Hall quantique de spin et l'utilisation d'un réseau de résonateurs couplés similaire à celui considéré par Mohammad Hafezi (voir l'image page 65). Il n'y a cette fois pas besoin de champ magnétique externe, mais il n'y a pas non plus d'unidirectionnalité (puisque l'on a seulement des pseudo-spins et non des spins comme pour les électrons). L'amplification laser se développe dans les deux composantes de spins se propageant chacune dans une direction opposée.

Récemment, notre équipe a proposé de combiner la notion de superfluide et de topologie des bandes d'énergie pour obtenir un nouvel analogue de l'effet Hall quantique de spin. Dans ce cas, le rôle du spin est assuré par le sens de l'enroulement des vortex du superfluide de lumière. Cette quantité étant elle-même topologiquement protégée, la conservation du spin est garantie et le caractère non réciproque du transport topologique est entièrement restauré. Il reste à mettre en œuvre cette idée.

Les développements de ces dernières années sont impressionnants. Grâce à la topologie, nous sommes en mesure d'imaginer une grande variété de solutions théoriques à la question du transport non réciproque, dont certaines ont été réalisées expérimentalement. Ces résultats sont encourageants et l'intérêt de ces systèmes est incontestable. Le développement de micro-isolateurs optiques et leur intégration semblent un objectif à portée de main, ce qui ouvrira la voie aux circuits intégrés optiques de demain. ■

## BIBLIOGRAPHIE

- B. Bahari et al., **Nonreciprocal lasing in topological cavities of arbitrary geometries**, *Science*, vol. 358, pp. 636-640, 2017.
- P. St-Jean et al., **Lasing in topological edge states of a one-dimensional lattice**, *Nature Photonics*, vol. 11, pp. 651-656, 2017.
- D. Solnyshkov et al., **Kibble-Zurek mechanism in topologically nontrivial zigzag chains of polariton micropillars**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, 046402, 2016.
- A. V. Nalitov et al., **Polariton Z topological insulator**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 114, 116401, 2015.
- F. D. M. Haldane et S. Raghu, **Possible realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, 013904, 2008.
- F. D. M. Haldane, **Model for a quantum Hall effect without Landau levels**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, pp. 2015-2018, 1988.

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

---

EN TRIANT VOS JOURNAUX,  
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,  
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES  
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE  
PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE  
UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

[CONSIGNESDETRI.FR](http://CONSIGNESDETRI.FR)

---

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio