

A

CTUALITÉS

P. 6 Échos des labos

P. 16 Livres du mois

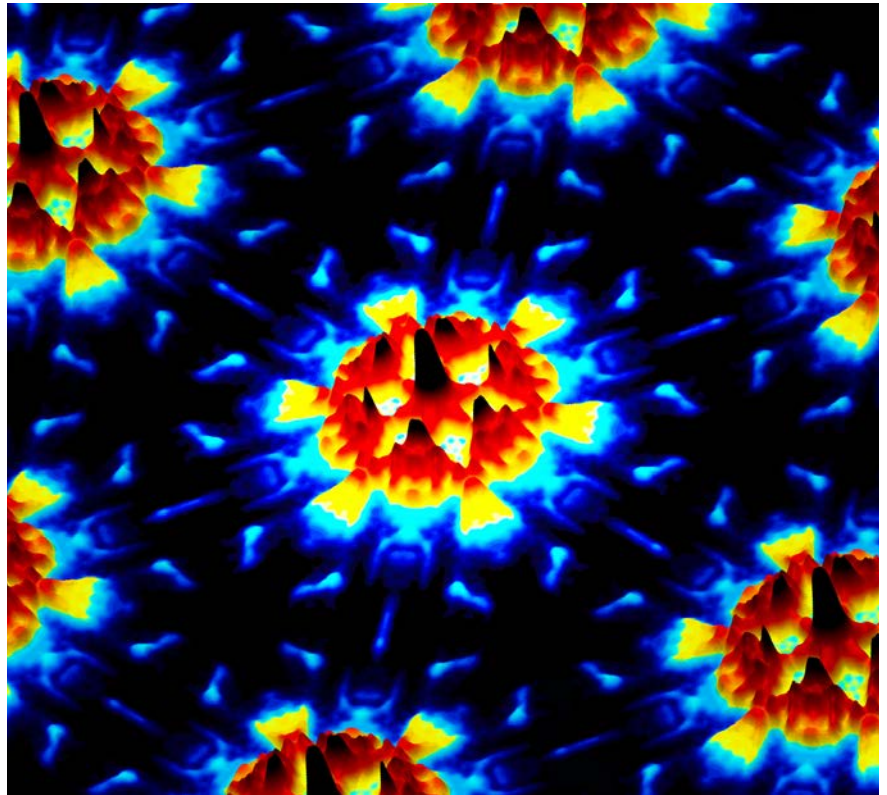
P. 18 Agenda

P. 20 Homo sapiens informaticus

P. 22 Questions de confiance

PHYSIQUE

DES MATÉRIAUX TOPOLOGIQUES PAS SI RARES



Dans ce matériau à base de bismuth, le comportement des électrons, illustré par ce motif, est typique d'un isolant topologique.

Seule une centaine de ces matériaux aux propriétés exotiques étaient connus. Grâce à deux analyses systématiques, ce nombre pourrait être porté à plusieurs milliers. Une révolution !

Au début du **xxi^e** siècle, les physiciens ont découvert des matériaux aux propriétés très exotiques, nommés matériaux topologiques.

Deux équipes, dont l'une menée par Andrei Bernevig, de l'université Princeton, à laquelle a participé Nicolas Regnault, chercheur CNRS à l'École normale supérieure, à Paris, viennent de montrer que ces matériaux topologiques seraient plus nombreux dans la nature qu'on ne le pensait.

La topologie est la partie des mathématiques qui s'intéresse aux propriétés globales d'un objet, celles qui ne varient pas quand on le déforme de façon

continue (en l'étirant, par exemple). Dans un matériau topologique, ce n'est pas la forme de l'objet qui compte, mais certains aspects de la description quantique et ondulatoire des électrons qu'il contient.

Du fait de l'agencement régulier des atomes dans la structure cristalline du matériau, les ondes associées aux électrons interfèrent. Les énergies que peuvent prendre ceux-ci sont alors restreintes à des intervalles continus, ou « bandes », séparées par des « gaps », des bandes interdites. Les électrons remplissent d'abord les bandes de plus basses énergies. La dernière bande complètement remplie est celle dite de valence. Si un électron passe dans la bande supérieure, la bande de conduction,

l'électron est libre de circuler dans le matériau. Si le gap qui sépare la bande de valence de la bande de conduction est grand, l'électron ne peut jamais y parvenir : le matériau est alors isolant. Si le gap est petit, c'est un semi-conducteur : il faut fournir un peu d'énergie pour que des électrons puissent circuler. Si la bande de conduction est déjà partiellement remplie, ses électrons circulent facilement : on a un métal conducteur. La compréhension de ces propriétés a permis le développement de toute l'électronique moderne.

Dans les années 2000, le paysage des propriétés électroniques s'est enrichi. Les physiciens ont découvert des matériaux isolants en volume, mais conducteurs sur leur surface : les isolants topologiques. Ce caractère particulier est lié à des symétries dans la structure des bandes du matériau. De tels matériaux sont prometteurs en électronique car ils sont de très

bons conducteurs. En effet, du fait de son origine topologique, la conduction a un caractère global: un défaut local n'altère pas la circulation du courant électrique.

Jusqu'à présent, on n'avait identifié qu'une centaine de matériaux topologiques. Les physiciens pensaient ainsi que les matériaux topologiques étaient plutôt rares, des sortes d'anomalies. En outre, calculer théoriquement les propriétés topologiques d'un matériau est très difficile, ce qui empêche de réaliser une recherche systématique parmi les 200 000 structures cristallines inorganiques connues. Or une telle exploration serait nécessaire pour trouver des matériaux faciles à fabriquer, non toxiques et intéressants pour des applications en électronique à température ambiante.

En 2017, Andrei Bernevig et ses collègues ont développé une nouvelle approche, la chimie quantique topologique. Dans ce cadre, les physiciens partent des symétries de la structure cristalline d'un matériau pour déterminer le comportement des électrons et mettre en évidence les éventuelles propriétés topologiques. Elle a rendu possible une recherche systématique, qui vient d'être réalisée par deux équipes. Celle d'Andrei Bernevig a analysé 27 000 matériaux dont la structure cristalline est très bien connue. Près de 27% de ces matériaux seraient topologiques: ils ne seraient donc pas si rares!

Les deux équipes parviennent à des conclusions similaires quant à la profusion de matériaux topologiques. Cela reste cependant des prédictions et tous ces matériaux ne seront certainement pas intéressants pour des applications. Il faudra alors les tester expérimentalement. Pour faciliter la tâche des chercheurs, l'équipe d'Andrei Bernevig a créé un site internet qui les répertorie tous, avec leurs caractéristiques. Ce catalogue pourrait continuer à croître. Par exemple, la méthode utilisée ne permet pas, pour l'instant, d'analyser les matériaux magnétiques. «Pour établir l'existence de propriétés topologiques, il faut considérer 230 groupes de symétrie pour les matériaux non magnétiques, explique Nicolas Regnault; or ce nombre passe à 1651 pour les matériaux magnétiques. Il s'agit là de notre prochain défi titanique à relever.» ■

SEAN BAILLY

T. Zhang *et al.*, *Nature*, vol. 566, pp. 475-479, 2019;
M. G. Vergniory *et al.*, *ibid.*, pp. 480-485
Catalogue en ligne: http://bit.ly/PLS498_Topo

Véhicules électriques : des batteries en Europe ?

En février dernier, la France a annoncé qu'elle apporterait 700 millions d'euros au cours des cinq prochaines années pour mettre en place une filière européenne de batteries pour voitures électriques, montant auquel s'ajouteront 1,12 milliard d'euros promis par l'Allemagne. Les commentaires de l'électrochimiste Jean-Marie Tarascon.



Propos recueillis par MAURICE MASHAAL

JEAN-MARIE TARASCON
professeur au Collège
de France, chaire
de chimie du solide
et de l'énergie

Avez-vous des informations sur la façon dont cette filière européenne de batteries serait mise en place ?

Non. Il n'y a pas eu de concertation préalable à l'annonce du gouvernement avec les chercheurs qui travaillent sur les batteries en France, et nos homologues en Allemagne n'ont eux non plus pas été consultés. À ce jour, cette affaire n'a semble-t-il impliqué que les politiques et les industriels. Espérons en tout cas que les fonds seront utilisés à bon escient. On ignore à quoi ils serviront, peut-être à la construction d'une grande usine de batteries au lithium-ion, à l'instar de la Gigafactory du constructeur américain Tesla, qui a coûté 2 milliards de dollars.

Est-ce cela la priorité selon vous ?

On peut comprendre que l'Europe cherche à acquérir une indépendance stratégique en matière de batteries pour voitures électriques, dont la production est actuellement concentrée en Asie. Mais développer une filière européenne qui puisse résister à la concurrence asiatique demandera du métier et des compétences. Surtout, cela nécessitera des engagements forts de la part des constructeurs automobiles européens, qui se fournissent aujourd'hui auprès des producteurs asiatiques. Même en mettant en place une usine géante, l'Europe ne pourra pas concurrencer l'Asie – la bataille des batteries à ions lithium (« lithium-ion ») est déjà perdue. Il faut à mon avis penser aussi à plus long terme, et en particulier investir dans des recherches sur les batteries « intelligentes ».

De quoi s'agit-il ?

Dans la société de demain, où les objets connectés seront omniprésents, les batteries occuperont une place cruciale. Or une voie prometteuse d'amélioration des batteries est non seulement

de maîtriser les interfaces électrode-électrolyte, mais d'introduire dans ces sources d'énergie des capteurs et des systèmes électroniques ou informatiques permettant de contrôler de façon optimale leur état de santé et leur fonctionnement. Cela permettrait par exemple d'allonger la durée de vie des batteries, de leur donner une seconde vie...

Les batteries au lithium-ion assurent une autonomie de l'ordre de 300 kilomètres avec des durées de recharge de plusieurs heures. Peut-on s'attendre à des améliorations notables ?

Il y aura des progrès, mais peu. On sait aujourd'hui que la technologie lithium-ion est presque à son maximum, et il faudra trouver autre chose pour franchir de nouveaux paliers.

La technologie sodium-ion par exemple ?

Nous développons cette technologie, notamment avec la société Tiamat. Outre la disponibilité du sodium, l'atout est la puissance, mais le sodium-ion ne sera jamais compétitif en termes de densité d'énergie électrique. Le marché des batteries au sodium-ion ne concernera donc pas les voitures électriques, mais plutôt des applications exigeant une forte puissance et une charge rapide, par exemple des trottinettes électriques ou le stockage d'électricité issue de sources renouvelables et intermittentes.

Qu'est-ce qui pourrait alors remplacer les batteries au lithium-ion ?

Il existe aujourd'hui un engouement pour les batteries « tout solide », dont l'électrolyte est solide et non liquide. On pense que des batteries au lithium-métal (électrodes en lithium, électrolyte métallique) pourraient atteindre des performances supérieures de 30 % à celles des batteries au lithium-ion. Mais on ignore si elles verront le jour : on ne maîtrise pas encore assez les interfaces électrode-électrolyte, qui se dégradent en raison de contraintes mécaniques et de la croissance de cristaux dendritiques de lithium (un problème récurrent depuis trente ans, qui a suscité le développement du lithium-ion). ■

CLIMATOLOGIE

DES NUAGES EN VOIE D'EXTINCTION ?

Sous l'effet du réchauffement climatique, les nuages de type stratocumulus pourraient disparaître, à partir d'une certaine concentration atmosphérique en CO₂.

Dans un contexte de réchauffement global de la planète, les modèles qui simulent l'évolution future du climat souffrent de deux principales sources d'incertitude: l'évolution des émissions de gaz à effet de serre et les nuages. Ces derniers couvrent, en permanence, plus de 70% du globe et réfléchissent une grande partie de la lumière du Soleil vers l'espace. Ils contribuent à refroidir la planète, mais qu'en sera-t-il demain? Y aura-t-il plus ou moins de nuages pour bloquer le rayonnement solaire? La réponse à cette question est complexe, notamment à cause de la diversité des nuages. Tapio Schneider, de l'institut de technologie de Californie, et ses collègues ont étudié un type particulier de nuages, les stratocumulus.

Depuis le début de l'ère industrielle, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre n'ont cessé d'augmenter: la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO₂) est passée de 280 ppm (parties par millions) avant 1850 à 410 ppm actuellement. Sur la même période, la température moyenne a augmenté de 1 °C. Il est indiscutable que nous assistons à un réchauffement climatique, mais son ampleur future reste difficile à quantifier avec précision. Dans les scénarios les plus optimistes, les émissions anthropiques sont maîtrisées et réduites: l'élévation de température ne sera que de 2 °C en moyenne d'ici à 2050. Mais selon certaines projections, avec l'hypothèse «business as usual» où les émissions continuent de croître au même rythme qu'aujourd'hui, la hausse atteindra 4 à 5 °C.

Dans ce contexte, les nuages apportent aussi leur lot d'incertitudes. Les simulations numériques reposent sur un découpage de l'atmosphère en cellules d'environ 100 kilomètres de côté. Elles ne décrivent pas des phénomènes dont l'échelle caractéristique est de l'ordre du kilomètre, comme les nuages. Ceux-ci sont inclus sous la forme de paramétrisations, qui sont difficiles à définir car tous les types de nuages ne se comportent pas de la même façon.

Dans le cas des stratocumulus, des études précédentes avaient montré que, lors d'un réchauffement du climat, ces nuages s'aminçissent et laissent passer plus de lumière. Dès lors, la région en dessous chauffe davantage.



Il existe une grande diversité de nuages, comme ici des stratocumulus. Comment influent-ils sur le climat et, à l'inverse, comment le climat agit-il sur leur évolution? La réponse est encore incertaine.

12 °C

C'EST LA HAUSSE DE TEMPÉRATURE QUE PROVOQUERAIT DANS LES TROPIQUES UNE CONCENTRATION ATMOSPHÉRIQUE EN CO₂ DE 1 200 PPM, SOUS L'EFFET D'UNE PRÉSENCE IMPORTANTE DE VAPEUR D'EAU ET DE LA DISPARITION DES STRATOCUMULUS.

Tapio Schneider et ses collègues ont refait une simulation de stratocumulus qu'ils ont couplée à un modèle représentant une colonne de l'atmosphère tropicale. En faisant varier la concentration en dioxyde de carbone, les chercheurs ont observé qu'au-delà de 1200 ppm, trois fois la concentration actuelle (une concentration qui pourrait être atteinte dans cent ans dans le scénario «business as usual»), les nuages finissent par se morceler et disparaître.

«Le seul élément nouveau dans cette étude est ce point de basculement», note Sandrine Bony, du Laboratoire de météorologie dynamique, à Paris, «mais le modèle utilisé est extrêmement idéalisé. Il n'est pas du tout sûr que ce phénomène persisterait dans un modèle plus complet considérant la réponse des nuages couplée à celle de la circulation atmosphérique.»

La question de l'évolution des nuages bas ne sera résolue que grâce à une compréhension plus fine des processus mis en jeu et à des simulations intégrant les interactions des nuages et de la circulation atmosphérique. «Mieux comprendre et quantifier la réponse des nuages au réchauffement global et son impact sur la sensibilité climatique reste une priorité de la climatologie», conclut Sandrine Bony. ■

S. B.

T. Schneider et al., *Nature Geoscience*, vol. 12, pp. 163-167, 2019