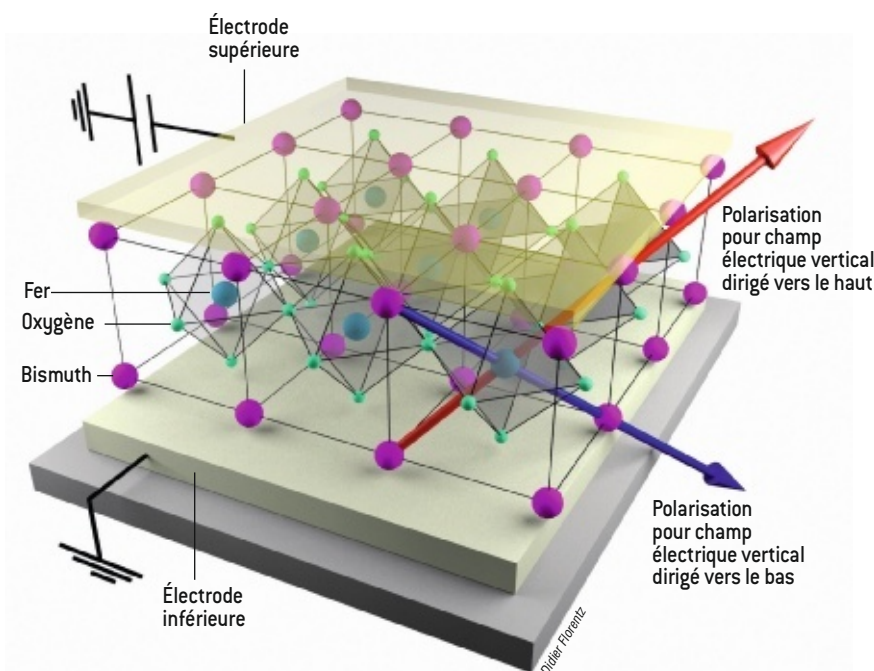




4. UN CHAMP ÉLECTRIQUE APPLIQUÉ au composé multiferroïque BiFeO_3 modifie la position des ions bismuth (Bi^{3+}) et oxygène (O^{2-}). Il s'ensuit une modification de la polarisation électrique du cristal. Ces déplacements entraînent aussi un déplacement des ions ferriques (Fe^{3+}), qui portent un spin. Les changements des positions relatives des spins modifient leurs interactions et, par conséquent, la fréquence des ondes de spin se propageant dans le cristal. Les auteurs et leurs collègues ont montré que l'application d'un champ électrique peut ainsi modifier de 30 pour cent cette fréquence.

revanche, quand on fait alterner l'orientation magnétique des rubans, les mouvements de précession des spins sont perturbés. L'onde de spin incidente perd sa cohérence, s'atténue et finit par s'éteindre : elle est bloquée. Ainsi, le dispositif laisse ou non passer l'onde, à volonté.

La recherche de nouveaux matériaux s'oriente vers les matériaux multiferroïques. Ce sont des matériaux redécouverts il y a moins de dix ans qui présentent au moins deux propriétés dites ferroïques, parmi le ferromagnétisme (existence d'une aimantation spontanée), la ferroélectricité (polarisation électrique spontanée) et la ferroélasticité (déformation spontanée). Ils ont été découverts et étudiés dans les années 1950 en Union soviétique, avant d'être qualifiés en 1994 de multiferroïques par Hans Schmid, de l'Université de Genève. Puis, grâce aux progrès des techniques de synthèse, ces matériaux ont été obtenus avec une grande pureté, ce qui a renforcé leurs propriétés et suscité un regain d'intérêt des chercheurs.

Dans les matériaux multiferroïques qui nous intéressent, il y a couplage entre ferromagnétisme et ferroélectricité. En clair, les ondes de spin interagissent avec la polarisation électrique macroscopique du matériau (due à un décalage des ions par rapport

à leurs positions initiales dans le réseau cristallin). On parle de couplage magnéto-électrique, qui ouvre une nouvelle voie pour contrôler les ondes de spin, non plus seulement à l'aide d'un champ magnétique, mais à l'aide d'un champ électrique. En effet, l'application d'un champ électrique modifie la polarisation, ce qui influe sur les ondes de spin.

L'utilisation d'un champ électrique a deux avantages. D'une part, le coût énergétique est faible. D'autre part, l'extension spatiale de ce champ est inférieure à celle d'un champ magnétique, ce qui est un atout pour la miniaturisation.

Un interrupteur magnonique

En 2010, nous avons montré qu'un champ électrique appliqué à un matériau multiferroïque module la fréquence des ondes de spin de plus de 30 pour cent à température ambiante (voir la figure 4).

Un empilement composé de tels multiferroïques peut faire office d'interrupteur magnonique. Comment ? L'empilement, nous l'avons vu, crée une bande de fréquences interdites. Une onde de fréquence permise peut se propager dans la structure. Mais en appliquant un champ électrique,

on augmente la fréquence de l'onde de 30 pour cent. Si elle a été bien choisie, elle entre alors dans la gamme des fréquences interdites et l'onde est bloquée. Lorsque le champ électrique disparaît, l'onde peut à nouveau traverser le dispositif, qui fait donc office d'interrupteur.

Les physiciens ont aussi conçu des portes logiques, briques fondamentales du traitement de l'information. Un premier dispositif à base d'ondes de spin a été élaboré en 2005. L'équipe de Mikhail Kostylev, de l'Université d'Australie occidentale, a mis au point un dispositif pour faire interférer les ondes de spin et ainsi moduler le signal de sortie. Une structure semblable a permis en 2008 de mettre au point des portes logiques de type ET, OUI et NON. Ces différentes réalisations ont prouvé que la magnonique dispose des outils essentiels pour forger l'électronique de demain.

Dans la détection des ondes de spin, la principale difficulté est de faire correspondre la fréquence des ondes utilisées en guise de sonde à celle des ondes de spin. Les premières mesures ont été réalisées par absorption de micro-ondes. Des micro-ondes sont envoyées sur le matériau, où elles sont en partie absorbées, puis ressortent et sont enregistrées. Les fréquences du spectre d'absorption obtenu correspondent aux fréquences propres des ondes de spin.

Les ondes de spin présentes dans les dispositifs magnoniques nanométriques sont de courte longueur d'onde, donc de fréquence élevée (de l'ordre du térahertz). Or les micro-ondes ont, en comparaison, une longueur d'onde trop grande pour être utiles dans cette situation.

Il existe par ailleurs des techniques optiques pour détecter des ondes de spin, mais elles sont également limitées à des fréquences très inférieures au térahertz. Le principe de ces sondes optiques est le suivant. De la lumière de fréquence connue est envoyée sur le matériau, où les photons interagissent avec les magnons et quittent le matériau avec une fréquence inférieure. On en déduit la fréquence des ondes de spin. Mais à ce jour, la résolution spatiale d'une sonde optique est de quelques centaines de nanomètres, ce qui est trop grand pour des dispositifs nanométriques. En outre, au-delà de 100 gigahertz, le couplage entre l'onde lumineuse et les magnons est insuffisant. La détection de magnons dans le domaine du térahertz devra donc faire appel à d'autres techniques...

Il reste que, pour des dispositifs pas trop petits, on peut exciter ou détecter des magnons à l'aide de micro-ondes ou d'ondes lumineuses du domaine visible. C'est pourquoi des dispositifs magnoniques peuvent s'intégrer aisément à l'électronique photonique, par exemple dans les disques magnéto-optiques.

Les défis de la magnonique ne manquent pas. Le principal réside dans le passage de la technologie développée à l'échelle micrométrique, opérationnelle aujourd'hui, vers une technologie fonctionnant à l'échelle nanométrique. Cette miniaturisation se heurte aux limites des outils actuels de nanolithographie. Il existe toutefois d'autres techniques prometteuses, par exemple la cristallisation de colloïdes, qu'il faudra combiner avec les techniques classiques d'élaboration des dispositifs magnétiques, telles la lithographie électronique (gravure avec un faisceau d'électrons) ou l'épitaxie par jets moléculaires (dépôt de couches sous vide à l'aide de faisceaux de molécules).

Un autre défi majeur concerne la compréhension des phénomènes en jeu. La propagation des ondes de spin est complexe,

en particulier quand des irrégularités sont présentes ou quand ces ondes interagissent avec d'autres types d'excitations présentes dans le matériau (phonons, plasmons, électrons, etc.).

Des électromagnons plus dociles

Ces recherches fondamentales réservent peut-être encore des surprises, à la hauteur de celle causée par la découverte d'une nouvelle excitation hybride dans les multiferroïques en 2006. Nommée électromagnon, et prédite dès les années 1970 par les Ukrainiens Viktor Bar'yakhtar et Irina Chupis, il aura fallu attendre plus de 20 ans pour qu'Andrei Pimenov et ses collègues de l'Université d'Augsburg, en Allemagne, la détectent dans deux matériaux multiferroïques (TbMnO_3 et GdMnO_3). En 2008, notre équipe a également découvert des électromagnons dans le multiferroïque BiFeO_3 .

L'électromagnon est une excitation hybride, mi-onde de spin, mi-vibration

polaire : c'est un magnon doté d'un dipôle électrique. Il provient d'un couplage intense entre le magnétisme et la ferroélectricité, mais le mécanisme microscopique qui en est à l'origine demeure mal connu. Il reste par exemple à déterminer pourquoi certains multiferroïques donnent naissance à des électromagnons, et pas d'autres.

Quoi qu'il en soit, les électromagnons offrent la possibilité de contrôler plus efficacement les ondes de spin *via* un champ électrique : dans les multiferroïques « classiques », l'application d'un champ électrique modifie la position des ions, qui influe à son tour sur les ondes de spin, tandis que dans les matériaux multiferroïques où sont présents des électromagnons, le champ électrique agit directement... sur les électromagnons.

La magnonique en est à ses balbutiements. Les défis théoriques et techniques sont nombreux et, comme le montre le cas des électromagnons, fortement intriqués. Ils ouvrent en tout cas la perspective d'une électronique nanométrique performante. ■



Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur www.jardindesplantes.net, dans "l'agenda du jardin"

CONFÉRENCES

Cycle : « La Chimie dans tous ses états »
Lundi 7 novembre - 18 h : Chimie et microorganismes
D. Buisson, chargé de recherche, CNRS / Muséum

Lundi 14 novembre - 18 h : Regards de la chimie sur les plantes à usages traditionnels - *A. Mambu, maître de conférences, Muséum*

Lundi 28 novembre - 18 h : Écologie chimique, molécules de communication - *S. Prado, maître de conférences, Muséum*

Lundi 5 décembre - 18 h : Molécules de défense et de communication des bactéries - *S. Rebuffat, professeur, Muséum*

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
 36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5^e
 Métro : Gare d'Austerlitz - Jussieu

COURS PUBLICS

Par *Matthieu Gounelle, spécialiste des météorites, dép. Histoire de la Terre, Laboratoire de Minéralogie et de Cosmochimie, Muséum*

Cycle : « La cosmochimie »
Jeudi 1^{er} décembre - 18 h : Histoires de chutes
Jeudi 8 décembre - 18 h : Physico-chimie du milieu interstellaire et des disques protoplanétaires
Jeudi 15 décembre - 18 h : Des météorites aux planètes

Grand Amphithéâtre du Muséum
 57 rue Cuvier, Paris 5^e – Métro : Jussieu



Des ondes dans le cerveau

Stéphane Charpier

Les neurones sont le siège de mouvements de particules chargées, qui créent des microcourants responsables des ondes électriques enregistrées à la surface du crâne. La fréquence de ces ondes reflète l'état de vigilance et de conscience.

Si l'on pose une électrode métallique à la surface du crâne d'un sujet, et qu'on la connecte à un amplificateur couplé à un oscilloscope, on observe des fluctuations spontanées du potentiel électrique dont l'amplitude peut varier de quelques microvolts à plusieurs millivolts. On enregistre ainsi des variations de potentiel dans les diverses aires du cerveau : ce sont les ondes cérébrales. Ce phénomène bioélectrique intrigant résulte de mécanismes neuronaux complexes, partiellement élucidés (nous y reviendrons), et constitue la seule information issue du cerveau pensant que l'on peut analyser en temps réel, avec une précision de l'ordre de la milliseconde.

Les ondes électriques cérébrales sont présentes dans l'ensemble du règne animal. Elles peuvent être enregistrées chez toutes les espèces, des centres nerveux des mollusques constitués de quelques neurones globulaires compactés, jusqu'au cerveau humain contenant environ 10^{12} neurones. La gamme des fréquences utilisées dans le règne animal – du dixième à plusieurs centaines de hertz – a été conservée au cours de l'évolution, malgré le développement des structures cérébra-

les et des aptitudes comportementales, et l'émergence de nouveaux processus mentaux. Quelques différences ont été néanmoins identifiées, mais on en ignore l'origine et la signification. Il semblerait que les ondes cérébrales des poissons et des reptiles, entre autres, aient une amplitude inférieure à celle des mammifères.

Des ondes cérébrales omniprésentes

Par ailleurs, le cerveau des invertébrés, notamment celui des insectes, crustacés, gastéropodes, vers de terre et autres annélides, produirait plus d'ondes électriques de fréquences supérieures à 100 hertz que celui des vertébrés. Enfin, notons que la pieuvre *Octopus vulgaris*, dont l'activité électrique cérébrale est similaire à celle des vertébrés, est le seul animal chez qui les ondes cérébrales présentent des interruptions transitoires inexplicables : pendant plusieurs minutes, l'activité cérébrale cesse..., mais on ignore pourquoi.

La plupart des manuels de neurologie indiquent que les ondes électriques cérébrales ont été décrites chez l'homme dans les années 1920 par le psychiatre alle-

mand Hans Berger (1873-1941), lequel publiera ses découvertes en 1929 et inventera le terme électroencéphalogramme, ou EEG, encore utilisé aujourd'hui pour qualifier les décharges électriques enregistrées à la surface et dans la profondeur du cerveau. Toutefois, l'existence d'une activité électrique cérébrale spontanée avait été découverte un demi-siècle plus tôt par un jeune enseignant de l'École de médecine de Liverpool, Richard Caton (1842-1926). Le 24 août 1875, il publiait dans les comptes rendus de l'Association médicale britannique ses observations préliminaires, obtenues chez le lapin et le singe, indiquant que de faibles courants spontanés peuvent être systématiquement enregistrés entre deux électrodes placées à la surface du cortex cérébral et que ces ondes électriques semblent être en relation avec la fonction de la région corticale concernée.

Dès la fin du XIX^e siècle, il fit avec d'autres neurophysiologistes de nombreuses découvertes, qui ont toutes été confirmées ultérieurement, sur les propriétés des potentiels électriques cérébraux. Il montra que ces potentiels sont souvent de nature oscillatoire, qu'ils sont modulés par des stimulations sensoriel-