

POUR LA



1 an ■ 76 €
au lieu de ~~102,50 €~~

- ✓ 26% d'économie
- ✓ la garantie de ne manquer aucune parution
- ✓ l'accès gratuit à vos numéros en version numérique sur www.pourlascience.fr

■ POUR LA
SCIENCE

À retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Service Abonnements Pour la Science • Libre réponse 90382 • 75281 Paris cedex 06

→ Offre disponible aussi en ligne sur www.pourlascience.fr/pls/abonnements-couples-papier

* Tarif valable en France métropolitaine et d'Outre mer. Participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : Europe 16 € - autres pays 35 €.

☐ Je préfère régler mon abonnement par prélèvement **19€ par trimestre****. En cadeau, je reçois le *Dossier Pour la Science* n° 64 « Exoplanètes ».

**** Abonnement valable uniquement en France métropolitaine, renouvelable à échéance par tacite reconduction et dénonçable à tout moment par simple courrier.**

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : Ville : Pays : Tél. (facultatif) :

☐ Je souhaite recevoir la newsletter *Pour la Science* à l'adresse e-mail suivante : _____@_____

☐ Je règle en une seule fois 76 € (+ frais de port en sus pour l'étranger)

Signature obligatoire :

☐ par chèque à l'ordre de Pour la Science

 par carte bancaire

Nº: _____

Expire fin : | | | |

☐ Je règle en douceur **19€ par trimestre** et reçois en cadeau le *Dossier Pour la Science* n° 64. Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous en joignant impérativement 1 RIB.

Autorisation de prélèvement automatique (France métropolitaine uniquement). J'autorise l'établissement teneur de mon compte à prélever le montant des avis de prélèvement trimestriel présentés par *Pour la Science*. Je vous demande de faire apparaître mes prélèvements sur mes relevés de compte habituels. Je m'adresserai directement à *Pour la Science* pour tout ce qui concerne le fonctionnement de mon abonnement.

Titulaire du compte à débiter

Nom, Prénom :

N°: _____ Rue: _____

CP: | | | | | Ville: |

Compte à débiter

Établissement	Code guichet	N° de compte	Clé RIB
---------------	--------------	--------------	---------

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Établissement teneur du compte à débiter

Établissement :

N° : _____ Rue : _____

CP: | | | | | Ville: |

Date et signature (obligatoire)

Numéro offert
avec mon abonnement
19 € par trimestre



PLS409 – Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31.12.2011

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe *Pour la Science*. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ☐

Des ondes de spin pour l'électronique

M. Cazayous, Y. Gallais et A. Sacuto

En changeant d'orientation de proche en proche, les spins des électrons peuvent former des ondes. La magnonique, nouvelle électronique fondée sur ces ondes, pourrait conduire à une miniaturisation plus poussée.

L'écriture, la conservation et la transmission des informations ont toujours bénéficié des derniers progrès techniques, de la presse de Gutenberg aux microprocesseurs électroniques. De nos jours, la plupart des composants électroniques sont constitués de matériaux semi-conducteurs et tirent leurs fonctionnalités du contrôle des courants électriques, c'est-à-dire du déplacement des charges électriques portées par les électrons.

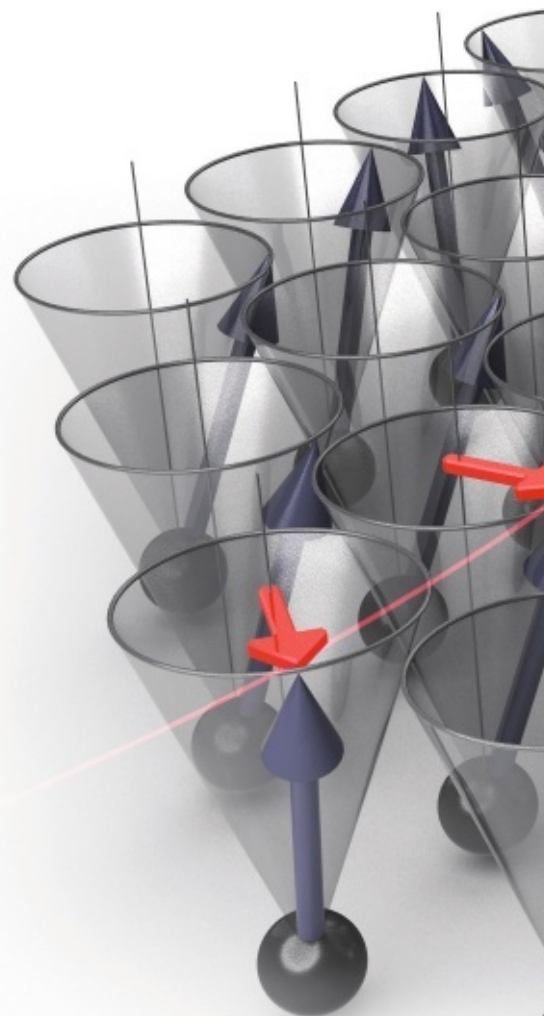
Toutefois, les mémoires les plus performantes – les mémoires MRAM (*Magnetic Random Access Memory*) – déjà présentes dans les ordinateurs, les téléphones mobiles ou les tablettes tactiles, utilisent une autre caractéristique de l'électron : son spin, assimilable à un petit aimant élémentaire. Ces mémoires MRAM relèvent d'un type d'électronique nommé spintronique. Aujourd'hui, les physiciens annoncent la « magnonique », une électronique fondée non plus sur les spins des électrons considérés isolément, mais sur les ondes formées par des ensembles de spins (voir la figure 1).

Qu'est-ce que le spin ? Que sont les ondes de spin ? Pourquoi sont-elles intéressantes ? Comment les créer et les manipu-

ler ? Nous allons répondre successivement à ces questions, et nous mentionnerons quelques découvertes récentes en magnonique et les perspectives qu'elles ouvrent.

Outre une charge électrique et une masse, l'électron a un moment cinétique intrinsèque nommé spin, auquel est associé un moment magnétique. C'est une grandeur qui ne peut se comprendre que dans le cadre de la physique quantique. Cependant, une image classique répandue consiste à assimiler le spin d'un électron à la rotation de ce dernier sur lui-même : l'électron ressemble ainsi à une minuscule toupie. L'axe et le sens de rotation déterminent l'orientation du spin. Toutefois, les lois de la physique quantique montrent que la mesure d'un spin ne peut donner que certaines valeurs, selon des règles bien définies. En particulier, en projection sur

1. LES ONDES DE SPIN apparaissent dans des matériaux magnétiques ordonnés, où les atomes ont un spin, similaire à un petit aimant, qui tourne en décrivant un cône dit de précession. Chaque spin est en interaction quantique avec les spins voisins. Quand l'un est modifié, ses voisins le sont aussi. Les mouvements des spins se propagent ainsi de proche en proche.



un axe de mesure, quel qu'il soit, le spin d'un électron ne peut valoir que $1/2$ (spin vers le « haut » si l'axe choisi est vertical) ou $-1/2$ (spin vers le « bas ») dans les unités atomiques.

Quand on lui applique un champ magnétique approprié, le spin de l'électron bascule d'une orientation à l'autre. L'utilisation du spin dans les dispositifs spintroniques repose sur cette propriété, qui permet de stocker de l'information : le support matériel est divisé en minuscules zones correspondant à autant de bits d'information, et un champ magnétique est appliqué bit par bit pour orienter les spins des électrons des atomes présents. Chaque zone correspondra alors à un bit de

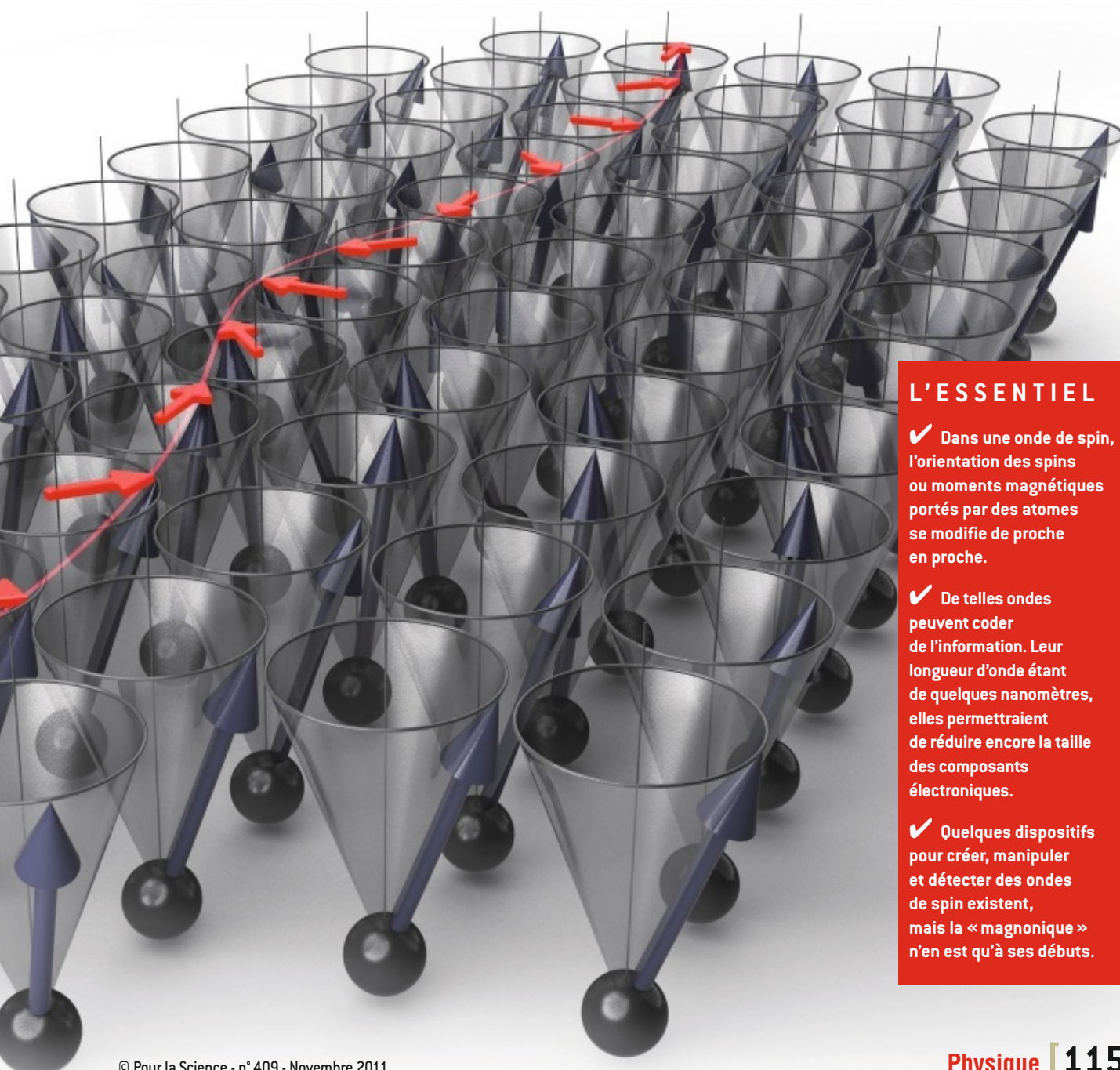
valeur 0 ou 1 selon l'orientation « haut » ou « bas » des spins dans cette zone.

La spintronique, ou électronique de spin, s'est illustrée par la découverte en 1988 de l'effet de magnétorésistance géante par les équipes d'Albert Fert, à l'Université de Paris-Sud, et de Peter Grünberg, à l'Université de Cologne en Allemagne, couronnés par le prix Nobel de physique en 2007. Il s'agit d'une forte augmentation de la résistance électrique de certaines structures magnétiques multicouches lorsqu'elles sont soumises à un faible champ magnétique. Le phénomène repose sur le fait que parmi les électrons traversant un métal magnétique, ceux dont le spin est de même orientation que l'aimantation du métal passent

plus facilement que les autres. L'effet de magnétorésistance géante est à la base des mémoires MRAM, les plus puissantes à l'heure actuelle sur le marché.

Malgré ces succès, le développement de l'électronique fondée sur les semi-conducteurs ou sur la spintronique se heurte à des obstacles. Maintenant que les tailles de composants semi-conducteurs atteignent environ 22 nanomètres, la course à la miniaturisation semble marquer le pas.

En effet, en deçà, il apparaît par exemple des courants de fuite, dus à des phénomènes quantiques. La miniaturisation est également enrayée dans les dispositifs spintroniques : le champ magnétique devant être assez intense pour retourner l'ensemble des



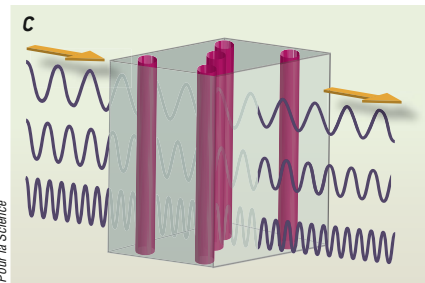
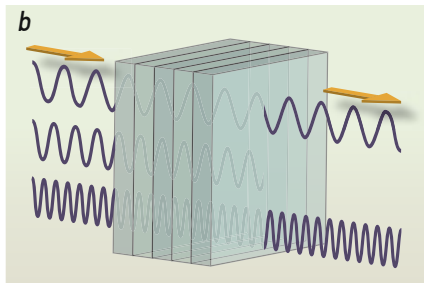
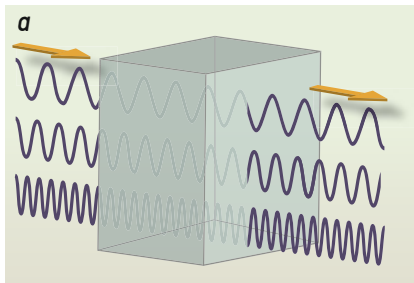
L'ESSENTIEL

✓ Dans une onde de spin, l'orientation des spins ou moments magnétiques portés par des atomes se modifie de proche en proche.

✓ De telles ondes peuvent coder de l'information. Leur longueur d'onde étant de quelques nanomètres, elles permettraient de réduire encore la taille des composants électroniques.

✓ Quelques dispositifs pour créer, manipuler et détecter des ondes de spin existent, mais la « magnonique » n'en est qu'à ses débuts.

Dider Florentz



2. DANS UN MATÉRIAU ORDONNÉ MAGNÉTIQUEMENT, des ondes de spin de différentes fréquences se propagent et ressortent à l'identique : le matériau constitue un guide d'ondes (a). Un empilement de couches de différents matériaux ordonnés magnétiquement forme un « cristal magnonique » où, selon leur fréquence, certaines ondes de spin ne

peuvent se propager (b). Un autre exemple de cristal magnonique met en jeu des cylindres magnétiques régulièrement disposés au sein d'une matrice faite d'un matériau magnétique différent (c). Les ondes de spin qui y pénètrent ressortent avec une amplitude qui dépend de la taille et de l'espacement des cylindres.

spins d'un bit, il présente une extension spatiale irréductible, ce qui empêche de diminuer la taille du bit au-dessous des quelque 200 nanomètres actuels.

Comment surmonter ces difficultés ? Une possibilité consiste à s'intéresser au comportement collectif des spins plutôt qu'à leur contrôle individuel. Il s'agit d'exploiter la notion d'ondes de spin, introduite par le physicien d'origine suisse Félix Bloch en 1930. Les ondes de spin apparaissent dans des matériaux ordonnés magnétiquement (matériaux ferromagnétiques par exemple). Ce sont des cristaux où les atomes portent un moment magnétique.

Le moment magnétique d'un atome est la résultante des spins des électrons en orbite autour de son noyau. Comme les électrons atomiques s'organisent en paires de spins opposés, un atome porte un moment magnétique quand ses électrons ne sont pas tous appariés.

Dans les matériaux ordonnés magnétiquement, les atomes ne sont pas isolés, mais ont des interactions quantiques avec leurs voisins. À basse température, les spins des atomes sont immobiles et alignés. Lorsqu'on les excite, soit avec un champ extérieur, soit en augmentant la température, les spins effectuent un mouvement de précession, c'est-à-dire qu'ils décrivent un cône autour de la direction de l'aimantation macroscopique du milieu (à l'instar de l'axe d'une toupie écartée de la verticale) (voir la figure 1).

Les spins étant assimilables à de petits aimants qui interagissent, la position de l'un détermine celle de ses voisins immédiats, qui fixe à son tour celle de ses voisins, etc. De proche en proche, les spins s'influencent mutuellement, ce qui donne lieu à une précession cohérente. D'un point de vue classique, une perturbation de l'un des spins se répercute progressive-

ment sur la précession des autres ; une onde de spin est ainsi engendrée. Sa longueur d'onde dépend du cristal ; elle est de quelques nanomètres, soit quelques distances interatomiques.

Les magnons, quanta des ondes de spin

D'après les lois de la physique quantique, les ondes de spin transportent de l'énergie par petites quantités bien définies. Ces quanta d'énergie sont nommés magnons, par analogie aux photons qui sont les quanta des ondes électromagnétiques. La magnonique désigne ainsi le domaine de l'électronique qui porte sur les ondes de spin, à distinguer de la spintronique, relative à l'utilisation des spins eux-mêmes.

Comme les autres types d'ondes, les ondes de spin peuvent être créées, se propager, être réfléchies, interférer, etc. Comme les ondes radio, elles peuvent coder de l'information si on module leur phase, leur amplitude ou leur fréquence.

La magnonique pourrait ouvrir une ère nouvelle en électronique grâce à de nombreux avantages. D'abord, les ondes de spin sont faciles à produire et à manipuler. Elles apparaissent spontanément dans des cristaux ordonnés magnétiquement lorsqu'on élève la température, mais elles ne sont pas cohérentes. Elles le deviennent quand on leur apporte de l'énergie (on dit qu'on les excite) à l'aide d'un champ électromagnétique, tout comme un verre en cristal frappé d'un léger coup de cuillère émet un son qui révèle la fréquence propre de vibration du cristal.

Ensuite, à l'instar de la lumière dans les fibres optiques, les ondes de spin peuvent être transportées dans des guides magnétiques, composés par exemple de cristal YIG (Yttrium Iron Garnet, ou

LES AUTEURS



Maximilien CAZAYOUS, Yann GALLAIS et Alain SACUTO sont enseignants-chercheurs au Laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques du CNRS et de l'Université Paris Diderot.

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. Rovillain et al., **Electric-field control of spin waves at room temperature in multiferroic BiFeO₃**, *Nature Material*, vol. 9, pp. 975-979, 2010.

V. V. Kruglyak et al., **Magnonics**, *Journal of Physics D*, vol. 43, article 264001, 2010.

A. Khitun et al., **Magnonic logic circuits**, *Journal of Physics D*, vol. 43, article 264005, 2010.

grenat yttrium-fer, des composés synthétiques tels que $\text{Y}_3\text{Fe}_2(\text{FeO}_4)_3$, de permalloy (alliage fer-nickel), etc., sans atténuation ni dégradation du signal. On peut aussi facilement les convertir en une tension électrique : une onde de spin peut engendrer un champ magnétique, qui par induction peut créer une tension.

Enfin, et c'est leur atout majeur, les ondes de spin peuvent avoir une longueur d'onde très courte et ont une « longueur de cohérence » élevée (une centaine de micromètres), ce qui signifie que les propriétés de l'onde sont conservées sur des distances largement supérieures à la taille des dispositifs nanométriques.

Ces caractéristiques permettent d'envisager des dispositifs fonctionnant dans un domaine de fréquences qui va du gigahertz au térahertz (1 000 gigahertz), c'est-à-dire des dispositifs bien plus performants que ceux d'aujourd'hui (les microprocesseurs sont d'autant plus rapides qu'ils fonctionnent à fréquence élevée).

Le seul point faible des ondes de spin serait leur faible vitesse de propagation, inférieure de deux ordres de grandeur à celle de la lumière. Toutefois, cela ne présente pas d'inconvénient pour des circuits électroniques de quelques nanomètres carrés, la faible taille compensant la vitesse de propagation réduite. Ainsi, un composant mesurant un centimètre carré et formé de circuits magnoniques d'une taille similaire à celle d'un transistor semi-conducteur (une vingtaine de nanomètres) pourrait traiter 10 000 milliards d'opérations en une nanoseconde, contre 500 millions pour un composant à transistors actuels.

Un dispositif magnonique comporte trois éléments faisant chacun l'objet de recherches actives : une source d'ondes de spin, un matériau où les ondes sont manipulées pour coder de l'information et un détecteur. La production d'ondes de spin est un premier défi. Dans un cristal adéquat, afin de mettre les spins en mouvement, il suffit de les soumettre à un champ magnétique dont la fréquence correspond à celle des modes propres (les fréquences de précession spontanées) du matériau. On utilise pour cela un champ magnétique de radiofréquence pulsé ou des impulsions optiques très brèves (la lumière étant une onde électromagnétique, les spins sont sensibles à sa composante magnétique). L'utilisation d'impulsions est plus économe en énergie et offre une plus grande gamme de fréquences dans le signal excitateur : elle

est donc susceptible d'exciter simultanément davantage de modes.

Pour ce qui est du cœur du dispositif magnonique, un matériau où l'onde de spin est manipulée, les recherches s'orientent soit vers des structures périodiques de matériaux magnétiques nommées cristaux magnoniques, soit vers de nouveaux matériaux.

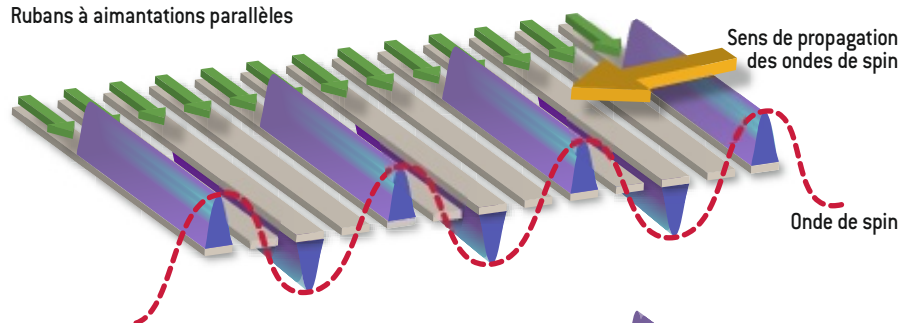
Des matériaux filtres d'ondes

Les cristaux magnoniques consistent en des empilements périodiques de couches magnétiques (voir la figure 2). Dans de telles structures, certaines fréquences d'ondes de spin ne peuvent se propager. Cette propriété est analogue à celle d'un cristal périodique où les électrons ont des bandes d'énergies permises, séparées par des bandes d'énergies interdites (les caractéristiques de ces bandes expliquent pourquoi le solide est isolant, semi-conducteur ou conducteur). Ainsi, une onde de spin qui arrive sur un cristal magnonique avec un spectre composé d'une vaste gamme de fréquences en ressort avec un spectre modifié. Les fréquences transmises forment la bande passante du cristal.

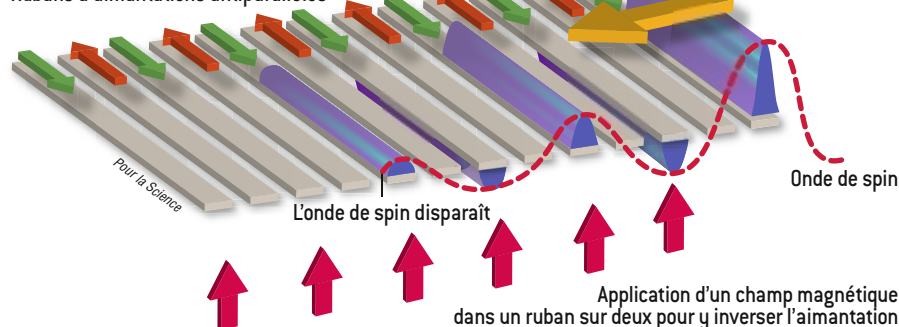
Un autre exemple de cristal magnonique à deux dimensions met en œuvre des cylindres ferromagnétiques espacés d'une dizaine de nanomètres dans une matrice constituée d'un autre matériau ferromagnétique. La période et la taille des cylindres (entre 5 et 30 nanomètres) créent des bandes de fréquences interdites, mais permettent aussi de moduler avec précision l'amplitude de l'onde. Quand une onde de spin est envoyée dans la structure, elle rencontre des cylindres magnétiques ayant des propriétés magnétiques différentes de la matrice (l'onde traverse des milieux dotés d'« indices magnétiques » différents, comme une onde sismique se propageant dans la Terre rencontre des types de roches différents). À sa sortie, l'amplitude de l'onde sera ainsi modifiée.

Certains cristaux magnoniques sont reprogrammables, c'est-à-dire qu'on peut contrôler leur réponse. Considérons un cristal constitué de rubans ferromagnétiques parallèles (voir la figure 3). Quand l'aimantation de tous les rubans pointe dans le même sens, le cristal magnonique se comporte comme un matériau ferromagnétique quelconque et l'onde de spin s'y propage de façon ordinaire. En

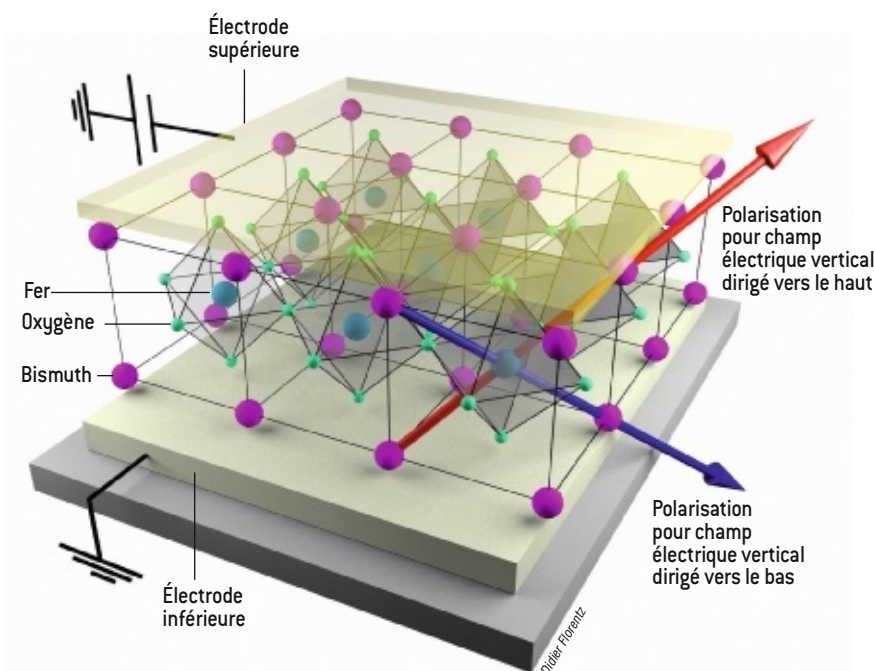
Rubans à aimantations parallèles



Rubans à aimantations antiparallèles



3. UN DISPOSITIF CONSTITUÉ DE RUBANS ferromagnétiques peut constituer un interrupteur pour les ondes de spin. Si les aimantations de tous les rubans sont orientées dans le même sens (a), une onde de spin s'y propage normalement. Son amplitude (en violet) n'est pas affectée, ni sa longueur d'onde (égale ici arbitrairement à la largeur de quatre rubans). Mais si les aimantations des rubans sont antiparallèles (suite à l'application d'un champ magnétique dans un ruban sur deux), l'onde de spin s'atténue jusqu'à disparaître.



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 pro-

pagation 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. ■



LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

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, chargée 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-