

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 exciteur : 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.

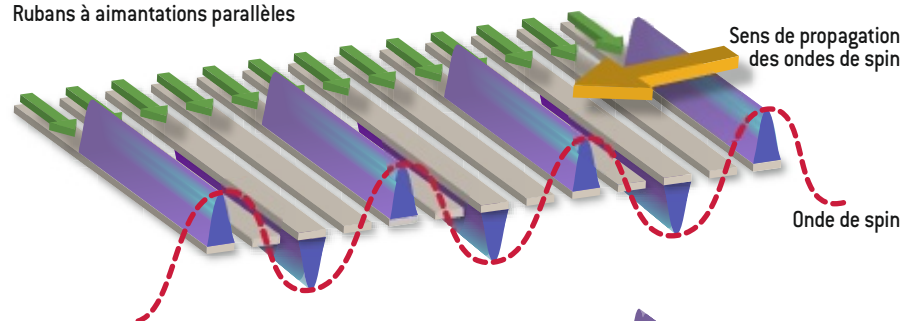
Des matériaux filtres d'ondes

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.

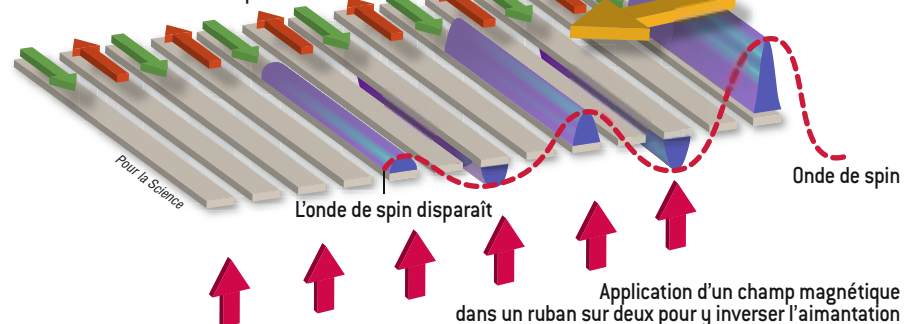
Un autre exemple de cristal magnonique à deux dimensions met en œuvre des cylindres ferromagnétiques espacés d'une dizaine de nanomètres dans une matrice constituée d'un autre matériau ferromagnétique. La période et la taille des cylindres (entre 5 et 30 nanomètres) créent des bandes de fréquences interdites, 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.