

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.

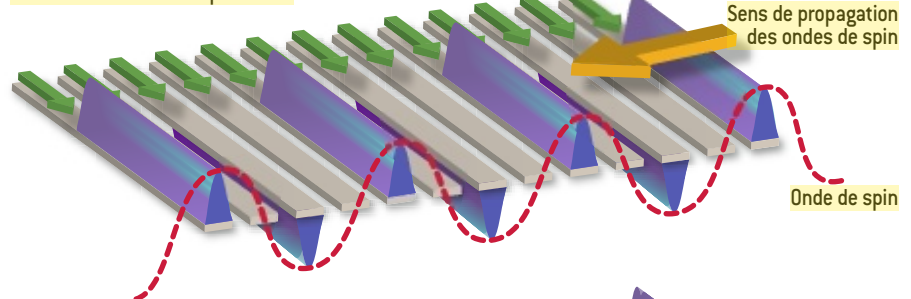
Des matériaux filtres d'ondes

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.

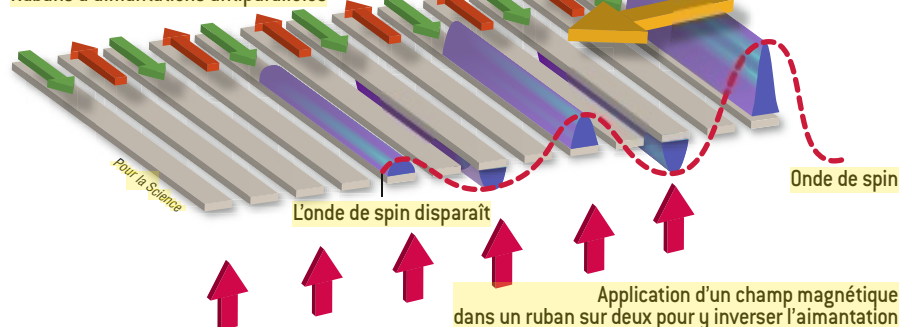
Un autre exemple de cristal magnonique à deux dimensions met en œuvre des cylindres ferromagnétiques espacés d'une dizaine de nanomètres dans une matrice constituée d'un autre matériau ferromagnétique. La période et la taille des cylindres (entre 5 et 30 nanomètres) créent des bandes de fréquences interdites,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

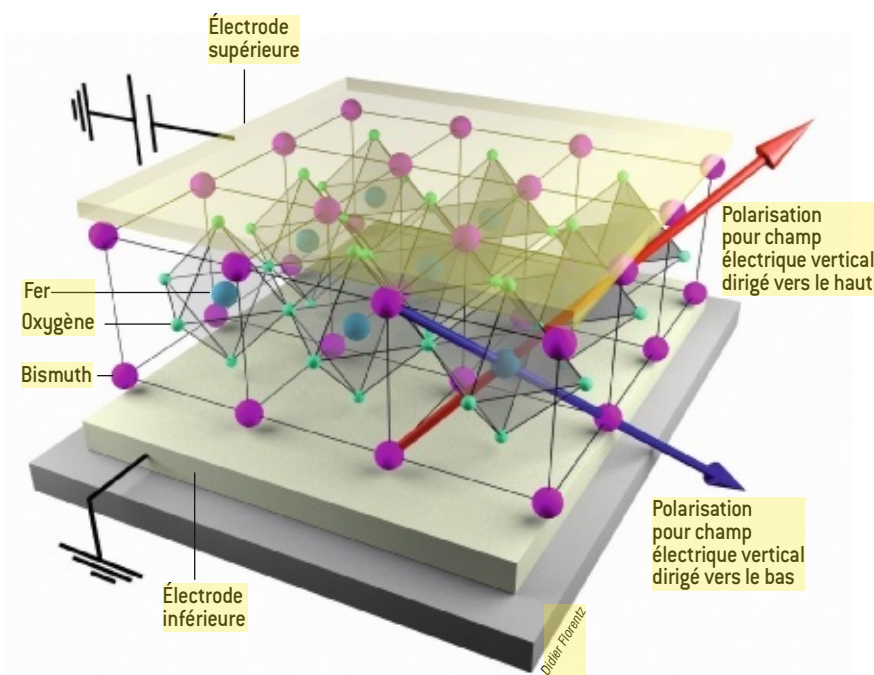
Rubans à aimantations parallèles



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...