

ABONNEZ-VOUS À **SCIENCE** POUR LA
et voguez vers de nouveaux horizons !



Pour la Science (12 n^{os})
+ *Dossier Pour la Science* (4 n^{os})

1 an ■ 76 €
au lieu de ~~102,50 €~~

Vos avantages abonné :

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

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

1 Je choisis mon offre :

- ☒ **Oui, je m'abonne 1 an et reçois 12 n°s de *Pour la Science* + 4 n°s des *Dossiers Pour la Science* au prix de 76 €***
(au lieu de 102,50 €, prix de vente au numéro). Je bénéficie également des versions numériques sur www.pourlascience.fr

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

- ☐ 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.**

② J'indique mes coordonnées :

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

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

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

③ Je choisis mon mode de règlement :

- ☐
- 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

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)

Organisme créancier

Pour la Science

8 rue Férou – 75006 Paris

N° national d'émetteur : 426900

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.

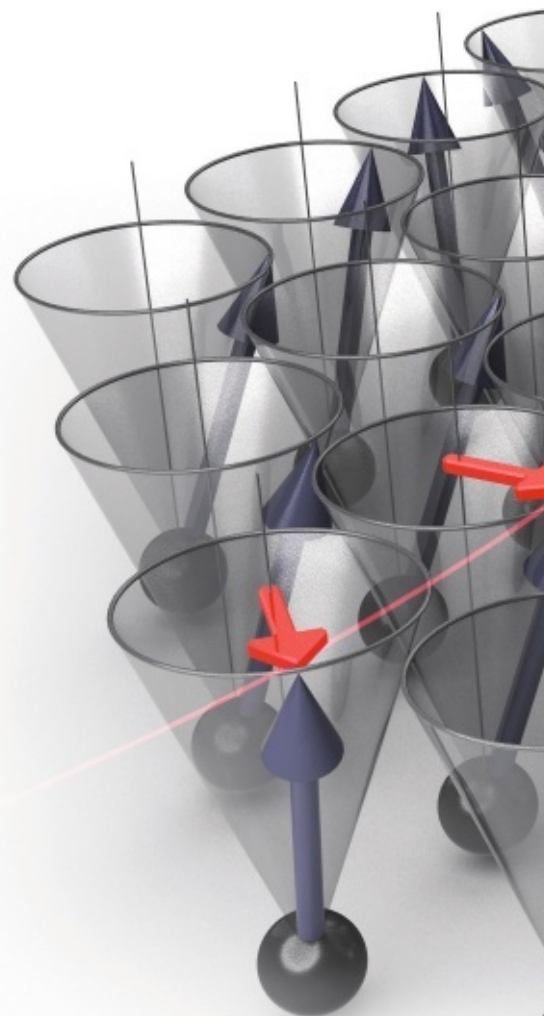
Toutefois, les mémoires les plus performantes – les mémoires MRAM (*Magnetic Random Access Memory*) – déjà présentes dans les ordinateurs, les téléphones mobiles ou les tablettes tactiles, utilisent une autre caractéristique de l'électron : son spin, assimilable à un petit aimant élémentaire. Ces mémoires 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

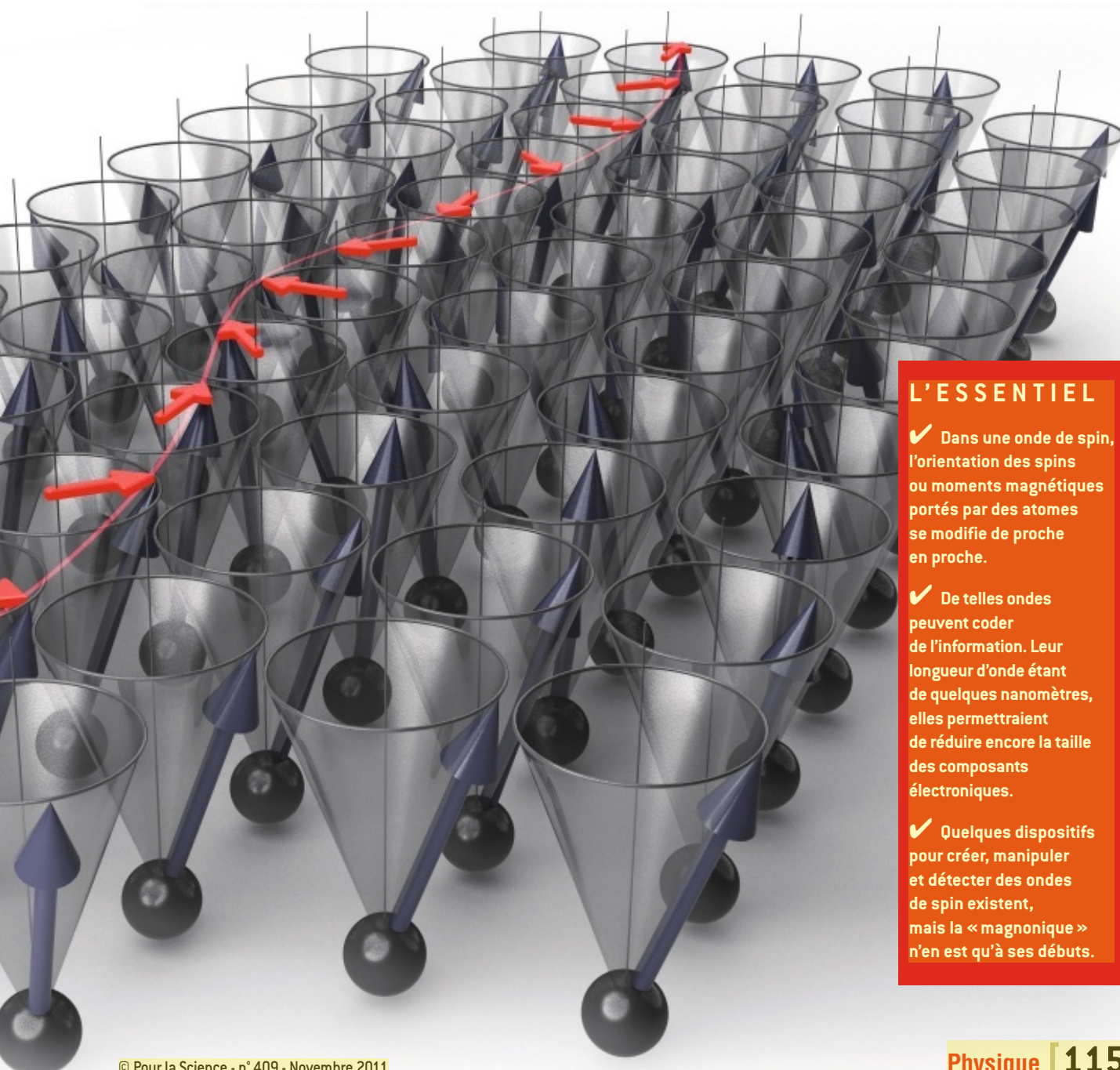
valeur 0 ou 1 selon l'orientation « haut » ou « bas » des spins dans cette zone.

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



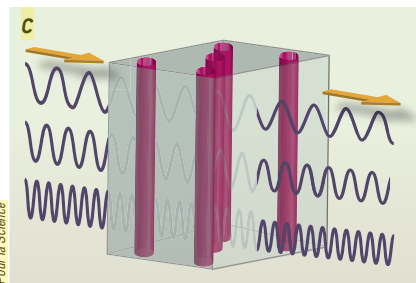
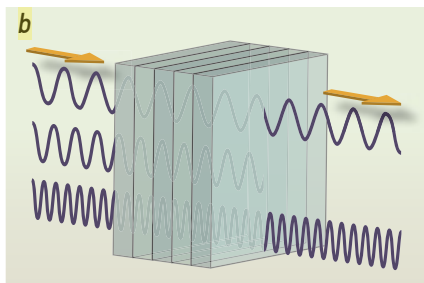
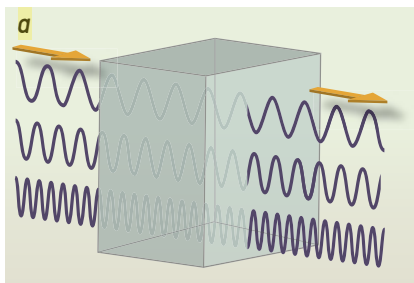
L'ESSENTIEL

✓ 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 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.

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