

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

DES NANOBULLES MAGNÉTIQUES POUR L'INFORMATIQUE DE DEMAIN

Pour stocker efficacement l'information numérisée, l'idée d'utiliser de petits domaines magnétiques revient au goût du jour, avec une nouveauté: les skyrmions.



La chaîne de pendules et les bulles de savon présentent des analogies avec les « bulles » magnétiques dans des films minces.

Dans les années 1970, la technique d'avenir pour le stockage de l'information numérique était les mémoires à « bulles magnétiques ». Le développement des mémoires flash, fondées sur de l'électronique, a rendu ces dispositifs obsolètes. Mais plus récemment, de nouvelles entités de la même famille ont fait leur apparition dans les laboratoires: les skyrmions magnétiques. Comme les bulles magnétiques, les skyrmions sont de petites régions d'un mince film magnétique où l'aimantation est orientée de façon particulière. De taille nanométrique, manipulables par des courants électriques très faibles, stables grâce à des propriétés de nature topologique, ils constituent une alternative intéressante aux électrons pour les techniques numériques de demain.

Pour nous éclairer sur la physique à l'œuvre dans ces systèmes, commençons

par analyser un dispositif mécanique qui fournit une bonne analogie (*voir le dessin ci-contre*). Sur un long axe horizontal, sont fixés à égales distances de petits pendules lestés pouvant tourner librement autour de l'axe. Évidemment, abandonnés à eux-mêmes, tous ces pendules pendent verticalement.

UNE ANALOGIE AVEC UNE ONDE DE PENDULES

Mais ajoutons des ressorts (ou un fil élastique) reliant leurs extrémités, et faisons faire au pendule d'un des deux bouts un tour complet: il se crée une torsion qui reste localisée sur une petite zone (contrairement à ce que l'on observerait avec un ruban de tissu, par exemple).

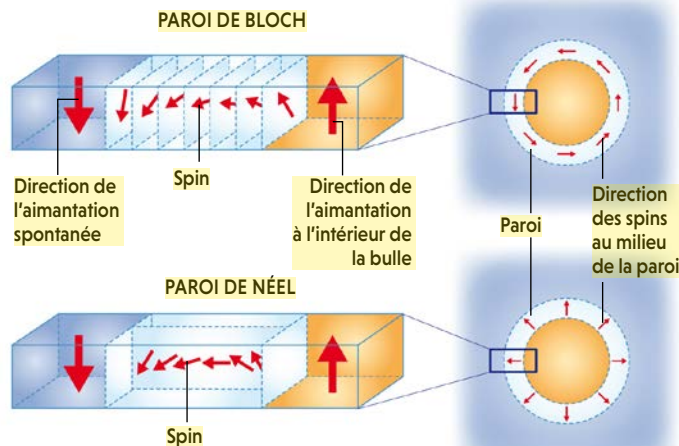
La largeur de cette zone résulte d'un compromis énergétique. Si elle est étroite, les ressorts sont très tendus et l'énergie élastique emmagasinée est importante. En revanche, peu de pendules sont

soulevés par rapport à leur position au repos: l'énergie gravitationnelle correspondante est faible. C'est l'inverse si la zone est étendue. Cette zone sera donc d'autant plus large que les ressorts sont rigides ou que les pendules sont légers.

Faisons tourner l'un des pendules de ce motif: la modification de la tension des ressorts induit une rotation des pendules voisins et ainsi de suite, de proche en proche, de sorte que le motif reprend sa forme initiale, mais en s'étant décalé le long de l'axe. Ce comportement est analogue à celui d'une onde qui se propage dans un milieu: les particules (ici les pendules) qui composent le milieu n'avancent pas avec l'onde, mais restent en place. Nous avons ainsi créé le motif d'une onde solitaire, aussi nommée soliton.

BULLES MAGNÉTIQUES SUR FILM

Un film mince ferromagnétique présente une aimantation spontanée perpendiculaire au film, par exemple dirigée vers le bas. En appliquant localement un champ magnétique intense, on peut y créer des domaines (en orange) où l'aimantation est de sens opposé. Les « parois » de ces bulles magnétiques sont des zones de transition où l'orientation des spins (les aimants microscopiques constitués par les atomes ou les molécules) passe progressivement d'une direction à son opposée. Selon le plan dans lequel l'orientation des spins tourne, on distingue les « parois de Bloch » et les « parois de Néel ». Cela dépend du matériau.



UNE STABILITÉ D'ORIGINE TOPOLOGIQUE

Ce soliton a une propriété remarquable: hormis aux extrémités du dispositif, il n'est pas possible de le détruire, à moins de briser un ressort. Il est protégé par un verrou topologique, sa torsion totale (le nombre de tours qu'on lui a fait faire) étant un invariant. C'est ce qui assure sa stabilité.

Quel est le rapport avec les skyrmions et les bulles magnétiques? Ces entités sont créées dans des films minces ferromagnétiques, qui présentent une aimantation spontanée perpendiculaire au film. L'aimantation résulte des fortes interactions entre les spins – des boussoles microscopiques – d'atomes voisins, interactions qui tendent à les orienter

dans la même direction. Ces forces sont analogues à nos ressorts. Et la gravité est remplacée par le rôle du réseau cristallin qui, en l'absence de perturbations, détermine que l'orientation est perpendiculaire au film.

Supposons que cette orientation soit vers le bas. Que se passe-t-il si l'on redresse des spins vers le haut en appliquant localement un champ magnétique intense, c'est-à-dire si l'on inverse l'aimantation d'une petite région? Le domaine ainsi créé de spins orientés vers le haut est instable, mais on le stabilise aisément en maintenant un tout petit champ magnétique. Ce domaine s'entoure alors d'une « paroi », plus ou moins épaisse, où l'orientation des spins passe progressivement d'une direction à son

opposée à mesure qu'on la traverse (voir la figure ci-dessus).

L'énergie nécessaire à la création de cette paroi est tout à fait analogue à la tension de surface d'une gouttelette d'eau ou d'une bulle de savon. C'est pourquoi le compromis énergétique fait émerger des domaines de forme circulaire, de la même façon que, à trois dimensions, les bulles et les gouttes sont sphériques.

Comme avec notre soliton mécanique, il est possible de déplacer la bulle magnétique le long du film en agissant sur >

Les auteurs ont récemment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> les spins de la paroi. Pour ce faire, on applique un champ magnétique non uniforme, choisi de façon appropriée.

En effet, on montre qu'un tel champ magnétique agit sur les spins au sein de la paroi, qui sont moins figés par leurs interactions avec le cristal que les autres, et déplace la configuration magnétique correspondante. Il s'ensuit un déplacement de la paroi, donc de la bulle. Le phénomène est analogue à celui évoqué pour le soliton mécanique: lorsqu'on fait pivoter l'un des pendules de la zone de torsion dans la chaîne de pendules décrite plus haut, cette zone de torsion se déplace le long de l'axe de rotation des pendules.

En pratique, dans les techniques développées dans les années 1970, ces bulles faisaient quelques dizaines de micromètres. On déposait sur le film des plots constitués d'un matériau dont on pouvait contrôler facilement l'aimantation et le champ magnétique non uniforme qu'elle crée. Avec des géométries bien choisies, on formait des pistes de plots et l'on pouvait faire passer d'un plot à l'autre les bulles magnétiques.

Ainsi, alors qu'avec une bande magnétique ou un disque dur, c'est le support qui se déplace pour amener l'information à la tête de lecture, il n'y avait dans ces dispositifs aucune pièce mobile et c'était l'aimantation qui se déplaçait. Cela améliorerait considérablement la fiabilité des supports d'information, et la technique a donc suscité beaucoup d'espoirs.

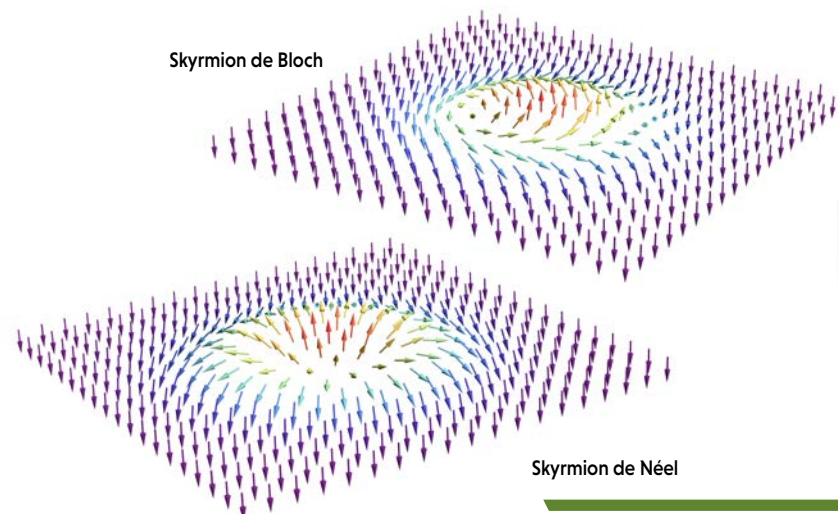
DES BULLES DE PLUS EN PLUS PETITES

En 1971, IBM a livré à la Nasa une mémoire à bulles de 52 bits pour démontrer le potentiel de ce dispositif pour remplacer, dans l'espace, les enregistreurs magnétiques à bande. Plusieurs utilisations commerciales ont suivi, par exemple en 1984 pour la cartouche du jeu vidéo d'arcade Konami. Mais les mémoires à bulles ont totalement disparu à la fin des années 1980 avec le développement des mémoires flash et des techniques apparentées.

Les développements récents de l'électronique de spin (la spintronique) ont cependant remis ces idées dans l'actualité, avec quelques ingrédients nouveaux. Il s'agit désormais de « skyrmions », domaines magnétiques de taille nanométrique et non plus micrométrique, ce qui permet de gagner en densité d'information. À cette échelle, il n'y a plus de distinction entre le domaine magnétique et sa paroi. Ne subsiste qu'une structure où

LE SKYRMION MAGNÉTIQUE

À l'origine, les skyrmions sont des configurations topologiques imaginées dans les années 1960 par le Britannique Tony Skyrme, dans le cadre de la physique des particules. Depuis une dizaine d'années, ils ont acquis une existence plus concrète dans le contexte du magnétisme : les skyrmions magnétiques correspondent à des bulles magnétiques réduites à l'extrême, c'est-à-dire des bulles dont l'intérieur est réduit à un seul spin (d'orientation opposée à l'aimantation spontanée du film magnétique). Leur taille nanométrique permettrait d'augmenter la densité de stockage de l'information numérique.



l'aimantation varie progressivement, avec en son centre un spin d'orientation opposée à celle de l'aimantation du reste du matériau (voir la figure ci-dessus).

Enfin, la structure des spins est l'équivalent bidimensionnel du soliton topologique unidimensionnel que nous avons vu avec notre système mécanique. L'analogie est délicate et profonde, mais la topologie algébrique nous apprend que dans cette situation, il y a aussi un nombre conservé, un équivalent du nombre de tours. Un skyrmion ne peut donc pas se débobiner sans se déchirer.

De fait, cela signifie que détruire un skyrmion a un coût énergétique élevé et qu'il est donc stable. On sait aujourd'hui former des skyrmions à température ambiante et les déplacer. Contrairement aux bulles, cependant, cela ne nécessite pas de champs magnétiques inhomogènes. Grâce au couplage entre propriétés électriques et magnétiques des matériaux dans lesquels les skyrmions sont inscrits, on peut les manipuler avec de très faibles courants électriques. Les progrès sont considérables: on sait déjà réaliser des portes logiques OU et ET en utilisant des skyrmions. Est-ce la promesse de l'apparition d'une nouvelle spintronique dans le monde numérique? L'avenir nous le dira. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Fert et al., **Magnetic skyrmions : Advances in physics and potential applications**, *Nature Reviews Materials*, vol. 2, article 17031, 2017.

A. Fert et al., **Advances in the physics of magnetic skyrmions and perspective for technology**, prépublication arXiv (<https://arxiv.org/abs/1712.07236>), 2017.

A. Bernard-Mantel et al., **The skyrmion-bubble transition in a ferromagnetic thin film**, *SciPost Physics*, vol. 4(5), article 027, 2018 (<https://doi.org/10.21468/SciPostPhys.4.5.027>).