

> 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.

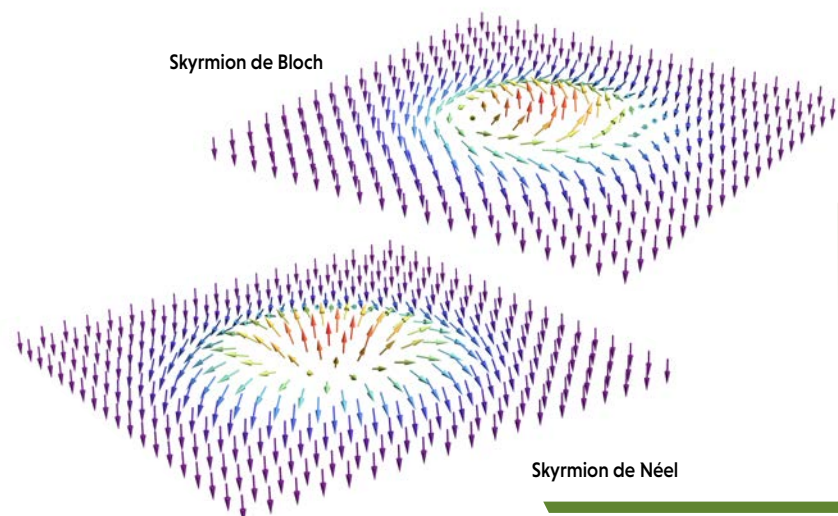
DES BULLES DE PLUS EN PLUS PETITES

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. Bernand-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>).

1 AN

LES AUTEURS



ROLAND LEHOUCQ
chercheur
au Service
d'astrophysique
du CEA à Saclay



J.-SÉBASTIEN STEYER
paléontologue
du CNRS au Muséum
national d'histoire
naturelle, à Paris

QUAND LES ARTHROPODES ATTAQUENT

Araignées, fourmis et criquets ont inspiré de nombreuses œuvres de fiction. Pourquoi? Parce qu'ils réveillent des peurs ancestrales. Mais aussi parce que beaucoup de ces petites bêtes sont des spécialistes de l'invasion.

Beaucoup d'extraterrestres de la science-fiction ou de monstres du fantastique sont des envahisseurs. Sauvages, désordonnés ou au contraire capables de coloniser une ville ou une planète tout entière, ces espèces belliqueuses débarquent en nombre et disposent d'une stratégie, voire d'une technologie, meurtrière qui nous échappe.

Pour jouer sur nos peurs, les auteurs et les réalisateurs attribuent souvent à ces extraterrestres des caractéristiques propres aux arthropodes. Ces derniers grouillent, nagent, rampent et résistent à tout – ou presque. Pas étonnant alors qu'ils suscitent aversion, dégoût et peurs irraisonnées (comme l'arachnophobie, titre du film de Frank Marshall, 1990). Ce choix des arthropodes est d'autant plus pertinent que nombre de ces animaux sont passés maîtres dans l'art de l'invasion. Un rôle plus vrai que nature!

Mais qui sont les arthropodes? Ces animaux bilatériens (ayant un plan de

symétrie séparant un côté gauche et un côté droit) présentent à la fois un corps segmenté, des membres articulés (souvent plus de deux paires) et un squelette externe (exosquelette) généralement constitué de chitine, un polymère glucidique naturel et très résistant.

Ils regroupent notamment les crustacés, les insectes, les arachnides (araignées, scorpions et acariens) et les myriapodes, l'ensemble formant un clade, c'est-à-dire un groupe naturel descendant d'un unique ancêtre commun. Le terme *arthropoda* (du grec *arthron*, articulation et *podos*, le pied) a été créé en 1829 par Pierre-André Latreille, ancien diacre royaliste devenu naturaliste et entomologiste au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

En systématique, les arthropodes sont importants à plus d'un titre: ils regroupent plus d'un million d'espèces actuelles (soit environ 78% du règne animal connu, voir l'encadré page 90) et sont à la base de nombreux réseaux trophiques (chaînes

alimentaires). Au cours de leur longue histoire, qui remonte à plus de 540 millions d'années, ils ont connu un succès évolutif sans précédent. Ils constituent actuellement la plus grande biomasse animale connue aussi bien dans l'eau (avec les crustacés – krill et copépodes – qui forment le zooplancton) que sur la terre ferme (avec les insectes et notamment les 12500 espèces connues de fourmis, qui représentent des millions de milliards d'individus). Bref, par leur longévité évolutive et leur supériorité numérique, les arthropodes nous dépassent largement!

NUISIBLES OU INVASIVES

Par ailleurs, on constate que beaucoup d'arthropodes sont des espèces nuisibles ou invasives – anglicisme qu'il convient ici de remplacer par « envahissantes ». Ces termes anthropocentriques véhiculent en fait des notions différentes en écologie.

Une espèce nuisible (ou ravageuse) est composée d'individus dont la reproduction est devenue incontrôlable et dont

