

Les aimants permanents à base d'éléments de terres rares

Un avenir en vert

La découverte voici trente ans des aimants de type terres rares-fer-bore (R-Fe-B, où R est un élément de terres rares) a entraîné un développement des applications des systèmes à aimants à un niveau qui n'avait pas été anticipé [1-2] (l'adjectif « rare » date de la découverte des éléments R, au XVII^e siècle, mais le néodyme est plus abondant que le cobalt par exemple). L'insertion de ces aimants au sein des petits moteurs électriques commandant le mouvement de la tête de lecture des disques durs des ordinateurs a été importante pour la réduction en taille des micro-ordinateurs. Elle a constitué la première application grand public des aimants de haute performance.

Aujourd'hui, ces matériaux se révèlent indispensables au développement de moyens de transports moins polluants et à l'émergence des énergies vertes. Chaque voiture hybride ou électrique contient quelques kilogrammes d'aimant et une éolienne de 1 MW de 500 kg à 1 t. Le développement des aimants R-Fe-B à une nouvelle échelle requiert que certaines de leurs propriétés soient améliorées et leur coût réduit. Ce sont les objectifs de programmes de recherche qui ont démarré récemment à l'échelle internationale.

Dans un moteur, un fil parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique se trouve soumis à une force, la force de Laplace, donnée par la fameuse « règle des trois doigts ». Réciproquement, dans un générateur électrique, le courant est produit au sein d'un fil dont on force le déplacement dans un champ magnétique. L'introduction d'aimants R-Fe-B dans des machines électriques permet d'obtenir les champs magnétiques requis (de l'ordre de 1 tesla) de façon plus simple que dans les machines classiques et d'atteindre des densités d'énergie supérieures. Les voitures dont la traction est assurée par des moteurs à aimants sont plus légères et consomment donc moins d'énergie. De même, les éoliennes nécessitent des infrastructures plus légères et moins d'entretien, propriétés importantes notamment pour les équipements installés au large des côtes.

Dans tous les matériaux magnétiques, les moments sont couplés les uns aux autres par des interactions entre électrons, appelées d'échange, intrinsèquement liées à la physique quantique. Plus spécifiquement, les matériaux pour aimants sont ferromagnétiques, comme le fer, le cobalt, le nickel et nombreux de leurs alliages, ce qui veut dire que les interactions d'échange imposent un couplage parallèle des moments. En présence de ces seules interactions, le couplage se répéterait jusqu'à l'échelle macroscopique, donnant lieu à une situation dite d'aimantation (moment par unité de volume de matière) saturée. Les champs magnétiques de chaque moment individuel s'additionneraient pour générer un champ magnétique d'intensité maximale.

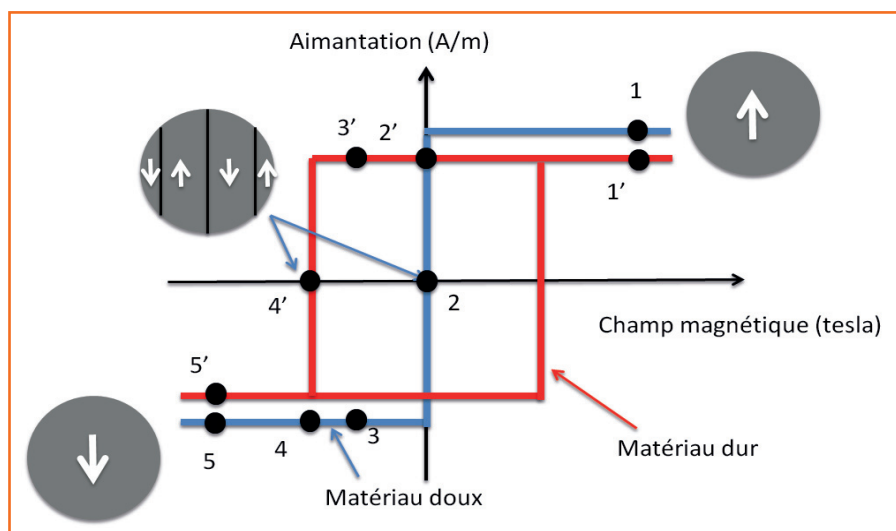
Mais d'autres interactions, dites dipolaires, sont présentes : celles qui font le couplage tête-bêche que nous constatons entre deux aimants placés côte à côte. Mille fois plus faibles

que les interactions d'échange, elles n'affectent pas le couplage ferromagnétique à l'échelle nanométrique, celle de la dimension des atomes. Cependant, les interactions d'échange sont à très courte portée (leur intensité décroît très vite avec l'augmentation de la distance entre atomes), alors que les interactions dipolaires sont à longue portée. La compétition entre interactions, d'intensités et portées très différentes, entraîne la formation de régions de taille micrométrique, les domaines de Weiss. Au sein d'un domaine, les moments parallèles satisfont les interactions d'échange. D'un domaine à l'autre, leurs directions alternent, minimisant l'énergie dipolaire pour un très faible coût en énergie d'échange. Ce faible effet a une forte conséquence : les champs magnétiques générés par chaque domaine s'annulent à l'échelle de l'ensemble du matériau ; les matériaux ferromagnétiques usuels (matériaux magnétiques doux), tels que le fer, nous apparaissent « non magnétiques » en l'absence d'un champ magnétique appliqué.

Dans les matériaux pour aimants (matériaux magnétiques durs), comme dans tous les ferromagnétiques, la configuration optimale des moments est faite de domaines, d'aimantations alternées. Mais imaginons un état d'aimantation saturée, obtenu par exemple en appliquant un champ magnétique initial. La résistance à la décomposition en domaines à partir d'un tel état, lorsque le champ est ramené à zéro, constitue la propriété spécifique des matériaux durs. Elle est dénommée coercitivité et est due au phénomène d'anisotropie magnétique : les moments atomiques possèdent une orientation (pas une direction) privilégiée au sein de la matière. Pour créer des domaines à partir de l'état saturé, il faut retourner certains des moments, et donc, de façon transitoire, les écarter de leur direction privilégiée, ce à quoi l'anisotropie s'oppose. Dans les matériaux durs, l'anisotropie est suffisamment forte pour que la décomposition en domaines à partir de l'état d'aimantation saturée ne se produise pas facilement. Les cycles d'hystérésis (variation de l'aimantation en fonction du champ) de matériaux magnétiques doux et durs sont comparés sur la *figure* (voir page suivante).

Les aimants R-Fe-B appartiennent à la famille des aimants à base d'éléments de terres rares. Ces éléments, dont la particularité est la très forte anisotropie magnétique, ne peuvent servir d'aimant à eux seuls. La température à laquelle l'ordre magnétique disparaît (une mesure de la force des interactions d'échange) est inférieure à la température ambiante (température de Curie dans les ferromagnétiques). Autour de chaque atome, les électrons sont fortement localisés, si bien que les électrons situés sur deux atomes différents interagissent peu.

Les alliages R-Fe ou R-Co associent deux propriétés fondamentales dans le présent contexte. La première est le ferromagnétisme à haute température, caractéristique du fer ou du cobalt : ici, les électrons magnétiques étant itinérants (ils voyagent d'un atome à l'autre), le couplage d'échange entre électrons devient un couplage entre moments magnétiques



Cycles d'hystérésis comparés d'un matériau magnétique doux (en bleu) et d'un matériau dur (en rouge). Dans un champ magnétique suffisamment intense (situations (1) (1') et (5) (5')), l'aimantation s'aligne selon la direction du champ quel que soit le matériau considéré. Dans un matériau dur, l'aimantation tend à résister au champ appliqué, propriété appelée coercivité : en (2), l'aimantation du matériau doux s'annule lorsque le champ lui-même s'annule, alors que celle du matériau dur est in affectée (2'), et en (3), l'aimantation du matériau doux est renversée, celle du matériau dur (3') demeurant antiparallèle au champ. L'aimantation du matériau dur ne se renverse qu'en (4'). Le champ appliqué correspond au champ coercitif

d'atomes voisins. La seconde est l'anisotropie magnétique, caractéristique des éléments R.

Dans les aimants R-Fe-B, le composé magnétique dur est de composition chimique $R_2Fe_{14}B$. L'élément R est principalement le néodyme (Nd). Les propriétés anisotropes diminuent rapidement au-dessus de l'ambiante. Or les températures dans les machines électriques modernes peuvent atteindre 180 °C. Du dysprosium (Dy), plus anisotrope que le néodyme, est utilisé pour préserver des propriétés d'aimants à cette température. Mais la substitution entraîne une diminution d'aimantation. L'utilisation de dysprosium soulève aussi des questions d'ordre stratégique. Les gisements contenant du dysprosium, élément dix fois plus rare que le néodyme, sont concentrés dans un très petit nombre de pays. Le but des recherches actuelles est de diminuer la quantité de dysprosium tout en préservant ou améliorant les propriétés d'aimants.

Nous avons ignoré jusqu'ici un aspect très important : un morceau massif d'un composé $R_2Fe_{14}B$ n'est pas un aimant,

bien qu'il ait les propriétés que nous avons décrites. Des défauts de taille nanométrique sont toujours présents, dans lesquels les propriétés anisotropes sont perdues. La formation (on dit nucléation) d'un seul domaine magnétique d'aimantation inversée annihile les propriétés d'aimants. Les aimants réels sont fabriqués par agglomération de grains de $R_2Fe_{14}B$ de diamètre de l'ordre de 1-5 μm , au sein d'une matrice non magnétique. Une telle microstructure granulaire limite l'effet négatif d'un défaut au seul grain auquel il appartient. Par ailleurs, on montre que l'état d'aimantation saturée devient de plus en plus stable lorsque la taille des grains magnétiques diminue. Divers procédés métallurgiques, tel le frittage de poudres, permettent d'obtenir la microstructure granulaire désirée.

La modélisation théorique des processus de renversement d'aimantation (processus qui décrivent ce qu'il se passe lorsque les moments quittent leur direction privilégiée) permet d'analyser le lien entre défauts et nucléation. Des matériaux modèles ont été préparés, en particulier sous forme de couches, de propriétés bien supérieures à celles des matériaux usuels [3]. Ces résultats guident aujourd'hui le développement de procédés industriels, visant à reproduire les nanostructures obtenues dans les matériaux modèles. Une retombée de ces recherches est la fabrication de micro-aimants à partir de matériaux en couches épaisses, avec des applications très originales en médecine et biologie [4] ou touchant à des aspects fondamentaux de la biologie [5].

Références

- [1] Gutfleisch O. *et al.*, Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient, *Adv. Mater.*, **2011**, 23, p. 821.
- [2] Coey J.M.D., Hard magnetic materials: A perspective, *IEEE Trans. Mag.*, **2011**, 47, p. 4671.
- [3] Woodcock T.G. *et al.*, Understanding the microstructure and coercivity of high performance NdFeB-based magnets, *Scripta Materialia*, **2012**, 67, p. 536.
- [4] Zanini L.F. *et al.*, Micromagnet structures for magnetic positioning and alignment, *J. Appl. Phys.*, **2012**, 111, 07B312.
- [5] T. Brunet *et al.*, Evolutionary conservation of early mesoderm specification by mechanotransduction in Bilateria, *Nature Comm.*, 2013, article 2821.

Cette fiche a été réalisée par **Dominique Givord**, chercheur émérite au CNRS (Institut Néel, Grenoble) et professeur à l'Université Fédérale de Rio de Janeiro (dominique.givord@neel.cnrs.fr), et **Nora Dempsey**, chercheuse au CNRS à l'Institut Néel (nora.dempsey@grenoble.cnrs.fr). Tous deux animent une équipe spécialisée dans l'étude des matériaux pour aimants. Ils participent à de nombreuses collaborations aux échelles européenne et internationale, avec des partenaires académiques et industriels.

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par un comité éditorial mené par Jean-Pierre Foulon et Michel Quarton (contact : bleneau@lactualitechimique.org).