

La sensibilité des matériaux magnétiques doux à leur environnement

L'environnement des matériaux magnétiques "doux" peut perturber leurs propriétés mais aussi être mis à profit pour créer de nouvelles fonctionnalités. Les chercheurs travaillent donc sur les deux volets du rapport à l'environnement de ces matériaux.

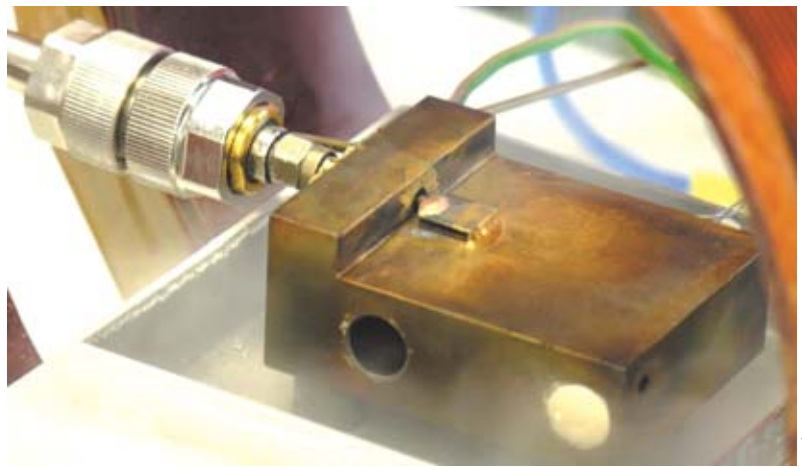
Lorsqu'ils sont sollicités par un **champ magnétique** même très faible, les **matériaux magnétiques doux**, caractérisés par un **cycle d'hystérésis** fin, réagissent. Cela les rend attrayants pour réaliser par exemple des fonctions inductives utilisables à hautes fréquences. Dans ce domaine, de nombreuses études sont menées pour augmenter les performances d'**inductances** microélectroniques en leur associant des matériaux magnétiques doux. L'objectif? Réduire la taille de ces composants en bénéficiant de la **perméabilité magnétique** élevée de l'inclusion magnétique douce.

La facilité avec laquelle les matériaux magnétiques doux tendent à être perturbés par le champ magnétique n'a d'égale que celle avec laquelle ils réagissent à un certain nombre d'autres facteurs de leur environnement, tels la température ou les contraintes mécaniques. Connaître, comprendre, caractériser cette sensibilité est alors nécessaire pour prédire les performances finales des dispositifs dans lesquels les matériaux magnétiques sont inclus.

Effet du champ magnétique

Un matériau magnétique est caractérisé au premier ordre par l'existence en son sein de **moments magnétiques** locaux dont la sommation sur une direction donnée fournit ce que l'on appelle couramment l'**aimantation** du matériau. Celle-ci est spontanée ou non. Si les moments magnétiques ne sont pas organisés mais orientés dans toutes les directions de l'espace, l'aimantation du matériau est nulle. Si au contraire ils sont organisés, par exemple dans une direction préférentielle, l'aimantation du matériau est non nulle. Lorsque le matériau magnétique est soumis à un champ externe, les moments magnétiques tendent à s'aligner dans la direction et suivant le sens de ce champ. L'**anisotropie** du matériau est ainsi modifiée: elle augmente dans la direction du champ magnétique appliqué. Pour ce qui est des propriétés hautes fréquences de ces matériaux, leur caractérisation sous champ magnétique peut ainsi être un moyen d'investigation de leurs propriétés intrinsèques.

D'un côté, cette sensibilité peut être exploitée pour modifier volontairement les propriétés d'un matériau. Si celui-ci, brut d'élaboration, présente des propriétés plutôt à basses fréquences, l'application d'un champ dans la bonne direction permet d'augmenter les propriétés à hautes fréquences. D'un autre côté, si le champ magnétique terrestre réussit à modifier les propriétés d'un filtre utilisé en téléphonie mobile



CEA/DAM

parce que celui-ci intègre une inclusion magnétique, cela est dommageable.

Les études menées au Département matériaux de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA dans son centre du Ripault (Indre-et-Loire) sur l'ingénierie des propriétés hautes fréquences permettent aujourd'hui de concevoir, par exemple, des dispositifs dans lesquels les propriétés magnétiques et même électriques à hautes fréquences dépendent du champ magnétique appliqué. Il a ainsi été montré qu'un réseau de fils magnétiques pouvait permettre de contrôler le champ électrique à haute fréquence à l'aide d'un champ magnétique à basse fréquence (voir *Les matériaux magnétiques hyperfréquences*).

Effet de la température

Un aimant suffisamment chauffé n'attire plus le fer. La température à laquelle se produit cette disparition d'aimantation spontanée est appelée **température de Curie**. L'effet n'est cependant pas aussi brutal qu'il y paraît. L'augmentation de la température se traduit par une diminution de l'**aimantation à saturation** des matériaux magnétiques. Le matériau devient moins magnétique au fur et à mesure de cette augmentation de température.

L'aimantation à saturation est une caractéristique magnétique statique; c'est un paramètre qui dépend notamment de la composition du matériau magnétique et de sa structure. Elle entre également directement en compte dans la réponse en fréquence du matériau. Le *spectre de perméabilité magnétique* dépend, autant en niveau qu'en forme, de ce paramètre. Il est

Cellule de mesure par perturbation de spire pour la détermination des spectres de perméabilité de couches minces magnétiques en température de - 180 °C à 300 °C au sein de l'installation mise en place au centre CEA du Ripault (Indre-et-Loire).

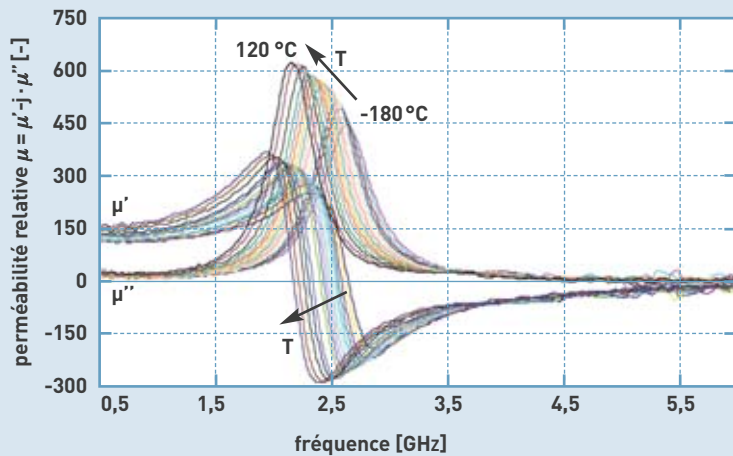


Figure 1. Évolution du spectre de perméabilité d'une couche mince magnétique en température mesurée de -180 °C à 120 °C grâce à l'installation mise en place au Département matériaux du CEA/DAM (j étant le nombre imaginaire pur [$j^2 = -1$] normalement noté " i " mais remplacé par " j " dans les travaux à dominante électronique ou magnétique pour éviter toute confusion avec la valeur de courant [A] traditionnellement notée " i ").

dès lors compréhensible que la température puisse jouer les "trouble-fête" dans les propriétés d'un filtre radiofréquence soumis à l'action de la chaleur.

Le CEA a développé une instrumentation particulière permettant de caractériser les spectres de propriétés magnétiques de -180 °C à 300 °C (figures 1 et 2). Les données acquises sont directement insérées comme données d'entrée dans les outils de calcul des caractéristiques des dispositifs intégrant les matériaux magnétiques. Cette même instrumentation permet d'évaluer l'effet de hautes températures, cette fois-ci sur le long terme. On parle alors de **recuit magnétique**: l'objectif est de modifier de façon définitive les propriétés du matériau en lui faisant subir un cycle thermique optimisé. Les températures atteintes lors de ces cycles peuvent être bien inférieures à la température de formation du matériau. Les phénomènes mis en jeu s'apparentent alors à une réorganisation locale de la matière, réorganisation qui peut être amplifiée par l'application d'un fort champ magnétique durant le recuit. Si la température de recuit se rapproche de la température d'élaboration du matériau, il est alors possible d'en changer la microstructure. Un matériau **amorphe** pourra alors devenir **nanocristallisé**. Des résultats récents obtenus au Ripault montrent que la stabilité en température des matériaux magnétiques peut être favorisée par ce type d'opération. L'intérêt pour les applications des matériaux magnétiques est évident.

Figure 2. Déformation de la surface d'énergie libre dans un cristal magnétique soumis à une contrainte, ici suivant l'axe X (à gauche en l'absence de contrainte, à droite en présence de contrainte). Les directions de facile aimantation correspondent aux zones bleues des surfaces; en présence de contrainte, l'aimantation aura tendance à s'aligner dans la direction X.

Effet des contraintes mécaniques

Les effets **magnétostrictifs** regroupent l'ensemble des couplages pouvant exister entre propriétés magné-

tiques et propriétés mécaniques d'un matériau. Une modification du volume du matériau peut être observée à l'apparition du caractère magnétique, par exemple quand la température diminue et passe en dessous de la température de Curie. De même, peut-on observer une déformation d'un matériau magnétique si un champ magnétique lui est appliqué.

À l'inverse, l'application d'une contrainte mécanique sur un matériau magnétique va le déformer. Cette déformation va pouvoir à son tour modifier le caractère magnétique du matériau. Au premier ordre, une modification de l'aimantation du matériau pourra être observée, aimantation qui tendra à se rapprocher ou à s'éloigner de la direction d'application de la contrainte. La figure 2 permet de se rendre compte de l'influence d'une contrainte sur l'énergie libre d'un **cristal** magnétique, contrainte dont la répartition va fixer la direction de l'aimantation au sein du matériau. Le sens de cette orientation sous contrainte dépend du signe du coefficient de magnétostriction du matériau. Ce coefficient exprime en première approche la sensibilité du magnétisme du matériau à la contrainte.

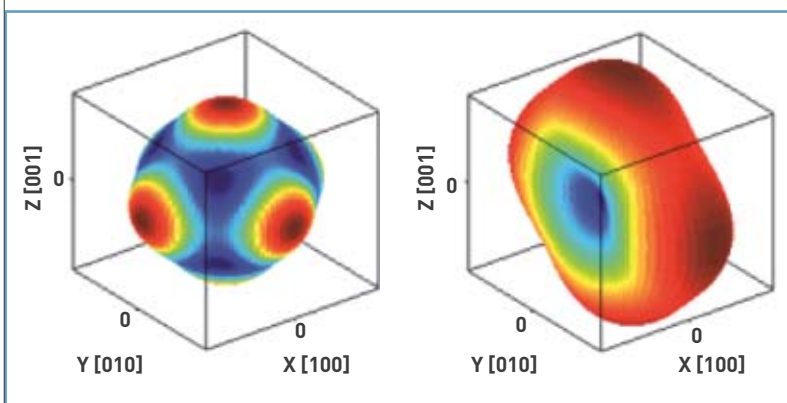
L'association des matériaux magnétiques avec des matériaux **piézo-électriques** est aujourd'hui étudiée. Ces derniers se déforment quand ils sont soumis à un champ électrique. Leur déformation, transmise au matériau magnétique, peut alors en modifier les propriétés. Des travaux récemment menés par une équipe du Laboratoire d'Électronique et Systèmes de Télécommunications (UMR 6165) de l'**Université de Bretagne occidentale** en collaboration avec le Département matériaux du CEA/DAM montrent clairement le potentiel d'une telle association. En termes d'applications, il s'agit de réaliser des composants dits "agiles en fréquence": leurs propriétés peuvent être "commandées" pour s'adapter, par exemple, à la fréquence de réception d'un signal téléphonique. Cette commande, pour les matériaux magnétiques, se fait traditionnellement en utilisant un champ magnétique. L'intérêt d'utiliser un champ électrique sur le matériau piézo-électrique est de diminuer la consommation d'électricité et de supprimer l'encombrement associé à l'utilisation de bobines pour générer un champ magnétique.

Les promesses du magnétisme à haute fréquence

L'environnement des matériaux magnétiques peut fortement perturber de leurs propriétés mais donc devenir aussi source d'innovations, la frontière entre les deux propositions n'étant souvent pas bien large. Aussi, les recherches menées aujourd'hui tendent-elles à la fois à stabiliser les propriétés des matériaux vis-à-vis de leur environnement et à utiliser cet environnement pour créer de nouvelles fonctionnalités. Le champ magnétique n'est plus la seule source de contrôle des propriétés. Les travaux actuels visent à développer et intégrer ces principes pour faire de l'utilisation du magnétisme à haute fréquence une réalité industrielle encore plus avancée.

> **Marc Ledieu**

Direction des applications militaires
CEA Centre du Ripault



Les différentes formes de magnétisme

Le **magnétisme** trouve essentiellement son origine dans les propriétés des **électrons** telles qu'elles sont expliquées par la **physique quantique**. Leur état quantique de **spin** est responsable d'une première partie du magnétisme (*magnétisme de spin*). Une deuxième partie est imputable au mouvement orbital des électrons autour du noyau de l'**atome** (*magnétisme orbital*) et également au magnétisme du **noyau** lui-même (*magnétisme nucléaire*), notamment mis à profit dans les techniques d'imagerie médicale par **résonance magnétique nucléaire**. Le magnétisme est donc produit par des charges électriques en mouvement. La force agissant sur ces charges, dite **force de Lorentz**, traduit la présence d'un **champ magnétique**.

L'électron possède un **moment magnétique** élémentaire (le **quantum** magnétique étant le *magnéton* imaginé par Bohr) qui peut être associé à l'image de son mouvement de rotation du **spin** sur lui-même dans un sens ou dans l'autre, orienté vers le haut ou vers le bas. Le **nombre quantique de spin** (un des quatre nombres qui "quantifient" les propriétés de l'électron) est égal à $1/2$ ($+ 1/2$ ou $- 1/2$). Une paire d'électrons ne peut occuper la même *orbitale* que si l'un et l'autre sont de moments magnétiques opposés.

Chaque atome peut être assimilé à un petit aimant porteur d'un moment magnétique élémentaire. Le spin du noyau (**neutron** et **proton** ont eux-mêmes un spin demi-entier) est demi-entier si le **nombre de masse** est impair ; nul si le nombre de masse et la charge sont pairs, et entier si le nombre de masse est pair et la charge impaire. De nombreux moments magnétiques peuvent, à une échelle plus importante, constituer des **domaines magnétiques** dans lesquels tous ces moments sont orientés

dans la même direction. Ces régions de l'espace sont séparées entre elles par des **parois**. Rassemblés, ces domaines peuvent eux-mêmes constituer un **aimant** à l'échelle macroscopique (figure E1).

De l'organisation de ces constituants élémentaires dépend la manifestation de différents types de magnétisme, associés traditionnellement à trois grandes familles de matériaux : *ferromagnétiques*, *paramagnétiques* et *diamagnétiques*.

Tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques sont par définition paramagnétiques, dans la mesure où leur **susceptibilité magnétique** est positive, mais cette susceptibilité est particulièrement élevée dans les ferromagnétiques, qui constituent donc en eux-mêmes une famille.

1. Les matériaux **ferromagnétiques** sont constitués de petits domaines à l'intérieur desquels les atomes, présentant une **aimantation** parallèle, tendent à s'aligner comme autant de **dipôles** élémentaires dans la direction d'un **champ magnétique** extérieur. Les moments magnétiques de chaque atome peuvent s'aligner spontanément dans ces domaines, même en l'absence de champ extérieur. En présence d'un tel champ, les parois se déplacent et tendent à renforcer le champ appliqué. Si celui-ci dépasse une certaine valeur, le principal domaine orienté dans la direction du champ tendra à occuper tout le volume du matériau. Si le champ diminue, les parois se déplacent, mais pas de façon symétrique, une partie du mouvement "aller" des parois étant irréversible : il subsiste donc une **magnétisation rémanente**, importante dans les aimants proprement dits ou la magnétite naturelle.

L'ensemble du processus constitue un **cycle d'hystérésis**, la relation du champ induit au champ extérieur dessinant une *boucle*

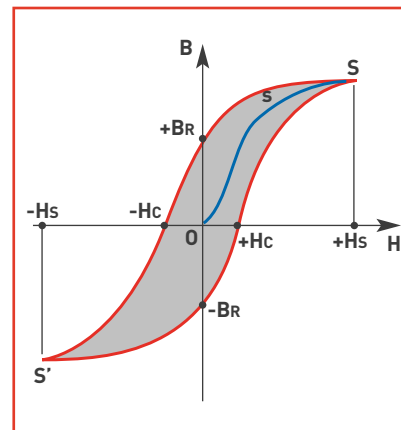


Figure E2. L'induction B d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ H). Si la première aimantation dessine une courbe de type $0sS$ en bleu sur la figure, elle manifeste à partir de s une saturation. L'induction n'est conservée qu'en partie si le champ tend vers zéro ; cette induction rémanente ne peut être annulée que par une inversion du champ magnétique jusqu'à une valeur de champ "coercitif". Le cycle d'hystérésis traduit des pertes "par frottement" entre les domaines magnétiques. Ces pertes sont représentées par la surface que délimitent les courbes d'aimantation et de désaimantation.

ou *courbe d'hystérésis* dont la surface représente l'énergie perdue dans la partie irréversible de ce processus (figure E2). Pour annuler le champ induit, il faut appliquer un **champ coercitif** : les matériaux avec lesquels les aimants permanents artificiels sont réalisés présentent une valeur élevée de champ coercitif.

En général, le moment magnétique total des matériaux ferromagnétiques est nul, les différents domaines ayant des orientations différentes. Le ferromagnétisme disparaît si on dépasse une certaine température appelée **point de Curie**.

Le couplage collectif des spins entre centres métalliques du matériau ou d'un complexe de **métaux de transition** explique les propriétés magnétiques du matériau, les moments de tous les spins se trouvant tous orientés de manière identique.

Les matériaux dont les atomes sont éloignés les uns des autres dans leur structure **crystalline** favorisent un alignement de ces aimants élémentaires par couplage. Le fer, mais aussi le cobalt, le nickel et leurs **alliages**, en particulier les aciers, et certains de leurs composés appartiennent à cette catégorie caractérisée par une susceptibilité magnétique positive et très élevée, ainsi que,

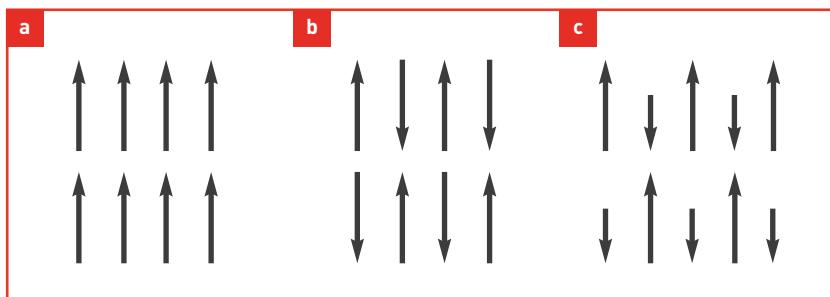


Figure E1. Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposés et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



Stoiber Productions, München

Arrivée à la gare routière de Long Yang, à Shanghai (Chine), d'un train à sustentation magnétique du type Transrapid, d'origine allemande, mis en service en 2004 pour relier la ville à l'aéroport international de Pudong.

plus faiblement, certains métaux de la famille des **terres rares**, quelques alliages dont les mailles sont grandes et certaines combinaisons d'éléments n'appartenant pas eux-mêmes à cette famille.

Dans les matériaux **ferrimagnétiques**, les domaines magnétiques constituent des ensembles pouvant être alignés dans des sens opposés (anti-parallèles), mais leur moment magnétique résultant diffère de zéro alors que le champ extérieur est nul (exemples de la magnétite, de l'ilménite ou des oxydes de fer). Le ferrimagnétisme s'observe dans des matériaux comportant deux types d'atomes se comportant comme des aimants de force différente et orientés en sens contraire. Si la somme des moments parallèles et anti-parallèles est nulle, il s'agit d'**anti-ferromagnétisme** (exemple du chrome ou de l'hématite). En effet, si les atomes sont plus rapprochés, la disposition la plus stable est celle d'aimants antiparallèles, chacun compensant en quelque sorte son voisin (figure E1).

2. Les matériaux **paramagnétiques** présentent un comportement de même nature que les ferromagnétiques, bien que beaucoup moins intense (leur susceptibilité magnétique est positive mais très faible, de l'ordre de 10^{-3}). Chaque atome d'un tel matériau a un moment magnétique non-nul. Sous l'action d'un champ extérieur, les moments magnétiques s'orientent et augmentent ce champ, qui décroît cependant avec la température, l'agitation thermique désorientant les dipôles élémentaires. Les matériaux paramagnétiques perdent leur aimantation dès qu'ils ne sont plus soumis au champ magnétique. La plupart des métaux, y compris des alliages d'éléments ferromagnétiques, font partie de cette famille, ainsi que des minéraux comme la pegmatite.

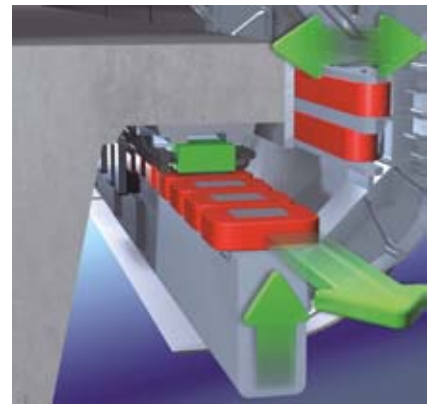
3. Les matériaux **diamagnétiques** présen-

tent une susceptibilité magnétique négative et extrêmement faible (de l'ordre de 10^{-5}). La magnétisation induite par un champ magnétique s'opère dans la direction opposée à ce dernier : ils ont donc tendance à s'éloigner le long de ses **lignes de champ** vers les zones de faible champ. Un diamagnétique parfait offrirait une résistance maximale au passage du champ magnétique et présenterait une **perméabilité** nulle. Les métaux comme l'argent, l'or, le cuivre, le mercure ou le plomb, le quartz, le graphite, les gaz rares ainsi qu'une grande majorité des composés organiques se rangent dans cette catégorie.

En fait, tous les corps présentent peu ou prou ce phénomène de diamagnétisme, imputable à la déformation des orbitales électroniques des atomes sous l'action d'un champ extérieur, phénomène réversible avec la disparition du champ extérieur. Comme Michael Faraday l'a montré en son temps, toute substance est donc plus ou moins "magnétisable" pour autant qu'elle soit placée dans un champ magnétique suffisamment intense.

L'électromagnétisme

C'est le Danois Hans Christian Ørsted, professeur à l'Université de Copenhague qui, le premier, a fait autour de 1820 le lien entre les deux domaines jusqu'alors complètement séparés de l'**électricité** et du **magnétisme**. Il a mis en évidence la déviation de l'aiguille d'une boussole à proximité d'un fil parcouru par un courant électrique, avant que Faraday n'énonce la loi qui porte son nom : le champ magnétique produit est d'autant plus fort que l'intensité du courant est importante. La discipline qui étudie les champs magnétiques statiques (ne dépendant pas du temps) est la **magnétostatique**. Le **champ magnétique** forme, avec le **champ**



Vue de détail des aimants pour le guidage et la propulsion du train.

électrique, les deux composantes de l'**électromagnétisme**. Des ondes peuvent se propager librement dans l'espace, et dans la plupart des matériaux, dans tous les domaines de longueur d'onde (ondes radio, micro-ondes, infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et rayons gamma). Les **champs électromagnétiques** sont donc une combinaison de **champs de force** électriques et magnétiques naturelle (le champ magnétique terrestre) ou non (de basses fréquences comme les lignes et les câbles électriques, ou de haute fréquence comme les ondes radio (téléphone cellulaire compris) ou de télévision).

Mathématiquement, les lois de base de l'électromagnétisme sont résumées dans les quatre **équations de Maxwell** (ou **de Maxwell-Lorentz**) qui permettent de décrire l'ensemble des phénomènes électromagnétiques de manière cohérente, de l'électrostatique et la magnétostatique à la propagation des ondes. James Clerk Maxwell les a formulées en 1873, trente-deux ans avant qu'Albert Einstein ne place la théorie de l'électromagnétisme dans le cadre de la **relativité restreinte**, qui expliquait ses incompatibilités avec les lois de la physique classique.