

# Le microfluxgate, ou comment concilier précision et économie dans un magnétomètre

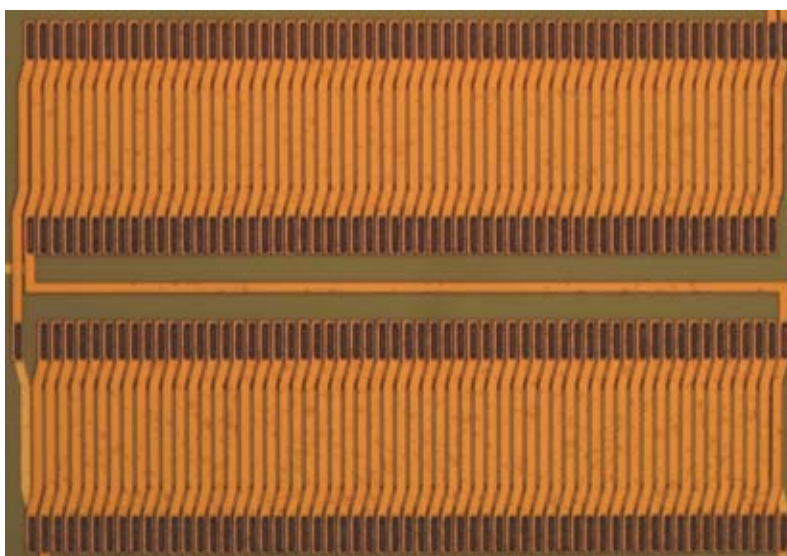
Avec de nouveaux magnétomètres miniaturisés appliquant le principe de la “porte de flux”, les chercheurs du CEA-Léti sont aujourd’hui en mesure de proposer des capteurs magnétiques plus précis et moins gourmands en énergie qui ouvrent la voie à nombre d’applications 3D nomades.

La réalisation de capteurs magnétiques 3D intégrés, combinant à la fois un haut niveau de performances ainsi qu’un faible niveau de consommation, constitue un des principaux défis proposés aux acteurs du monde des micro-capteurs. Tirés par une forte demande applicative, les travaux dans ce domaine foisonnent. Les systèmes déjà commercialisés ne capturent pas les mouvements fortement dynamiques et les solutions très performantes ne sont pas produites massivement. Les applications sont cependant aussi diverses que nombreuses : fonctions d’aide à l’orientation et au déplacement dans l’espace ajoutées à un téléphone portable ou dans une montre, instruments de détection et de reconnaissance d’attitude pour améliorer le monitoring de personnes sous surveillance médicale, systèmes avec capteurs magnétiques couplés à des accéléromètres pour capturer plus facilement les mouvements dynamiques, interfaces homme-machine pour les applications de réalité virtuelle et les jeux vidéo...

Grâce aux travaux conjoints du Département Intégration Hétérogène Silicium (DIHS) et du Département Conception et Intégration Système (DCIS), le Laboratoire d’électronique et de technologie de l’information (CEA-Léti) propose un **magnétomètre**, constitué d’un capteur microfluxgate et d’un **ASIC** de nouvelle génération, capable de répondre aux contraintes de miniaturisation, de performance et de faible consommation.

## Un capteur magnétique de haute précision

Le micro-capteur, basé sur le principe du fluxgate ou “porte de flux”, exploite l’hystérésis de **matériaux magnétiques doux** (Mémo A, *Les différentes formes de magnétisme*, p. 10). La partie sensible du système est réalisée sur des substrats de **silicium** grâce à des techniques de fabrication collective et est constituée de **bobines** en cuivre enroulées autour de noyaux **ferromagnétiques** en **Permalloy**. Une première série de bobines excite ces noyaux avec un **champ magnétique** connu, venant se superposer au champ magnétique ambiant, et une seconde série permet d’observer leur réponse à cette excitation et de remonter ainsi à une mesure du champ magnétique ambiant suivant l’axe bobine-noyau. La fonction capteur est exploitée pleinement grâce

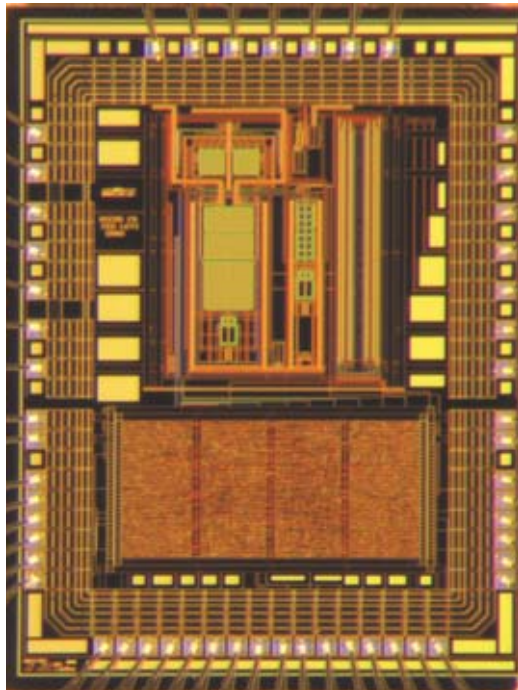


Capteur microfluxgate dont la surface est inférieure à 1 mm<sup>2</sup>. La partie sensible comportant deux noyaux identiques autour desquels sont enroulés des bobinages d’excitation et de détection occupe une surface de 800 µm x 500 µm. La surface finale avec les plots de connexion électrique est de 800 µm x 700 µm.

à une électronique de commande réalisée sous forme d’ASIC et élaborée par les fabricants de circuits intégrés microélectroniques. Celle-ci permet de faire fonctionner le capteur, de l’asservir et de mettre en forme le signal de sortie.

Intrinsèquement, les performances métrologiques d’un microfluxgate sont très bonnes, caractérisées par un très faible niveau de bruit et surtout par une très grande stabilité, notamment vis-à-vis de la température. En conséquence, il est capable de mesurer des champs magnétiques avec une grande précision. Par exemple, une boussole à base de microfluxgates atteindrait une précision angulaire bien inférieure à 1°, alors que les produits commerciaux disponibles aujourd’hui dans ce secteur garantissent 5° dans le meilleur des cas. Ces caractéristiques en font un concurrent potentiel pour les technologies de capteurs actuellement les plus répandues, comme les capteurs à **effet Hall** ou les capteurs **magnétorésistifs**, à la condition de diminuer la consommation et le prix final du produit. À performance égale, l’amélioration du système permet de réduire la surface des deux puces et la puissance consommée. La démonstration de l’adé-

Électronique de mise en œuvre du capteur microfluxgate basée sur le nouveau principe d'excitation et de détection. La surface importante (9 mm<sup>2</sup>) de ce premier ASIC démontrant la faisabilité de la méthode est fortement réduite une fois supprimés les modules et les plots de test et d'évaluation de chaque sous-bloc.



CEA

quation performance-coût, permettant à des magnétomètres microfluxgates de viser des marchés de masse, est en passe d'être réussie, même pour les besoins tri-axes (mesures du champ magnétique selon les trois axes d'un référentiel spatial).

## Une nouvelle architecture électronique moins gourmande

Un premier effort a tout d'abord été porté sur la réduction de la consommation. Pour atteindre cet objectif, c'est le principe même de fonctionnement du capteur qui a été revu. Alors qu'un fluxgate repose traditionnellement sur un mode de détection synchrone – un signal périodique de fréquence  $f$  est injecté sur les bobines d'excitation des noyaux ferromagnétiques et la mesure du champ ambiant est obtenue *via* la détection de l'harmonique  $2f$  qui apparaît sur les bobines de détection –, un nouveau principe de détection exploitant les effets transitoires et haute fréquence a été développé et breveté. L'excitation du circuit magnétique ne se fait plus en utilisant un signal périodique mais des impulsions courtes et basse tension, présentant par contre des fronts très raides. La mesure du champ magnétique ambiant est effectuée par une simple intégration de la réponse de ces noyaux dans un court intervalle de temps judicieusement choisi. La mise en œuvre de ce principe est intrinsèquement moins gourmande qu'un système basé sur une détection synchrone. De plus, l'électronique présente l'avantage d'être configurable

(1) Tension résiduelle de décalage ou tension d'offset : tension résiduelle mesurée lorsque le capteur est placé en condition de champ magnétique nul.

(2) Réjection du mode commun (par analogie avec l'électronique) : technique de suppression des contributions ne constituant pas le signal à mesurer, en particulier les signaux d'excitation injectés dans les deux voies du capteur. En électronique, le taux de réjection du mode commun (TRMC, ou CMRR pour *Common Mode Rejection Ratio*) est une valeur numérique quantifiant la capacité d'un amplificateur différentiel à rejeter la tension commune de ses deux entrées.

et la consommation du magnétomètre peut être ajustée en fonction de la **résolution** recherchée, en modifiant par exemple le pas de répétition des impulsions. Un premier démonstrateur de cette architecture électronique a permis de valider le concept et de démontrer que ce nouveau mode opératoire conduira aux mêmes performances métrologiques.

## Miniaturiser pour accroître les performances

Ce nouveau mode d'excitation tire profit des performances hautes fréquences des matériaux magnétiques en couche mince. Les microfluxgates sont capables de fonctionner à des excitations de plusieurs centaines de **MHz**, correspondant à des temps de montée des impulsions pouvant être inférieurs à la nanoseconde ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ). Il devient alors possible de réduire la taille du capteur, qui répondra mieux en fréquence. Il faut également repousser les limites fréquentielles classiques dues notamment à l'apparition de **courants de Foucault**, au mouvement des **parois** et à la configuration des **domaines d'aimantation** dans les noyaux ferromagnétiques. La transposition dans le domaine des microtechnologies des techniques de "lamination" des noyaux magnétiques a été développée et validée. À l'image d'un mille-feuille, ces noyaux sont réalisés par empilement successif de couches de matériau ferromagnétique séparées entre elles par de fines couches isolantes. Cette rupture technologique améliorera les performances du capteur qui répond mieux aux fronts de montée générés dans la gamme 2 à 20 ns. Une consommation d'environ 1 mW par axe de mesure, rendue possible par cette nouvelle approche combinée avec une surface du capteur de l'ordre du mm<sup>2</sup>, ouvre la porte à de nombreuses applications grand public. D'autres efforts de développement ont été menés plus en amont pour intégrer un capteur tri-axes **monolithique**. Des brevets ont été déposés pour rendre chaque voie encore plus compacte et améliorer les paramètres tels que le niveau de bruit, la tension résiduelle de décalage<sup>(1)</sup>, la réjection du mode commun du capteur<sup>(2)</sup>...

## Vers des marchés grand public

Le capteur microfluxgate développé au Léti est donc maintenant en mesure de satisfaire au cahier des charges de très nombreuses applications pour lesquelles les contraintes combinées de coût, de performance, de consommation et d'encombrement n'ont pu être satisfaites à ce jour, pour répondre notamment au développement croissant des applications nomades fortement demandeuses de ce type de capteur. Il ne serait donc pas surprenant de retrouver des microfluxgates dans votre prochain téléphone portable et que celui-ci vous permette de retrouver votre chemin dans les dédales d'une ville inconnue, ou qu'il vous aide à améliorer votre service au tennis ou votre swing au golf *via* des dispositifs intégrés de capture et d'analyse de votre geste sportif, à peine plus volumineux qu'une tête d'épingle.

> **Thomas Jager** et **Élisabeth Delevoey**  
Institut Léti  
Direction de la recherche technologique  
CEA Centre de Grenoble

# 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*

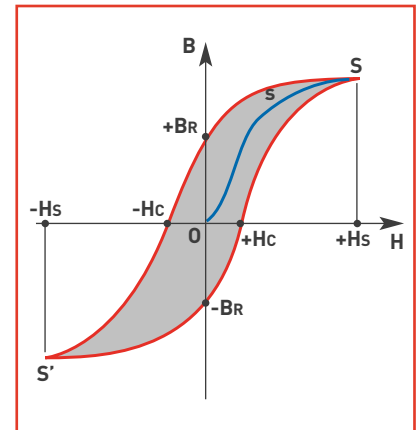


Figure E2. L'induction  $B$  d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ  $H$ ). Si la première aimantation dessine une courbe de type  $0sS$  en bleu sur la figure, elle manifeste à partir de  $s$  une saturation. L'induction n'est conservée qu'en 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,

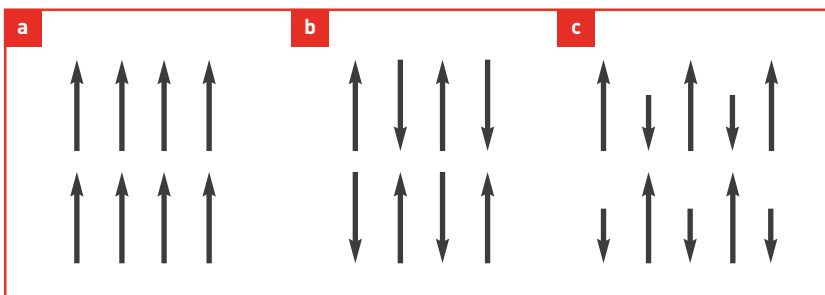


Figure E1. Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposé et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



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.

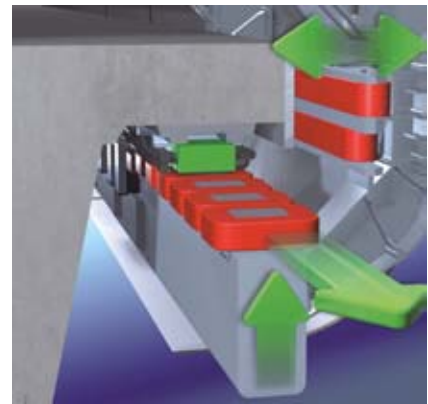
**3.** Les matériaux **diamagnétiques** présen-

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 câblages électriques, ou de plus 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.