

Électronique de *spin* et capteurs magnétiques

Claude Fermon (claude.fermon@cea.fr) et Myriam Pannetier-Lecœur
DSM/IRAMIS/SPEC, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Les capteurs de champ magnétique ont de nombreuses applications : lecture de disques durs, contrôle de positionnement dans l'espace, codage de position et d'angle, mesure de courant électrique sans contact, imagerie magnétique, contrôle non destructif, imagerie médicale...

Parmi les différents types de capteurs magnétiques, ceux issus de l'électronique de *spin* offrent la possibilité d'une grande sensibilité sur une petite échelle spatiale. Utilisés systématiquement dans le domaine des têtes de lecture des disques durs (voir l'article de J.P. Nozières, p. 12), leur production en grande série pour d'autres applications vient de commencer.

Les capteurs magnétiques sont implantés dans un très grand nombre d'objets technologiques qui nous entourent. Par exemple, une voiture récente contiendra plus de trente capteurs magnétiques et vous en trouverez également dans un réfrigérateur, une machine à laver et même certaines chaussures de sport. Les capteurs magnétiques permettent en effet de détecter et mesurer un champ magnétique créé par un objet magnétique (aimant ou bobine) ou par un courant électrique (à travers son champ magnétique rayonné). Ils offrent donc de très nombreuses possibilités liées à la transmission d'information sans contact, à la détection à distance ou à la mesure d'un courant. Nous allons d'abord donner un aperçu des divers types de capteurs magnétiques, et voir comment ceux qui sont issus de l'électronique de *spin* se placent dans ce paysage ; puis nous allons illustrer leur intérêt à travers quelques exemples.

Les différents capteurs magnétiques

Il y a environ une quinzaine de types de capteurs magnétiques. Certains sont des capteurs de champ (c'est-à-dire des capteurs mesurant directement la valeur du champ magnétique selon un ou plusieurs axes), d'autres, des capteurs de flux (c'est-à-dire mesurant l'intégrale du champ passant à travers une surface). Le tableau p. 9 donne une liste des principaux types de capteurs utilisés.

Il est toujours difficile de comparer des capteurs magnétiques, dans la mesure où chacun possède des avantages particuliers. Par exemple, les capteurs à effet Hall ne sont pas très sensibles, mais présentent l'intérêt d'être absolus et linéaires sur une très grande plage de champ : ils sont donc incontournables dans les applications qui mesurent de fortes valeurs de champs. Un deuxième aspect déterminant est l'extension spatiale du champ magnétique à mesurer. Si elle est grande, comme pour l'imagerie terrestre, il faut utiliser des capteurs de

flux qui sont beaucoup plus sensibles que les capteurs de champ. Si, au contraire, l'extension spatiale devient petite, il faut utiliser des capteurs de champ. C'est pour cette raison que les capteurs à magnéto-résistance géante (GMR), issus de l'électronique de *spin*, se sont implantés dans les têtes de lecture à la place des bobines inductives : ils peuvent être miniaturisés à des tailles de quelques dizaines de microns et intégrés à des systèmes CMOS contenant une électronique de traitement de signal. Enfin, la fréquence du champ à détecter est aussi importante : à très haute fréquence, les capteurs inductifs (bobines) deviennent vraiment plus performants, car ils ont une sensibilité proportionnelle à la dérivée du flux et qui croît donc comme la fréquence.

Boussoles et mesure du champ terrestre

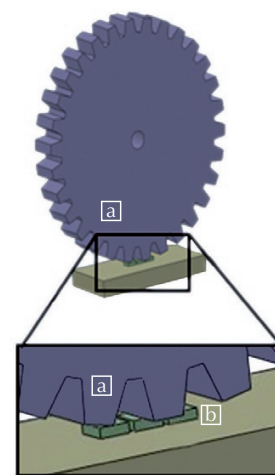
La boussole mécanique, inventée en Chine il y a 4500 ans, est le premier capteur magnétique utilisé par l'homme. Basée sur l'orientation d'une aiguille dans le champ magnétique terrestre, elle est de moins en moins utilisée de nos jours, surtout depuis la généralisation des systèmes GPS basés sur le positionnement par des références spatiales satellitaires. La boussole donne une mesure de la direction du champ magnétique et non de son intensité.

Les boussoles actuelles (électroniques) se trouvent associées à un GPS, ce qui permet d'orienter les cartes du GPS dans la bonne position dans le cas d'un système embarqué dans un véhicule, par exemple. Le contrôle du positionnement dans l'espace, en se servant du champ magnétique terrestre comme axe de référence, se développe aussi pour les applications de robotique, de jeux et d'enregistrement de mouvement (tel le stylo numérique). Une boussole électronique contient maintenant deux ou trois capteurs magnétiques axiaux (sensibles à une direction du champ) couplés à des mesures d'inclinaison et parfois à des

accéléromètres. Les principales technologies utilisées sont l'effet Hall, les microfluxgates et l'effet d'impédance magnétique géante (GMI) qui n'est pas un effet d'électronique de *spin*, mais qui utilise la très grande variation de l'absorption radiofréquence de certains matériaux magnétiques en fonction de leur configuration magnétique statique.

Capteurs de position et d'angle

Le principe du codage de position ou d'angle est d'avoir un cylindre ou une roue présentant des pôles magnétiques alternés dont le passage va être détecté par un capteur magnétique. Cela peut être réalisé avec des aimants inversés ou avec des roues magnétiques dentées (fig. 1).



1. Principe de codage angulaire. Une roue dentée (a) passe devant une barrette de capteurs (b). La position exacte de l'angle est obtenue par interpolation à partir du signal détecté sur les différents capteurs. La mesure est sans contact, et donc sans usure.

>>>

	Type	Fréquence (Hz)	Amplitude du champ (Tesla)	Sensibilité	Type de matériau	Détectivité ^(a)	Applications
Capteurs de champ	Capteurs à effet Hall	DC – 10 ⁵	10 ⁻⁵ – 1	B axial	Film mince	100 nT/√Hz	Contrôle de moteur, mesure de courant, capteurs de position, champs forts
	Magnétorésistance anisotrope (AMR)	DC – 10 ⁷	10 ⁻⁹ – 10 ⁻³	H axial	Film mince	1 nT/√Hz	Capteurs de courant, boussoles
	Magnétorésistance géante (GMR)	DC – 10 ⁸	10 ⁻⁹ – 10 ⁻³	H axial	Film mince	0,1 nT/√Hz ^(c)	Têtes de lecture, boussoles, capteurs de courant
	Magnétorésistance tunnel (TMR)	DC – 10 ⁸	10 ⁻⁹ – 10 ⁻³	H axial	Film mince	0,1 nT/√Hz ^(c)	Têtes de lecture
	Magnéto-impédance géante (GMI)	DC – 10 ⁴	10 ⁻⁹ – 10 ⁻³	H axial	Massif	1 nT/√Hz	Boussoles
	Magnéto-optique (MO)	DC – 10 ⁸	10 ⁻⁵ – 10 ²	M tri-axe	Discret	1 pT/√Hz	Imagerie
	Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)	DC – 10 ²	10 ⁻¹⁰ – 10	H scalaire	Massif	1 nT/√Hz	Référence de champ, IRM
Capteurs de flux	Bobines à air	10 ⁻³ – 10 ⁹	10 ⁻¹⁰ – 10 ²	dΦ/dt axial	Massif	1 pT/√Hz ^(b)	Antennes, IRM haut champ, courants AC
	Fluxgates	DC – 10 ³	10 ⁻¹⁰ – 10 ⁻³	H axial	Massif	10 pT/√Hz	Magnétométrie terrestre
	SQUID (Bas Tc)	DC – 10 ⁹	10 ⁻¹⁵ – 10 ⁻²	Φ axial	Film mince	2 fT/√Hz	MEG, IRM très bas champ
	SQUID (Haut Tc)	DC – 10 ⁴	10 ⁻¹⁵ – 10 ⁻²	Φ axial	Film mince	30 fT/√Hz	Imagerie
	Capteurs mixtes	DC – 10 ⁹	10 ⁻¹⁵ – 10 ⁻⁶	Φ axial	Film mince	< 3 fT/√Hz ^(c)	MCG, MEG, IRM très bas champ
	Magnétomètres atomiques	DC – 10 ²	10 ⁻¹⁵ – 10 ⁻⁹	~ Φ	Massif	3 fT/√Hz	MCG, MEG, IRM très bas champ

Vue d'ensemble des différents types de capteurs magnétiques, leur détectivité et quelques applications clefs.

(a) La détectivité est définie comme le niveau de champ magnétique pour lequel le rapport signal sur bruit est égal à 1, pour une bande de fréquence de mesure de 1 Hz. Le bruit est donné à 1 KHz et, dans le cas de capteurs de flux, pour une surface de 1 cm². Les valeurs données correspondent à ce qu'il est possible de réaliser de façon reproductible. 1 nT = 10⁻⁹ T ; 1 pT = 10⁻¹² T ; 1 fT = 10⁻¹⁵ T. Le facteur 1/√Hz dans la détectivité vient de ce que la puissance de bruit thermique (bruit blanc) est proportionnelle à la bande de fréquence de mesure ; le bruit lui-même et le champ de détection équivalent au bruit augmentent donc comme la racine carrée de cette largeur de bande.

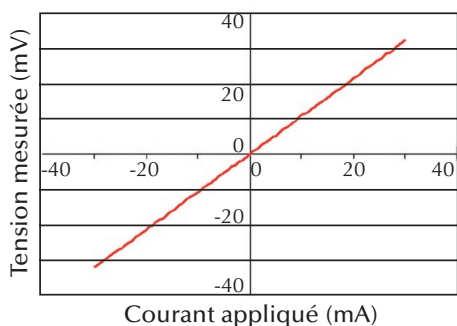
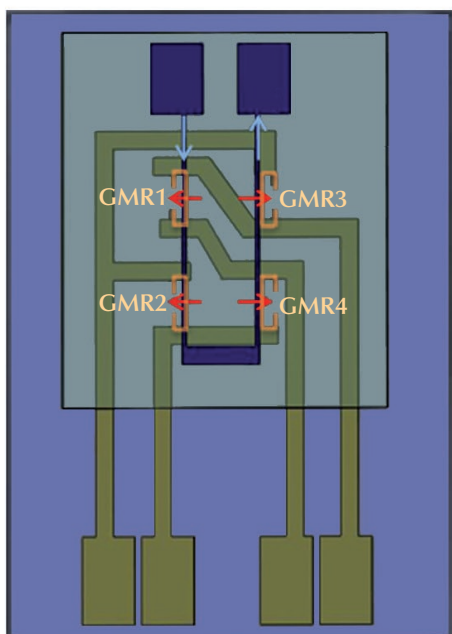
(b) La détectivité d'une bobine à air croît avec la fréquence : à 1 MHz sa détectivité devient meilleure que 1 fT/√Hz.

(c) Les GMRs, les TMRs et les capteurs mixtes présentent un bruit en 1/f à basse fréquence, qui limite leurs performances.

Fluxgate : magnétomètre constitué d'un cœur magnétique doux entouré d'une bobine excitatrice, qui permet de décrire un cycle d'hystérésis. La présence d'un champ magnétique extérieur déplace le cycle et est ainsi détectée. - **IRM** : Imagerie par résonance magnétique - **MCG** : Magnéto-cardiographie - **MEG** : Magnéto-encéphalographie - **SQUID** : Superconducting Quantum Interference Device - **Tc** : température critique - **TMR** : Magnétorésistance à effet tunnel.

Références

- 1 • www.NVE.com ; www.asi-sensor.com ; www.infineon.com ; www.sensitec.com .
- 2 • F. Hankard *et al.*, "Magnetic field microscopy of rock samples using a giant magnetoresistance-based scanning magnetometer", *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **10** (2009) Q10Y06.
- 3 • M. Pannetier, C. Fermon, G. Le Goff, J. Simola, E. Kerr, "Femtotesla magnetic field measurement with magnetoresistive sensors", *Science*, **304** (2004) 1648-1650.
M. Pannetier, C. Fermon, "Device for sensing RF fields", PCT/EP 0301517 (01/2003).
M. Pannetier, C. Fermon, J. Simola, "Device for sensing a magnetic field", PCT/EP 0301518 (01/2003).



2. Schéma d'un capteur de courant en pont pour la mesure de faibles courants (en haut) et réponse d'un tel élément (en bas). Sur la figure du haut, la ligne où passe le courant (en bleu foncé) est superposée à un pont de capteurs GMR (GMR 1, 2, 3, 4, représentées en orange). Lorsque le courant (flèches bleu clair) traverse la ligne, le champ magnétique local (flèches rouges) modifie la réponse en tension des quatre GMRs, avec un effet inverse sur les GMRs de gauche et celles de droite.

>>>

Lors du mouvement, le passage à zéro (renversement de la composante du champ magnétique suivant une direction donnée) permet de localiser la position physique du cran. Une roue, contenant par exemple 180 crans, permet d'obtenir avec un seul capteur magnétique une résolution de 2°. En utilisant plusieurs capteurs, il est possible d'augmenter fortement la résolution par interpolation.

La magnétorésistance géante permet d'avoir une sensibilité en champ faible meilleure d'au moins un ordre de grandeur que celle des capteurs à effet Hall. Pour cette raison, la détection d'un passage en champ nul peut être particulièrement précise avec des capteurs de type GMR. Il existe un certain nombre de produits commerciaux [1] présentant des résolutions angulaires pouvant atteindre 0,001° avec une barrette de 5 capteurs.

Les codeurs linéaires fonctionnent sur le même principe : une barrette magnétique est alternativement aimantée et un réseau de capteurs fixé à l'élément mobile compte le passage des alternances. Un positionnement de 1 µm est possible avec cette technologie.

Les applications principales sont dans l'automobile et dans l'équipement pour la mesure de vitesse, la mesure de l'angle de rotation de moteurs ou d'éléments tournants, et le positionnement.

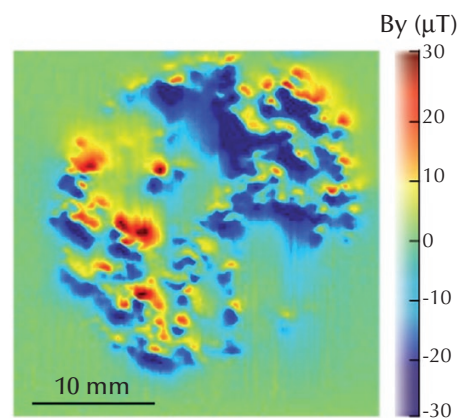
Capteurs de courant

Une autre application essentielle des capteurs magnétiques est la mesure de courants sans contact. Un courant circulant dans un conducteur produit un champ magnétique orthoradial, le champ d'Oersted, qui peut être détecté sans contact, assurant ainsi

une isolation galvanique entre la mesure et le circuit. Ce principe est utilisé dans des compteurs électriques ou dans des systèmes industriels nécessitant une isolation galvanique. Pour donner un ordre de grandeur, un courant de 1 ampère à 1 mm de distance crée un champ de 6.10^{-4} Tesla, c'est-à-dire 20 fois le champ terrestre.

Par exemple, la mesure de la consommation électrique des domiciles est réalisée par des capteurs de courant sans contacts. Dans ce cas, les courants à mesurer sont forts et la linéarité est très importante. Pour cette raison, on utilise des capteurs à effet Hall relativement optimisés.

La technologie de couches minces utilisée pour la fabrication d'éléments GMR permet d'intégrer un grand nombre de capteurs sur une petite surface de composants. Il est ainsi possible de développer des capteurs intégrés à base de magnétorésistance géante permettant de mesurer un courant faible sans contact, avec une isolation galvanique importante. À titre d'exemple, nous développons dans notre laboratoire un capteur de courant à huit voies contenant chacune quatre GMRs montées en pont. On est ainsi insensible aux dérives de température ou de champ extérieur. La figure 2 montre le schéma d'un pont et un exemple de réponse. Lorsqu'un courant circule dans la ligne placée au-dessus des GMRs, un champ magnétique planaire est créé au niveau de ces dernières, proportionnellement au courant. La forme en U de la ligne permet d'avoir deux GMRs montées en réaction inverse et donc de réaliser un pont complet avec un maximum de sensibilité. La difficulté de ces montages est d'avoir une



3. Cartographie du champ magnétique généré par une roche (norite) de Norvège (d'après [2]). (a) Photographie, montrant des zones sombres (pyroxène et magnétite) et claires (feldspath). (b) Cartographie magnétique de la surface photographiée, présentant la composante horizontale B_y de l'aimantation rémanente naturelle. Le code couleur donne l'aimantation locale en valeurs positives et négatives de B_y . On notera le bon accord entre les deux images : la zone non magnétique en bas à droite de (b) correspond à une zone claire de (a).

isolation galvanique suffisante entre lignes de courant et capteurs ; ainsi, 1500 V sont requis pour les applications automobiles.

Imagerie magnétique et contrôle non destructif

L'imagerie magnétique se fait actuellement à toutes les tailles. Grâce à des "fluxgates" ou des SQUIDs, des imageries terrestres ou spatiales sont réalisées. À l'autre extrême, le microscope à force magnétique permet d'imager le magnétisme aux échelles nanométriques. Grâce à leur sensibilité et à leur taille, les capteurs à base de GMR peuvent être exploités pour la cartographie de champ magnétique sur des surfaces avec des résolutions spatiales de quelques microns.

Pour des champs magnétiques statiques, un déplacement du capteur à proximité de la surface à étudier donnera des informations sur des variations de champ, avec une résolution sur celui-ci de l'ordre de 10 nT et une résolution spatiale de quelques microns. Ce type de dispositif est développé pour l'étude du magnétisme de petits objets texturés, comme des micrométéorites. La figure 3 montre une image d'une surface de roche contenant de petites inclusions magnétiques.

L'imagerie de défauts par courants de Foucault est aussi largement développée pour le contrôle non destructif (CND). Une boucle d'excitation radiofréquence crée des courants de Foucault dans l'objet métallique à étudier, et une image du champ magnétique rayonné à cette fréquence permet de remonter aux lignes de courant circulant dans l'objet. La présence d'un défaut (dislocation, trou) se traduit par une déformation des lignes de

courant. De petites bobines ont longtemps été utilisées pour cette cartographie, et les capteurs GMRs ont permis d'augmenter nettement la résolution spatiale et la sensibilité à de petits défauts.

Capteurs de champ ultrasensibles

Une application originale de la magnétorésistance est la mise au point de capteurs, appelés capteurs mixtes [3], permettant d'atteindre un niveau de sensibilité de l'ordre du fT/\sqrt{Hz} ($10^{-15}T/\sqrt{Hz}$), comparable aux meilleurs capteurs magnétiques existants, les SQUIDs. Ces capteurs mixtes sont basés sur l'association d'une boucle supraconductrice, agissant comme un transformateur flux-champ, et de capteurs GMRs qui permettent de mesurer un champ local amplifié. La figure 4 montre une vue de ce type de capteur, avec deux GMRs montées en demi-pont.

Dans la boucle supraconductrice (en rouge), un champ faible sur une large surface est transformé en un champ intense sur une toute petite surface. Les capteurs magnétorésistifs étant des capteurs de champ, leur sensibilité est indépendante de leur taille. Dans le cas d'une boucle supraconductrice à haute température critique, des gains de l'ordre de 1000 sont obtenus. En associant cette boucle avec des capteurs GMRs qui sont aussi à basse température, nous arrivons à des détectivités de $1 fT/\sqrt{Hz}$ à 4 K et $5 fT/\sqrt{Hz}$ à 77 K au-delà de 10 kHz. À basse fréquence, un bruit de résistance en $1/f$ apparaît dans les capteurs GMR en raison de leur petite taille, qui limite la sensibilité à environ $100 fT/\sqrt{Hz}$ à 1 Hz.

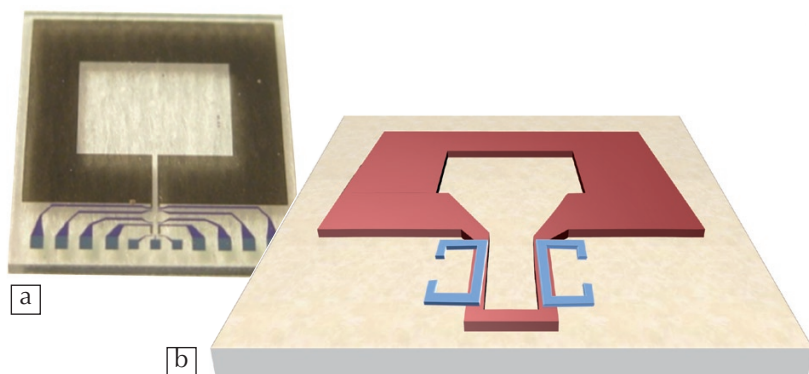
L'application principale de ces capteurs mixtes est la magnéto-encéphalographie (MEG), qui permet de remonter à l'imagerie des courants neuronaux circulant dans le cerveau à travers le champ rayonné par ces courants.

La figure 5 montre un signal de magnéto-cardiographie (signal magnétique cardiaque) enregistré à l'aide d'un capteur mixte à 77 K.

Les futurs développements de ces systèmes seront d'une part l'utilisation des capteurs de type TMR qui permettront un gain de sensibilité, et d'autre part l'emploi de techniques de modulation du courant supraconducteur pour éliminer la contribution du bruit basse fréquence des GMRs.

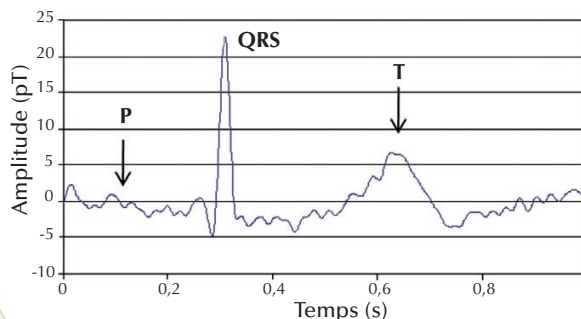
Conclusion

Les capteurs magnétiques sont donc un domaine où l'électronique de *spin* a permis d'apporter une nouvelle richesse, en amenant la possibilité d'une grande sensibilité sur une petite échelle spatiale. Si on exclut le domaine des têtes de lectures où maintenant seules des magnétorésistances géantes ou tunnel sont utilisées (voir l'article de J.P. Nozières, p. 12), la production en grande série de capteurs GMR vient seulement de commencer. Le paramètre clef est l'intégration totale des éléments sensibles dans le procédé de fabrication CMOS. Maintenant, la plupart des entreprises dominant le marché se sont lancées dans ce développement, et il est probable que dans 4 à 5 ans les capteurs magnétiques basés sur l'électronique de *spin* auront une place prépondérante dans cet ensemble, qui représente plus de 4 milliards d'unités par an. ■



4. Capteur mixte.

- (a) Photographie d'un capteur mixte.
- (b) Schéma d'un capteur mixte contenant une boucle supraconductrice d'YBCO (en rouge) et un demi-pont de deux magnétorésistances géantes (en bleu). Les contacts ne sont pas représentés.



5. Signal de magnéto-cardiographie mesuré à l'aide d'un capteur mixte à 77 K. On distingue les ondes P et T, ainsi que le complexe QRS, qui correspondent respectivement à la contraction des oreillettes, à la relaxation des ventricules et à la contraction des ventricules. Ces pics sont aussi détectés sur des électrocardiogrammes. Dans le cas de la magnéto-cardiographie, la technique est sans contact et ne nécessite pas la pose d'électrodes. Elle permet aussi de faire de l'imagerie du signal cardiaque, en utilisant un réseau de capteurs.