

Quelques technologies de capteurs de champ magnétique et de mesure de courant

Les capteurs de champ magnétique ont de nombreuses applications, nous présentons ici quelques technologies de ces capteurs dont nous comparons les mérites du point de vue d'une application particulière : la mesure de courant.

1. Les transformateurs de courant

Un transformateur de courant est constitué d'un enroulement primaire comportant N_1 spires parcouru par le courant i_{mes} à mesurer et d'un enroulement secondaire comportant un nombre de spires élevé N_2 terminé par une charge R (figure 1 (a)). Son principe repose sur le théorème d'Ampère et sur la loi de Lenz : le premier veut que le courant parcourant le conducteur primaire crée une induction qui, pour peu que son flux varie, engendre, en vertu de la seconde, une force électromotrice (*f.e.m.*) variable aux bornes du secondaire. Il en résulte aux bornes de la charge R une tension V_s proportionnelle à i_{mes} , telle que la sensibilité du transformateur (en V/A) vérifie la relation :

$$\frac{V_s}{i_{mes}} = R \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{Equation 1})$$

En pratique pour les courants supérieurs à 50 A le fil parcouru par le courant à mesurer ne passe généralement qu'une seule fois autour du circuit magnétique, si bien que N_1 vaut 1.

Généralement un circuit magnétique est utilisé de manière à concentrer le flux, il a également pour intérêt, lorsqu'il est de forme torique, de rendre le capteur peu sensible aux perturbations extérieures, point qui peut encore être amélioré par l'ajout d'un blindage (comme c'est le cas sur les transformateurs d'instrumentation).

Il existe des transformateurs de courant que l'on peut refermer sur conducteur primaire grâce à un noyau laminé qui peut être ouvert par pression sur un clapet.

Un transformateur de courant n'étant sensible qu'à des variations de flux suscitées par des courants variables, il **ne permet pas la mesure des courants continus**. Si, pour les raisons que nous venons d'évoquer, la fréquence de coupure basse d'un transformateur ne descend pas en deçà de quelques dizaines de Hz, en revanche sa fréquence de coupure haute peut atteindre quelques 100 MHz. Des précisions de mesure de l'ordre de 0,1 à 0,5 % sont des grandeurs atteignables ainsi que des capacités en courant de 20 kA.

Ce qui fait l'intérêt les transformateurs de courant c'est notamment **leur simplicité** et **leur robustesse**, le fait de **ne pas nécessiter l'apport d'une alimentation externe**, leur **haute isolation galvanique** et leur **faible coût**.

2. Les bobines de Rogowski

Les performances d'un transformateur de courant sont souvent limitées par les caractéristiques de son noyau magnétique (rémanence, saturation, non linéarité). A contrario, les bobines de Rogowski consistent en un bobinage réalisé autour d'un noyau amagnétique qui encercle le conducteur parcouru par le courant à mesurer (figure 1 (b)). Leur principe repose sur la mutuelle inductance existant entre le conducteur primaire et le

conducteur secondaire. Bien entendu, compte tenu de la loi de Lenz, elles ne permettent, elles aussi, que la mesure de courants variables. En l'absence de noyau magnétique une difficulté est d'obtenir une mesure ayant une bonne sensibilité, une autre est de s'immuniser des perturbations des champs extérieurs. Pour pallier le premier problème on réalise des bobinages comportant des centaines, voire des milliers de spires. Pour s'affranchir du second, les extrémités du bobinage sont connectées via une spire supplémentaire qui parcourt le périmètre moyen du noyau et compense l'effet de certains champs parasites. Par ailleurs, en vertu du théorème d'Ampère, la mesure de courant est insensible à la position du conducteur primaire et à la forme du capteur encerclant. Qui plus est, celui-ci, grâce à son noyau en plastique souple, permet de réaliser des capteurs ouvrants. Toutefois **le mécanisme d'ouverture peut provoquer une discontinuité dans le bobinage et être source d'erreurs de mesure s'élevant au maximum à 1 ou 2 % en fonction de la position du conducteur primaire par rapport à l'ouverture du capteur. Des imprécisions sont également possibles compte-tenu des tolérances de fabrication des bobinages qui comportent de très nombreuses spires.** On notera qu'il existe des capteurs de Rogowski en technologie planaire pour lesquels les bobinages sont maîtrisés.

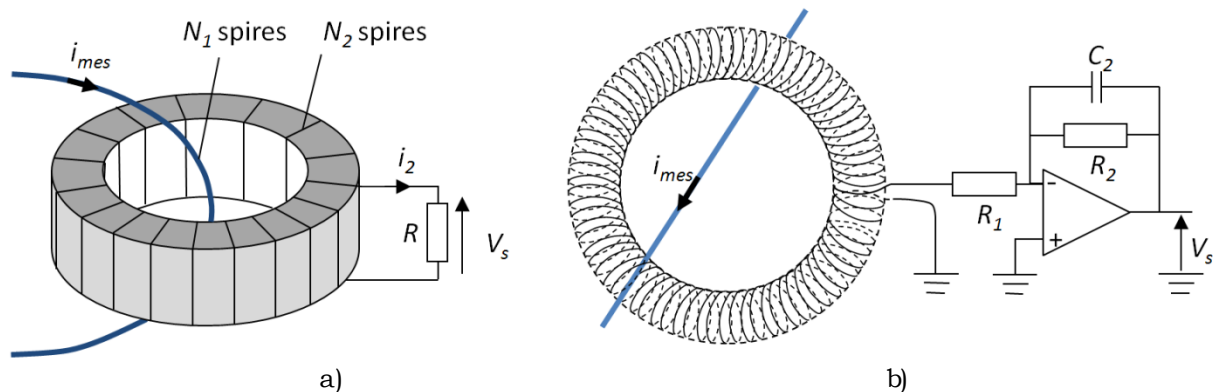


Figure 1. Schémas de principe d'un transformateur de courant (a), et d'une bobine de Rogowski (b), à laquelle est adjoint un intégrateur destiné à compenser l'opération de dérivée faite par le capteur inductif fonctionnant selon la loi de Lenz.

3. Les sondes de Hall

La plupart des capteurs magnétiques qui sont produits utilisent l'effet Hall. Celui-ci est présent dans les conducteurs mais c'est dans les semi-conducteurs qu'il est le plus prononcé, et ce en raison du fait qu'il est inversement proportionnel à la densité de porteurs de charges. Les capteurs de Hall sont donc réalisés en semi-conducteurs, dans des échantillons longs dans lesquels on injecte un courant. En présence d'un champ magnétique (induit par le courant à mesurer), les porteurs de charges subissent la force de Lorentz et sont déviés au cours d'un régime transitoire, mais l'apparition de charges surfaciques au sommet et à la base de l'échantillon vient créer un champ électrique et engendrer une force s'opposant exactement à celle de Lorentz. La différence de potentiel, appelée tension de Hall, qui apparaît ainsi entre les faces de l'échantillon se trouve être proportionnelle au courant injecté et au champ magnétique, qu'elle permet donc de mesurer.

De nombreux capteurs de courant continu utilisent des éléments de Hall montés dans l'entrefer d'un noyau magnétique (figure 2 (a)), lequel a pour principaux mérites d'accroître la sensibilité de la mesure, de le protéger de l'influence des champs

extérieurs et de diminuer celle de la position du conducteur parcouru par le courant à mesurer. Cependant, en raison de l'entrefer du noyau, les capteurs ne sont pas totalement affranchis de ces influences indésirables. En outre, **les capteurs de Hall pâtissent des sérieux offsets qui peuvent être causés par la rémanence du noyau magnétique**, et seuls quelques composants disposent d'un circuit AC de démagnétisation leur permettant de se réinitialiser lorsqu'ils ont été exposés à un fort courant DC ou champ extérieur.

Afin d'obtenir de bonnes caractéristiques de linéarité, mais aussi de les affranchir des dérives en température inhérentes aux matériaux semi-conducteurs, les capteurs de Hall sont souvent associés à une boucle de rétroaction (figure 2 (b)). Cette dernière annule le champ magnétique présent dans le noyau grâce à un bobinage de compensation. Ces capteurs peuvent ainsi offrir des erreurs de l'ordre de 0,02 % et des coefficients de sensibilité à la température de l'ordre de 50 ppm K⁻¹. Cependant leur principal point faible reste la stabilité limitée au point zéro liée à l'offset, la dérive ainsi engendrée pour un capteur 50 A atteint typiquement 600 mA dans l'intervalle 0-70°, ce qui est 20 fois inférieur aux performances des capteurs fluxgates.

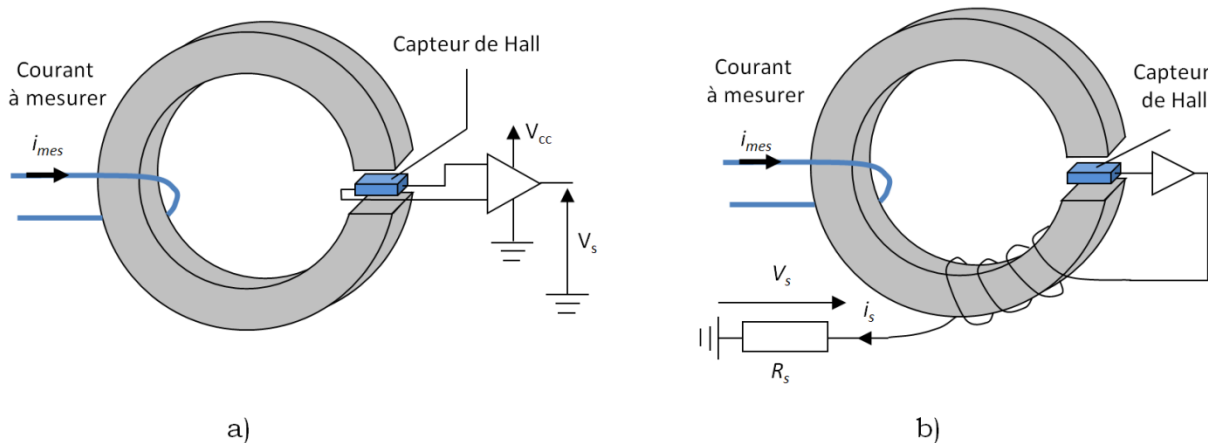


Figure 2. Schémas de principe d'un capteur de Hall opérant en boucle ouverte (a) et en boucle fermée (b).

4. Les magnétorésistances

Il existe différentes sortes de magnétorésistances : les magnétorésistances anisotropes (AMR), les magnétorésistances géantes (GMR) et les magnétorésistances à effet tunnel (TMR), pour ne citer que les principales. Ce qui a poussé au développement de ces technologies c'est d'abord le besoin de miniaturisation des têtes de lecture des disques durs, où les AMR ont d'abord remplacé les bobines, avant d'être supplantées par les GMR, elles-mêmes supplantées à leur tour par les TMR. Mais les magnétorésistances ont bien d'autres applications, comme par exemple la mesure de courant.

Les capteurs AMR sont constitués d'un matériau ferromagnétique tel que le permalloy¹ (alliage composé à 80% de fer et à 20% de Nickel) dont la résistance dépend

¹ Le permalloy est le matériau le plus couramment utilisé dans les AMR en raison de sa magnétorésistance relativement élevée (variations < 4%) et parce que ses caractéristiques sont compatibles avec les techniques de fabrication employées pour réaliser des circuits intégrés en silicium.

significativement de l'angle entre l'aimantation et la direction du courant qui y est injecté, ce qui signifie qu'à l'instar des capteurs de Hall les AMR nécessitent une alimentation en courant. Sous l'influence d'un champ magnétique (celui qu'il s'agit de mesurer) supposé perpendiculaire à l'axe de facile aimantation, celle-ci subit une rotation dont découle une variation de résistance, de laquelle, par mesure de la tension aux bornes de l'échantillon, on peut déduire la valeur du champ. La résistance R varie comme le carré du cosinus de l'angle entre l'aimantation et le courant de commande. Cette caractéristique présente l'inconvénient de n'être pas linéaire et de passer par un maximum à champ nul. Cependant, il est possible d'obtenir une réponse qui soit linéaire à champ nul grâce à une **structure dite de barberpole** qui permet de forcer l'orientation du courant à 45° de l'aimantation. Cependant, même dans ce cas de figure la linéarité des capteurs n'est pas très bonne, c'est pourquoi comme pour les sondes de Hall **un circuit de compensation (boucle fermée) est souvent mis en œuvre.**

La topologie de capteur la plus répandue est le pont de Wheatstone qui permet d'accéder à la variation de champ engendrée par le courant à mesurer, tout en s'affranchissant des champs homogènes susceptibles d'être induits par des conducteurs distants. La structure en pont a également pour effet d'**affranchir la mesure des effets** des variations de magnétorésistance **liés à la température.**

Les AMR offrent une meilleure précision que les capteurs de Hall, mais leur direction de mesure est située dans le plan de la puce ce qui empêche de les placer dans l'entrefer d'un circuit magnétique.

Comme les AMR, les **GMR et TMR** sont des composants dans lesquels on injecte un courant de commande et qui voient leur résistance varier lorsqu'elles sont plongées dans un champ magnétique orienté suivant une direction privilégiée. Leur structure est cependant différente, puisque constituée de multiples couches (nanométriques) de matériaux magnétiques séparées par des couches non magnétiques (conductrices dans un cas, isolantes dans l'autre). La résistance de ces structures dépend de l'orientation de leur aimantation, laquelle tend à tourner sous l'influence d'un champ extérieur, ce qui fait varier la résistance. **Ces composants sont sensibles à la température, et pour s'affranchir de cette dépendance ils sont habituellement montés en ponts de Wheatstone.** Ils offrent des variations de résistance supérieures à celles des AMR.

Les GMR et TMR présentent un bruit en $1/f$ relativement élevé et une fréquence de coupure de 1 MHz ; mais la limitation de précision de mesure qu'engendrent ces caractéristiques de bruit est un paramètre qui concerne plus les applications potentielles des GMR et TMR à la magnétométrie, pour lesquelles elles ne sont pas nécessairement les solutions les plus pertinentes (d'une manière générale les fluxgates ont de bien meilleures caractéristiques de bruit), que les applications à la mesure de courant.

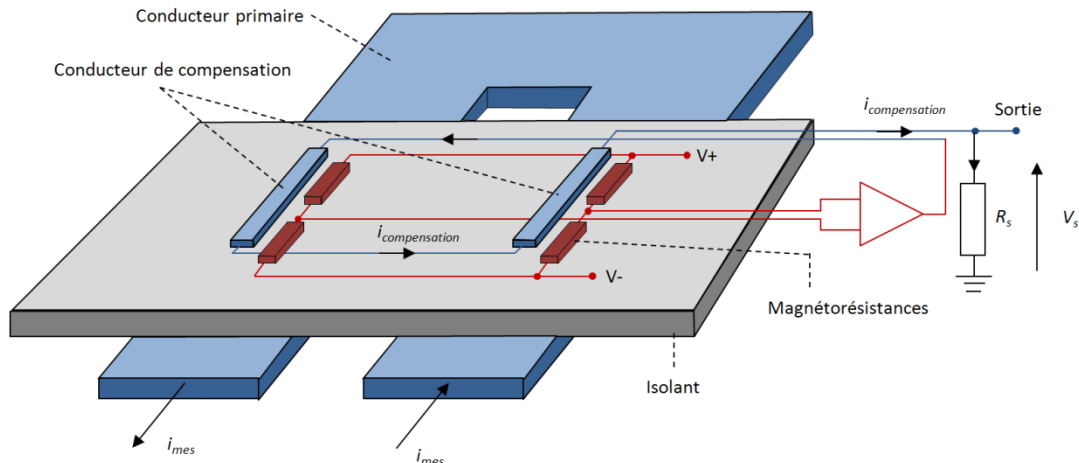


Figure 3. Schémas de principe d'un capteur magnétorésistif monté en pont de Wheatstone et opérant en boucle fermée.

En ce qui concerne cette application à l'instar des AMR, des GMR montées en ponts de Wheatstone et assorties d'un circuit de compensation sont commercialisées. Ce principe est illustré figure 2.3.

5. Les fluxgates

Les capteurs Fluxgates (portes de flux) mesurent à la fois des signaux DC et des signaux AC basse fréquence. Utilisés en tant que capteurs de champ magnétique ils permettent de mesurer des champs d'amplitude allant jusqu'à 1 mT environ, avec une excellente précision (de l'ordre de 100 pT) et une erreur de linéarité de 10 ppm. Leur principe repose sur l'utilisation d'un noyau ferromagnétique doux dont on vient moduler la perméabilité au moyen d'un flux magnétique périodique créé par un bobinage d'excitation. L'intensité du courant induisant le flux d'excitation est choisie suffisamment grande pour amener (périodiquement) l'aimantation du noyau magnétique à saturation. A ce flux se superpose celui du champ que l'on souhaite mesurer (supposé continu ou lentement variable par rapport au premier) et dont l'effet est de dissymétriser la saturation. Le flux total est capté par un second bobinage à la sortie duquel apparaît une tension égale à la dérivée du flux magnétique (loi de Lenz) qui se présente, compte tenu de l'excitation appliquée, sous forme d'impulsions dont le rapport cyclique dépend du champ à mesurer. En pratique c'est via le second harmonique du signal de sortie que se fait la mesure. Afin d'en maximiser la sensibilité le matériau magnétique doit présenter un cycle carré, raison pour laquelle on emploie des matériaux doux. **Ce qui distingue les fluxgates c'est, comme il a été dit, leur précision de mesure. Ils ont aussi l'avantage de permettre des mesures DC et AC jusqu'à environ 1 kHz. Mais, grâce à un fonctionnement à flux nul (boucle fermée) on peut également en faire des capteurs de courant ayant une large dynamique des mesures (jusqu'à 1000 A)** (figure 2.4).

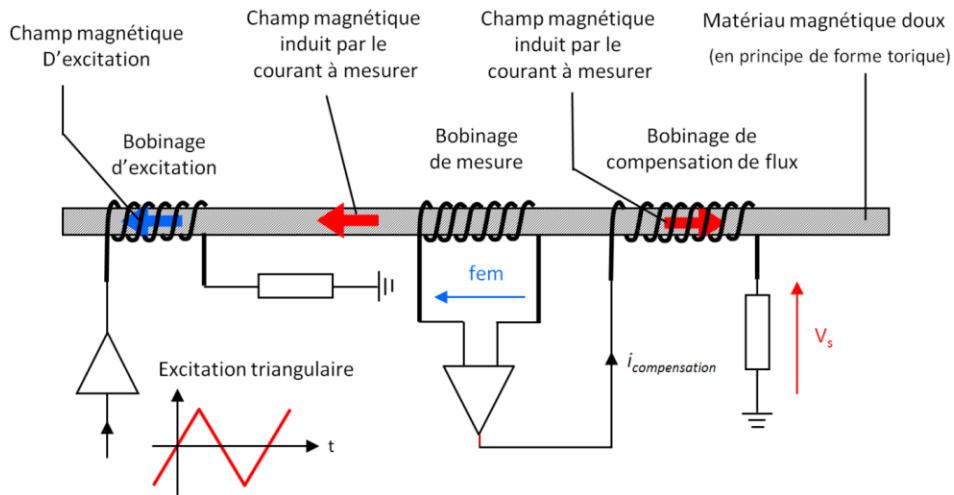


Figure 4. Schémas de principe d'un capteur fluxgate opérant à flux nul (boucle fermée).

6. Les autres composants

Nous avons présenté quelques technologies de capteurs de champ magnétique utilisés comme capteurs de courant. Bien d'autres capteurs peuvent être appliqués à ce type de mesure, comme par exemple les capteurs à fibres optique (FOCS), les magnétoimpédances géantes, ou encore les SQUIDS (Superconducting Quantum Interference Devices).