

---

## 1.1. CAPTEURS DE CHAMP MAGNÉTIQUE

---

### 1.1.1. Champ magnétique

Un conducteur linéaire transportant un courant d'intensité  $I$  Ampères induit à une distance  $r$  un champ magnétique  $B$  donné par :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \text{ Tesla,}$$

où  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Henry/mètre, est la perméabilité du vide.

Un conducteur linéaire de longueur  $l$  parcouru par un courant  $I$  et soumis à un champ magnétique  $B$  subit une force  $F$  telle que :

$$F = BIl \cos \alpha \text{ Newton,}$$

où  $\alpha$  est l'angle que forme le conducteur et la direction du champ  $B$ .

Une simple spire conductrice de diamètre  $d$  induit un champ axial défini par :

$$B = \frac{\mu_0 I d^2}{\sqrt{(d^2 + 4r^2)^3}} \text{ Tesla}$$

où  $r$  est la distance d'éloignement du centre de la spire.

Le champ magnétique au centre d'un solénoïde de longueur  $l$  et constitué de  $N$  spires est donné par :

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} \text{ Tesla.}$$

Le potentiel électrique induit par une bobine est donné par la loi de Faraday :

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt}$$

avec  $N$  : nombre de spires de la bobine,

$\Phi$  : le flux magnétique (Weber),  
 $A$  : la surface de la section droite de la bobine.

L'interaction entre un champ magnétique et la matière est décrite par les relations suivantes :

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H = \mu_0 H + J = \mu_0 (H + M)$$

où :  $\mu_r$  est la perméabilité relative du milieu ( $\mu_r = 1$  pour le vide),  
 $M$  le coefficient de magnétisation.

### 1.1.2. Matériaux magnétiques

Les matériaux ferromagnétiques contiennent des domaines pour lesquels les atomes ont la même direction de magnétisation. Cette propriété entraîne une grande perméabilité. La magnétisation est limitée par le champ de saturation  $B_s$ . Un matériau ferromagnétique perd ses propriétés magnétiques s'il est porté à une température égale ou supérieure à la température de Curie.

Dans de nombreux éléments monocristallins, cristallins, amorphes, alliages et composites, une faible coercivité et une haute perméabilité peuvent être atteintes. Ces matériaux sont dénommés matériaux magnétiques doux. Les ferrites douces ont une faible conductivité électrique, ce qui les rend bien adaptées aux applications hautes fréquences, les pertes de puissance par courants de Foucault étant faibles.

Un matériau ferromagnétique placé est attiré vers les champs forts par une force proportionnelle au produit du champ  $B$  par son gradient.

Les aimants permanents sont utilisés pour produire un champ magnétique à leur surface. Une forte coercivité et une haute rémanence de magnétisation sont requises pour ces matériaux magnétiques durs. Les aimants frittés sont principalement des alliages samarium-cobalt (SmCo) ( $H_c \cong 1.2$  MA/m,  $B_r \cong 0.1$  T,  $|BH|_{\max} \cong 250$  kJ/m<sup>3</sup>,  $T_{\max} \cong 300$  °C) et néodyme-fer-bore (NdFeB) ( $H_c \cong 1.0$  MA/m,  $B_r \cong 1.3$  T,  $|BH|_{\max} \cong 350$  kJ/m<sup>3</sup>,  $T_{\max} \cong 180$  °C). Les ferrites dures sont peu onéreuses mais moins fortes que NdFeB.

Dans le domaine des capteurs de grandeurs mécaniques et dans les systèmes actionneurs, les propriétés magnétostrictives des matériaux sont largement utilisées. Les contraintes appliquées modifient la perméabilité et inversement l'application d'un champ magnétique modifie l'état magnétique du matériau, sa forme et ses constants élastiques via le mécanisme de magnétostriction. Les fils et rubans amorphes sont particulièrement sensibles (large saturation magnétisation  $\lambda_s$  et faible champ de saturation  $H_s$ ), par exemple Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub> ( $\lambda_s = +70 \cdot 10^{-6}$ ,  $H_s = 10$  kA/m). La magnétostriction est également utilisée dans les actionneurs (par exemple pour briser la glace en surface de structures par impacts mécaniques ou dans les générateurs d'ultrasons).

## Capteurs de champs magnétiques

Les capteurs les plus courants sont les capteurs à effet Hall. Une technologie similaire est utilisée dans les magnétorésistances à semiconducteurs. Les autres types de capteurs sont les capteurs de type AMR et fluxgates. D'autres capteurs sont plus rarement utilisés dans les applications industrielles : les SQUID supraconducteurs extrêmement sensibles et les capteurs résonnants présentant une excellente stabilité absolue.

### 1.1.3. Capteurs à effet Hall

Lorsqu'un conducteur transportant un courant électrique est placé dans un champ magnétique, la distribution de potentiel dans le conducteur est modifiée. La tension mesurée dépend de l'orientation relative du courant et du champ magnétique et également de la direction suivant laquelle la mesure de tension est effectuée.

Deux cas de base sont particulièrement importants :

1. L'effet Hall. Le champ magnétique appliqué est orienté suivant l'axe  $z$  perpendiculaires à la direction  $x$  du courant. La tension de Hall est mesurée suivant l'axe  $y$  perpendiculaire aux axes  $x$  et  $z$ .

2. L'effet magnétostrictif transverse (effet Hall planaire). Le champ magnétique appliqué est orienté suivant l'axe  $y$  perpendiculaires à la direction  $x$  du courant. Les variations de tension sont mesurées suivant l'axe  $x$ . Cet effet très faible et peu stable est peu utilisé.

Bien que l'effet Hall existe dans les métaux, les composants usuels sont semi-conducteurs et présentent une sensibilité bien plus élevée. Les capteurs à effet Hall sont utilisés pour mesurer des champs de 1 mT à 1 T dans une gamme de température de  $-100^{\circ}\text{C}$  à  $+100^{\circ}\text{C}$  et une gamme de fréquence du continu à 30 kHz. En association avec des aimants permanents, ces capteurs sont utilisés pour les mesures de position et de vitesse linéaire ou angulaire. Les capteurs à effet Hall sont largement utilisés dans les moteurs à courant continu sans contacts utilisés dans les magnétoscopes, les ventilateurs et moteurs de CD... et la mesure de courants électriques avec l'avantage de garantir une parfaite isolation galvanique entre le circuit mesuré et le circuit de mesure. Les systèmes automobiles actuels de sécurité ou les systèmes de freinage ABS utilisent des capteurs à roues dentées et pour ces capteurs la température ambiante peut atteindre  $180^{\circ}\text{C}$  avec des pointes à  $200^{\circ}\text{C}$  au niveau des jonctions.

Les capteurs intégrés à effet Hall sont robustes, insensibles aux poussières, vapeurs d'huile, bas coûts et compatibles avec les technologies des circuits intégrés (CMOS par exemple). Ils comportent le plus souvent des circuits de mise au biais, de réduction d'offset, de compensation en température d'amplification du signal et de discrimination de niveau. Les plus avancés des capteurs intègrent un traitement numérique du signal et sont programmables.

Quand une longue bande conductrice de courant est placée dans un champ magnétique uniforme, les électrons dans la bande sont affectés par la force magnétique de Lorentz,  $F$  :

$$F = q(v \times B)$$

où  $q$  est la charge élémentaire de l'électron,  $v$  la vitesse des porteurs de charges et  $B$  le champ magnétique.

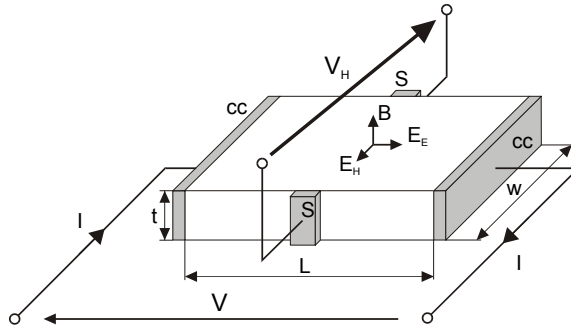


Figure 1.1. Capteur à effet Hall

La force de Lorentz due au champ magnétique est donnée par :

$$F_{mn} = q_n (v_{dn} \times B) = q_n \mu_n (E_e \times B)$$

avec :

$$v_{dn} = \mu_n E_e$$

où  $\mu_n$  est la mobilité des électrons et  $E_e$  le champ électrique.

Les électrons se concentrent vers la face supérieure de la bande conductrice et par voie de conséquence, la concentration en électrons est plus faible sur la face opposée, créant ainsi un champ électrique transverse appelé champ de Hall. Ce champ  $E_H$  agit sur les électrons avec une force :

$$F_{en} = -q_n E_H$$

Pour un électron se déplaçant dans la bande suivant la direction  $x$ , ces deux forces se compensent. En combinant les équations précédentes on obtient :

$$E_H = \mu_n (E_e \times B)$$

Le champ électrique de Hall est perpendiculaire au champ électrique appliqué et au champ magnétique. L'amplitude du champ est également proportionnelle à la mobilité des porteurs. Le champ électrique externe peut être exprimé en terme de densité de courant en introduisant  $J_n$  comme suit :

$$E_H = -\mu_{Hn}(E_e \times B) = -\frac{r_H \mu_n}{q_n \mu_n}(J_n \times B) = -R_H(J \times B)$$

où est introduit le coefficient de Hall  $R_H$ , qui intègre la densité des porteurs de type n :

$$R_H = \frac{r_H}{q_n}$$

Nous disposons ainsi d'un autre critère de choix de matériaux pour réaliser un capteur à effet Hall. Il faudra utiliser un matériau semiconducteur faiblement dopé pour optimiser le coefficient de Hall. Le bon choix est un compromis entre un fort dopage pour optimiser  $J_n$  ( $J_n \times B$  terme) et, à l'inverse, un faible dopage pour optimiser  $R_H$ .

La tension mesurée entre les faces de la bande conductrice est la tension de Hall, elle est donnée par :

$$V_H = \int_{S_1}^{S_2} E_H ds = \mu_{Hn} E_e B w$$

où  $w$  est la largeur de la bande et  $B$  la composante perpendiculaire du champ magnétique.

La densité de courant est :

$$J = \frac{I}{tw}$$

où  $I$  est le courant et  $t$  l'épaisseur de la bande. Ainsi la tension de Hall est donnée par :

$$V_H = \frac{R_H}{t} IB$$

Ainsi une plaque mince (petite valeur de  $t$ ) produit une tension de Hall plus forte qu'une plaque épaisse. Il peu paraître surprenant que la tension de Hall ne dépende ni de la largeur ni de la longueur de la bande conductrice mais, par contre, le courant maximum admissible dépend directement de la section droite de la bande et donc de sa largeur  $w$ . La longueur du capteur n'affecte pas la valeur de la tension de Hall (sous réserve qu'il ne soit pas trop court).

La valeur typique de la tension de Hall dans un capteur standard est de l'ordre de  $V_H \approx 60$  mV dans les conditions suivantes :  $I = 1$  mA,  $B = 0.1$  T,  $n = 10^{22}$  m<sup>-3</sup> et  $t = 10$  μl.