

Etude des capteurs magnétiques

A. Effet Hall.....	3
1. Effet Hall dans un échantillon long.....	3
2. Constructions des capteurs à effet Hall.....	5
3. Imperfections des capteurs à effet Hall.....	6
3.1 Limitation en fréquence.....	7
3.2 Influence de la température.....	8
3.3 Résistance de charge pour une linéarité optimale.....	8
3.4 Composante d'offset en sortie.....	9
3.5 Composante de tension d'origine inductive.....	9
4. Applications.....	10
B. Magnétorésistance.....	12
1. Etude théorique de l'effet magnétorésistif.....	12
2. Magnétorésistance anisotropique (AMR).....	15
2.1 Courant suivant la direction de facile aimantation.....	16
2.2 Courant incliné de 45°.....	16
3. Réalisation des capteur magnétorésistif.....	19
4. Magnétorésistance géante.....	20
4.1 Réalisation des capteurs magnétorésistifs géants.....	21
C. Magnétomètre « fluxgate ».....	22

;

Les principes utilisés pour les capteurs magnétiques sont assez nombreux. Leurs applications sont aussi très différentes, pas seulement en fonction de leur coût mais aussi en fonction de leur plage de mesure ou de leur résolution.

Les capteurs inductifs utilisés pour les têtes de lecture de magnétophone ou de magnétoscope, utilise l'effet inductif. Un bobinage est réalisé autour d'un circuit magnétique qui a pour rôle de canaliser le champ magnétique. Cet effet est utilisé aussi pour des capteurs de position, pour des capteurs de pression ou pour des détecteurs de défaut dans des structure mécanique. Ce principe utilise les courants de Foucault générés dans le matériau. Le parcours de ces courants est modifié en présence de défaut mécanique.

L'effet Hall est assez sensible et linéaire, et ses caractéristiques le destinent particulièrement à de l'instrumentation, par exemple dans des capteurs de courant. Il est utilisé dans cette application pour détecter l'induction magnétique générée par le passage du courant que l'on veut déterminer. Il est aussi utilisé dans des capteurs de position ou des capteurs de vitesse.

Les magnétorésistances sont très sensibles, mais pas très linéaires. Elles sont utilisées dans des capteurs de champ magnétique terrestre ou dans des compas magnétiques. Les têtes de lecture des disques dur utilise ce principe ou un principe de magnétorésistance géante.

Les deux types de magnétomètres suivants sont très sensibles mais assez compliqués à mettre en œuvre. Le magnétomètre « Fluxgate » est utilisé dans des engins spatiaux pour la cartographie en champ magnétique des planètes. Sa précision le destine bien à la prospection géologique. Il est aussi utilisable pour la mesure de courant avec une très bonne précision (quelques ppm).

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques des différents capteurs d'induction envisagés ici.

Procédé de mesure	Plage de mesure (mT)	Résolution (nT)	Bande passante (Hz)	Applications
Effet inductif	10^{-10} à 10^6	Variable	0.1 à 10^7	Champ variable uniquement
Effet Hall	0.1 à $3 \cdot 10^4$	100	0 à 100M	Linéaire
Magnétorésistance anisotropique et géante	10^{-3} à 5	10	0 à 10M	Plus sensible que effet Hall mais moins linéaire
Magnétomètre « Fluxgate »	10^{-4} à 0.5	0.1	0 à 10k	Magnétomètre vectoriel

Les générateurs de Hall se déclinent en capteur magnétorésistif quand la longueur de la plaquette est faible devant sa hauteur. L'effet de magnétorésistance anisotropique exploite l'effet de magnétorésistance sur des couches minces magnétiques qui ont été polarisées magnétiquement dans une direction particulière pendant la formation du cristal. L'effet de magnétorésistance géante exploite la variation de résistance d'un multicouches d'épaisseur très faible.

A. Effet Hall

L'effet Hall fait partie d'un ensemble de phénomènes appelé effet galvanométrique. Les effets galvanométriques s'observent dans un solide qui subit simultanément l'action d'un champ électrique et d'une induction magnétique.

1. Effet Hall dans un échantillon long

On considère que le matériau est long lorsque la longueur l de l'échantillon est grande devant sa hauteur w . L'effet Hall se manifeste aussi dans des échantillons dit courts, mais alors la variation du paramètre électrique observé est une variation de résistance.

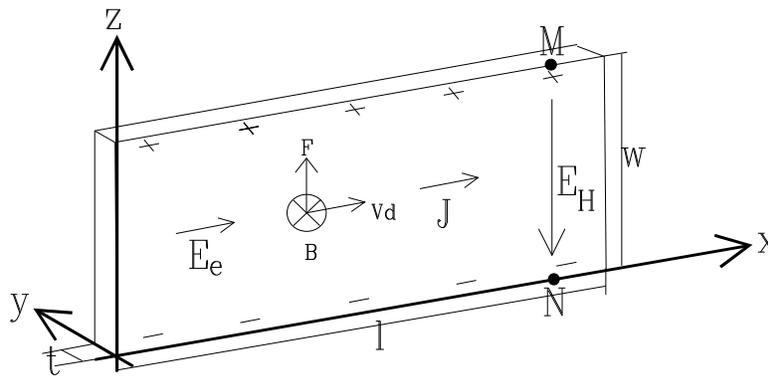


Figure 1: effet Hall dans un échantillon long

L'effet Hall apparaît si le matériau est parcouru par un courant I et s'il est soumis à une induction B . Les directions de l'induction magnétique et du courant sont initialement perpendiculaires.

La densité de courant dans l'échantillon est appelée J , et le champ électrique appliqué (nécessaire à la circulation du courant I) entre les 2 faces de gauche et de droite de l'échantillon, est appelé E_e . Sous l'action de ce champ électrique, il circule un courant et les porteurs sont animés d'une vitesse v_d . La mobilité des porteurs exprime le rapport du champ électrique appliqué à la vitesse des porteurs.

L'effet générateur de Hall apparaît dans tous les matériaux conducteurs. Il suffit qu'il circule un courant à travers celui-ci. Par contre, comme nous allons le montrer, la constante de Hall est inversement proportionnelle au nombre de porteurs ionisés dans le matériau. Un matériau semi-conducteur est donc tout à fait indiqué pour constituer un générateur de Hall sensible. Le semi-conducteur est dopé N ou P. Nous considérons dans la suite le déplacement des électrons et des trous.

Dans toute la suite nous affecterons d'un indice n et p les grandeurs relatives aux électrons et aux trous respectivement.

$$\vec{v}_{dp} = \mu_p \cdot \vec{E}_e$$

$$\vec{v}_{dn} = -\mu_n \cdot \vec{E}_e$$

μ_p et μ_n sont les mobilités des électrons et des trous.

La densité de courant correspondante est :

$$\vec{J}_p = \sigma_p \cdot E = q_p \mu_p \vec{E}_e \quad \vec{J}_n = q_n \mu_n \vec{E}_e$$

avec p et n la densité des trous et des électrons par unité de volume.

Nous allons introduire une hypothèse simplificatrice en considérant que les porteurs se déplacent grâce au champ électrique appliqué E_e , et nous supposons que la vitesse est la même pour tous les porteurs. En réalité, les collisions des particules en mouvement perturbent le déplacement des porteurs.

Supposons maintenant que le courant de porteurs est exposé à une induction magnétique B. Sur chaque charge s'exerce une force de Lorentz. La force magnétique s'exerçant sur les porteurs est donnée par :

$$\vec{F}_p = e(\vec{v}_{dp} \wedge \vec{B}) \quad \vec{F}_n = -e(\vec{v}_{dn} \wedge \vec{B})$$

En appliquant ces formules sur le schéma de la figure 1, les forces magnétiques sont colinéaires à l'axe z. Ces forces dévient les porteurs vers la partie haute (ou basse suivant le signe des porteurs) de l'échantillon. La concentration des porteurs est donc plus élevée en haut qu'en bas de l'échantillon. Mais les porteurs de charge électrique réagissent comme un fluide incompressible. Ils réagissent en développant un champ électrique, le champ de Hall, qui contrebalance exactement la pression magnétique si le matériau est suffisamment long. D'un point de vue extérieur au matériau, un champ électrique apparaît (le champ électrique de Hall) et les porteurs de charges en mouvement se déplacent suivant une droite.

$$e(\vec{v}_d \wedge \vec{B}) + e \vec{E}_H = 0 \Rightarrow \vec{E}_H = -(\vec{v}_d \wedge \vec{B})$$

On aura donc dans un semi-conducteur p et n respectivement :

$$E_{Hp} = -\mu_p(E_e \wedge B) \quad E_{Hn} = \mu_n(E_e \wedge B)$$

En intégrant sur la hauteur w de l'échantillon le champ électrique E_H , on obtient la tension de Hall V_H dans un échantillon de type p et n respectivement.

$$V_H = \int_w E_H \cdot dz$$

$$V_{Hp} = \mu_p E_e B_y w \quad V_{Hn} = \mu_n E_e B_y w$$

Les porteurs sont soumis à 2 champs électriques perpendiculaires : le champ électrique E_e et le champ électrique de Hall E_H . L'angle d'inclinaison entre \vec{E} et \vec{J} est appelé angle de Hall.

Dans tout ce qui suit, on ne considère qu'un matériau de type p et les grandeurs sont affectées d'un indice p.

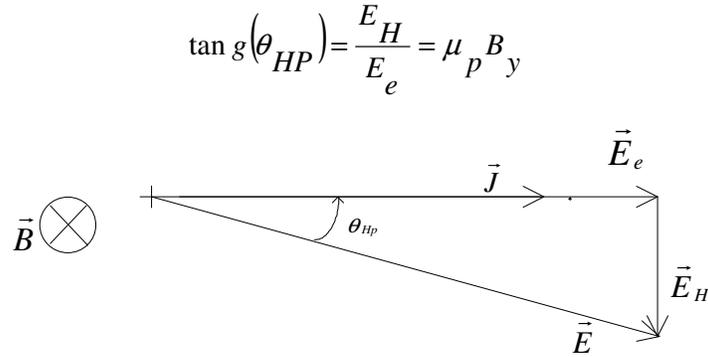


Figure 2 : angle de Hall dans le cas d'un matériau de type p

Le champ électrique de Hall pour un matériau de type p est :

$$E_{HP} = -\mu_p \frac{1}{qp\mu_p} (J_p \wedge B)$$

$$E_{HP} = -\frac{1}{qp} (J_p \wedge B)$$

$R_{Hp} = \frac{1}{qp}$ est appelé la constante de Hall.

Dans un matériau de type n, la constante de Hall est $R_{Hn} = -\frac{1}{qn}$. La densité de courant est donnée par la relation $J = \frac{I}{t.w}$ d'après la Figure 1.

$$E_H = \frac{R_H}{t.w} I.B$$

$$V_H = \int_M^N E_H . dz = \frac{R_H}{t} I.B$$

Pour un matériau donné, la tension de Hall est proportionnelle au courant qui circule et à l'induction magnétique appliquée.

2. Constructions des capteurs à effet Hall

Les films de semi-conducteurs fins sont fabriqués par évaporation ou déposition de vapeur chimique et structuré avec l'aide de la photolithographie. Les premiers générateurs de Hall intégrés utilisaient une technologie MOS.

Les générateurs de Hall sont réalisés avec des matériaux de type Antimoine d'Indium (InSb) ou l'Arséniure d'Indium (InAs). Ces matériaux ont des mobilités très grandes par rapport à de l'Arséniure de Gallium (AsGa), par exemple. L'Arséniure de Gallium est aussi utilisable mais sa sensibilité est bien moindre. Ces corps ont à dopage égal des conductivités supérieures à celles du Germanium ou du Silicium. L'avantage qui en résulte, est de pouvoir polariser le capteur avec des courants plus importants pour obtenir une sensibilité plus élevée, sans observer d'échauffement prohibitif. Le matériau idéal possède une forte mobilité et une faible densité de porteurs ionisés. C'est pour ces 3 raisons qu'il est employé des matériaux bien particuliers pour réaliser les générateurs de Hall.

	InAs	InSb	AsGa
μ_n (cm ² /Vs)	33000	78000	8500
μ_p (cm ² /Vs)	460	750	400

Tableau : mobilité des matériaux utilisables pour un générateur de Hall

Le rapport longueur sur largeur de la plaquette, la dimension réelle des électrodes de Hall interviennent fortement dans la diffusion des courants en présence d'induction magnétique et permettent en pratique, d'optimiser les caractéristiques d'un générateur. La Figure 3 montre un type de géométrie utilisée par Siemens.

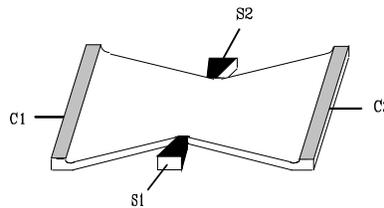


Figure 3 : forme papillon utilisée pour concentrer le courant dans la région du centre et obtenir une forte sensibilité aux flux

La cellule de Hall est ensuite placée sur un substrat dans un matériau amagnétique (film d'époxy) ou au contraire magnétique (typiquement du ferrite). Le ferrite est souvent utilisé dans les capteurs de position pour canaliser les lignes d'induction magnétique et ainsi augmenter la sensibilité.

3. Imperfections des capteurs à effet Hall

Les capteurs à effet Hall sont des éléments présentant quelques défauts. La plupart peuvent être masqués par l'électronique utilisée, mais il est intéressant d'aborder ce qui peut être considéré comme des limitations. La première imperfection que nous allons étudier est la limitation en fréquence.

3.1 Limitation en fréquence

La bande passante utilisable des générateurs de Hall apparaît bien souvent limitée à quelques dizaines de kHz. Nous avons voulu savoir si cette limitation de la bande de fréquences était due au principe de l'effet Hall lui même, ou plutôt si cette limitation était la conséquence de l'électronique utilisée pour mettre en forme le signal.

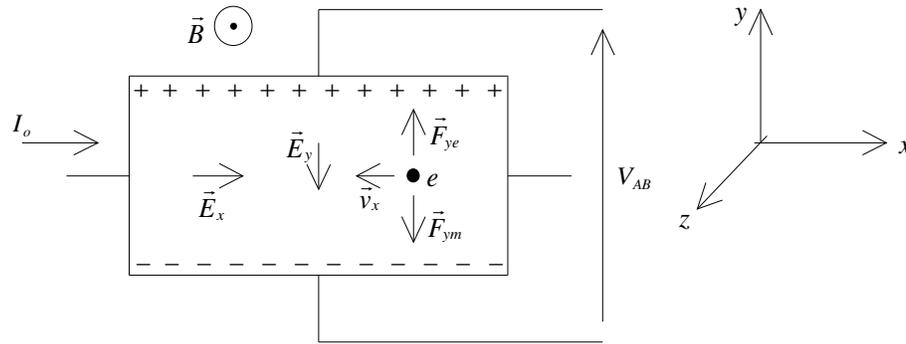


Figure 4 : calcul de la fréquence maximale d'utilisation d'un capteur à effet Hall

Lorsqu'un courant I_0 circule dans le matériau, les électrons sont animés d'un mouvement vers la droite de la Figure 4. Le champ électrique \vec{E}_x est responsable de ce déplacement. Quand, en même temps que la polarisation est appliquée une induction magnétique \vec{B} , les électrons sont le siège d'une force magnétique \vec{F}_{ym} . Apparaît alors par compensation la force électrique \vec{F}_{ye} qui ramène les lignes de courant horizontale. Il existe donc un régime transitoire pendant lequel la force électrique \vec{F}_{ye} n'a pas encore déplacé les lignes de courants et par conséquent l'effet Hall ne peut être considéré comme instantané. Pour connaître l'ordre de grandeur du temps d'apparition d'une tension de Hall après une variation de champs magnétique (ou une variation du courant), nous faisons le calcul suivant.

On exprimera la force en fonction de l'accélération. L'accélération sera approximée comme le rapport de la vitesse v sur le temps de transit τ .

$$\frac{F_e + F_m}{m} = \frac{v}{\tau}$$

avec $F_e = -eE$ et $F_m = -e(v \wedge B)$. m est la masse des porteurs.

On s'intéresse à la vitesse des porteurs selon les axes x et y .

$$\frac{v_x}{\tau} = -e \frac{E_x}{m} - \frac{eB}{m} v_y$$

$$\frac{v_y}{\tau} = -e \frac{E_y}{m} + \frac{eB}{m} v_x$$

Dans ce calcul, il apparaît un rapport $\frac{e.B}{m}$ qui est homogène à une pulsation $\omega_c = 2\pi\nu_c$. Cette fréquence est appelée la fréquence cyclotron, car une particule de masse m , de charge e et soumise à une induction magnétique B tourne à la fréquence ν_c dans un cyclotron.

Faisons le calcul de cette fréquence dans les capteurs à effet Hall.

Prenons e (charge de l'électron) = $1.6.10^{-19}$ C et $B = 1$ mT.

m (masse des porteurs) = $9.1 \cdot 10^{-31}$ kg (masse de l'électron).

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} \approx 28 \text{ MHz}$$

Dans des utilisations courantes, nous ne serons pas gênés par une limitation en fréquence des capteurs à effet Hall. Siemens dans la documentation concernant les capteurs magnétorésistifs, précise que des limitations en fréquence apparaissent à partir de 10 GHz... Nous venons de montrer par ce calcul que le principe physique des capteurs à effet Hall n'est pas limité en fréquence pour les applications nous concernant.

3.2 Influence de la température

Lorsqu'un courant de polarisation est appliqué au capteur à effet Hall, il y a accroissement de la température du matériau. La température dans lequel plonge le capteur à effet Hall peut influencer ses caractéristiques électriques telles que l'offset ou la sensibilité du capteur. Le matériau devra donc être choisi pour présenter une faible variation de ses caractéristiques en fonction de la température.

Les variations des caractéristiques des capteurs à effet Hall en fonction de la température sont tributaires de la variation de la mobilité des porteurs, et de la variation du nombre de porteurs ionisés en fonction de la température.

L'Arséniure d'Indium (InAs) et l'Arséniure de Gallium (GaAs) sont des matériaux présentant de faible variation de la constante de Hall avec la température (d'environ 10% pour une température variant de -40°C à 100°C).

3.3 Résistance de charge pour une linéarité optimale

Sur certains capteurs à effet Hall de précision, une résistance est placée en dérivation sur les broches de polarisation. La valeur optimale donnant l'erreur de linéarité la plus faible doit être ajustée pour chaque capteur. Un ordre de grandeur de la valeur de la résistance est donné dans les documentations.

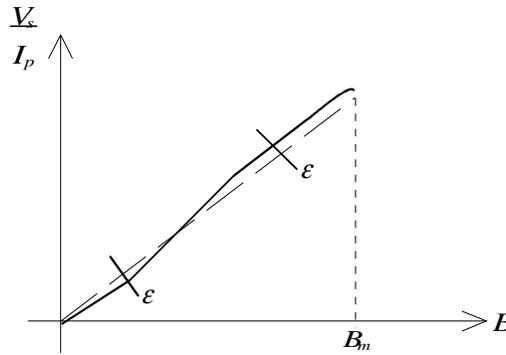


Figure 5 : définition de l'erreur de linéarité

L'erreur de linéarité est réduite au minimum lorsque la courbe de la grandeur de sortie réduite se rapproche le plus possible de la droite théorique. Elle est exprimée en pourcentage de la tension de sortie maximale.

3.4 Composante d'offset en sortie

Comme il n'est pas possible en production de grande série de placer les électrodes de mesures de la tension de Hall alignées exactement sur le même axe, il en résulte une tension continue entre les 2 bornes de Hall. Cette tension est proportionnelle au courant circulant dans le capteur à effet Hall.

En production on usine la plaquette semi-conductrice pour avoir la même tension continue sur les sorties référencées A et C de la figure 14. Le trajet du courant moyen entre A et B est allongé, et la résistance est augmentée.

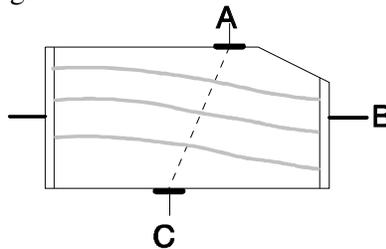


Figure 6 : usinage du capteur à effet Hall

Par contre si la résistivité du matériau varie en fonction de la température, le capteur devra intégrer une compensation d'offset en fonction de celle-ci.

3.5 Composante de tension d'origine inductive

Les connexions d'alimentations et de mesure entre le capteur à effet Hall et le circuit d'alimentation, constituent une boucle enlaçant une certaine surface qui ne peut être annulée, même pour un câblage très soigné.

Il s'ensuit qu'un flux magnétique traversant cette boucle, va générer une tension qui s'exprime par la relation :

$$e = S \cdot \frac{dB}{dt}$$

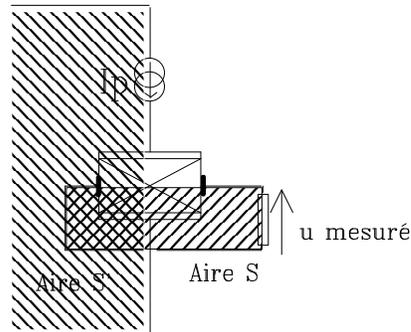


Figure 7 : surface de capture de l'induction magnétique induite

Cette tension se superposera à la tension de Hall proprement dite. Le même phénomène sur les connexions d'alimentation du capteur induit une tension qui modifie la polarisation.

Pour éviter que la tension d'origine inductive ne soit trop importante par rapport à la tension de sortie du capteur à effet Hall, on aura intérêt à placer l'amplificateur au plus près de la cellule de Hall.

4. Applications

Les capteurs disponibles actuellement se présentent sous 2 formes :

- capteurs à effet Hall seul, sans électronique associée.
- capteur associé avec une électronique de traitement et de polarisation.

Les capteurs disponibles sous la 1^{ère} forme sont en général d'un coût moindre et d'un encombrement plus faible, notamment au niveau de leur épaisseur ce qui permet par exemple de pouvoir les loger dans des entrefers de faibles dimensions. Par contre, les imperfections inhérentes aux capteurs à effet Hall ne sont pas compensées. L'offset varie donc en fonction de la température ainsi que la sensibilité. D'un échantillon à un autre la dispersion de la sensibilité peut être très importante. N'ayant pas d'amplificateur en sortie du capteur à effet Hall, le signal de sortie est faible.

A titre d'exemple, ce capteur à effet Hall sans électronique associée est inutilisable dans une sonde de courant travaillant en boucle ouverte. Par contre dans une sonde de courant fonctionnant en boucle fermée, la linéarité et la variation de la sensibilité du capteur à effet Hall importent assez peu. Le capteur doit être choisi pour la stabilité de sa tension continue de sortie.

Le synoptique interne d'un capteur à effet Hall et son électronique rapprochée est représenté sur la Figure 8. La polarisation des capteurs à effet Hall peut être faite à courant constant ou

sous tension constante. Les 2 sorties du capteur à effet Hall sont dirigées vers un amplificateur différentiel d'instrumentation.

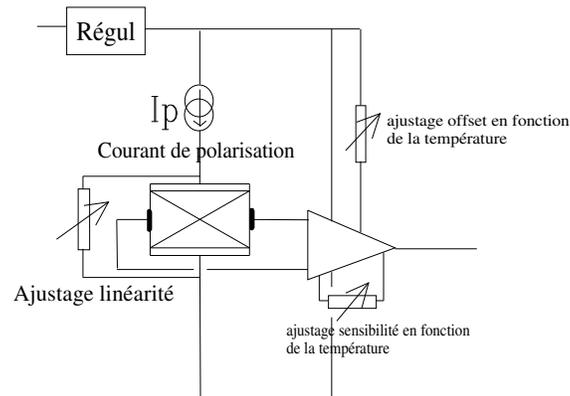


Figure 8 : structure interne d'un capteur à effet Hall évolué

L'ensemble capteur à effet Hall et l'électronique rapprochée est souvent placé sur un circuit hybride. Le tout peut être noyé dans de la matière plastique pour éviter les effets piézo-électriques sur la cellule de Hall. Les composants d'ajustages sont réglés à la fabrication, et certaines valeurs doivent pouvoir varier avec la température pour corriger l'effet sur la cellule de Hall.

Référence	Plage d'utilisation (T)	Offset V_{off}	Sensibilité S en $mV.mT^{-1}$	$\frac{\partial S}{\partial \theta}$ par degré	$\frac{\partial V_{off}}{\partial \theta}$ par degré	$\frac{dS}{dB}$	Fréquence de coupure haute	Prix à l'unité
KSY14 Siemens capteur simple	non défini	15 mV	1.05 à 1.6	0.03%	0.3%	0.7%	au-dessus de 1 MHz	35 F
UGN3503 Allegro capteur avec électronique	non défini	2.5 V	7.5 à 17.2	0.05% pour 0.05 mT	stable	2%	23 KHz	40 F
SS495A1 Honeywell capteur avec électronique	-0.06 à 0.06	2.5V	$31.25 \pm 3\%$	$\pm 0.03\%$	$\pm 0.04\%$	1%	50 KHz	40 F
SS94A2 Honeywell capteur avec électronique	-0.05 à 0.05	4V	$5 \pm 2\%$	$\pm 0.02\%$	$\pm 0.02\%$	0.8%	100 KHz	180F

Tableau comparatif des différents capteurs à effet Hall disponible sur la marché. On compare deux types de capteurs : simples comme le KSY44 ou évolué comme le UGN3503, le SS495A1 ou le SS94A2.

B. Magnétorésistance

1. Etude théorique de l'effet magnétorésistif

L'échantillon est dit court si la dimension dans le sens du parcours du courant est très petite devant la direction d'application de la force magnétique. $l \ll w$ comme on peut le voir sur la Figure 9.

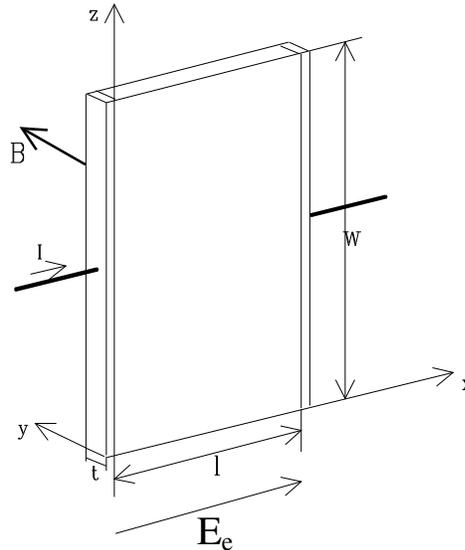


Figure 9 : effet Hall dans un échantillon court

Comme la longueur de l'échantillon est faible, le champ électrique de compensation de la déformation des lignes de courant n'a pas la place de se développer. La tension de Hall est comme court-circuitée par les larges faces d'entrée et de sortie. E_H est faible et seule agit la force magnétique.

Calculons la relation entre le champ électrique et la densité de courant dans l'échantillon. On considère toujours que le déplacement des porteurs est uniforme et on néglige les effets thermiques. La force de Lorentz est :

$$\vec{F}_n = -q\vec{E}_e - q(\vec{v}_n \wedge \vec{B}) \quad \vec{F}_p = q\vec{E}_e + q(\vec{v}_p \wedge \vec{B})$$

pour les électrons et les trous respectivement. v_n et v_p sont les vitesses des électrons et des trous dues aux actions des forces de Lorentz F_n et F_p respectivement. Nous voulons faire apparaître la densité de courant dans l'échantillon en présence de l'induction magnétique. Pour ce faire, il est pratique de considérer que les forces de Lorentz F_n et F_p sont des forces électriques, donc le produit d'une charge q avec un champ électrique équivalent E_n et E_p . Ce champ électrique est simplement le résultat de l'addition vectorielle de 2 champs électriques.

$$-q\vec{E}_n = -q\vec{E}_e - q(\vec{v}_n \wedge \vec{B}) \quad q\vec{E}_p = q\vec{E}_e + q(\vec{v}_p \wedge \vec{B})$$

En multipliant les 2 équations précédentes par $-\mu_n$ et μ_p nous obtenons :

$$J_p(B) = J_p(0) + \mu_p [J_p(B) \wedge B]$$

$$J_n(B) = J_n(0) - \mu_n [J_n(B) \wedge B]$$

Quand $J_p(B)$ et $J_n(B)$ sont les densités de courant des trous et des électrons respectivement, en présence de l'induction magnétique B .

$$J_p(B) = q\mu_p p E_p = \mu_p p F_p$$

$$J_n(B) = q\mu_n n E_p = \mu_n n F_p$$

et $J_p(0)$ et $J_n(0)$ sont les densités de courants de déplacements dues au champ électrique E quand $B = 0$:

$$J_p(0) = q\mu_p p E_e \quad J_n(0) = q\mu_n n E_e$$

Les équations écrites précédemment sont représentées graphiquement sur la figure 5. Les orientations des vecteurs E et B correspondent à celles définies sur la figure 4 : le champ électrique externe est colinéaire à l'axe x et l'induction magnétique perpendiculaire à l'axe x de la figure 5. Le champ électrique externe est gardé constant.

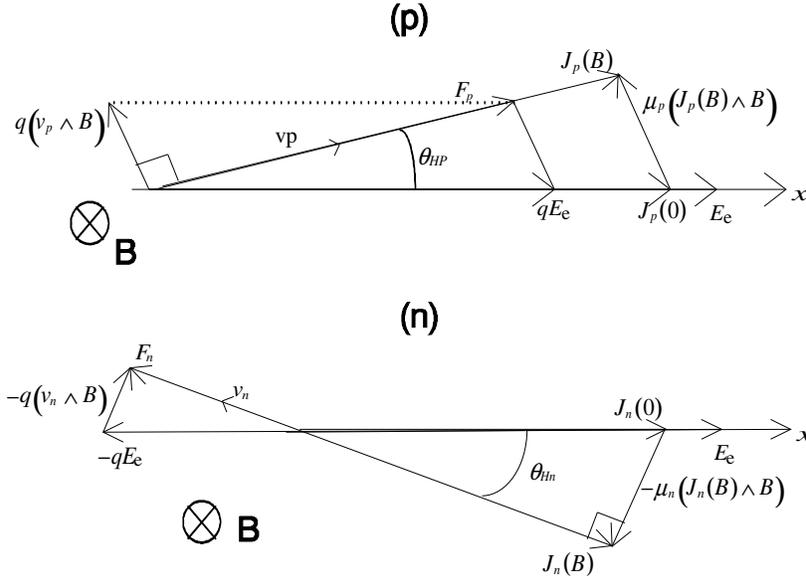


Figure 10: représentation graphique des équations donnant la densité de courant dans un semi-conducteur dopé n ou p

D'après la Figure 10, nous pouvons noter que la densité de courant en présence de l'induction magnétique n'est pas colinéaire avec le champ électrique externe. L'angle de Hall est défini entre E_e et $J(B)$.

$$\tan g(\theta_{Hp}) = \mu_p B \quad \tan g(\theta_{Hn}) = \mu_n B$$

La densité de courant en présence de l'induction magnétique est plus petite que la densité de courant au repos. L'atténuation de la densité de courant est une conséquence de la déflexion des lignes de courants.

Pour calculer la variation de la densité de courant en fonction de l'induction magnétique, considérons les équations écrites plus haut :

$$J_p(B) = J_p(0) + \mu_p [J_p(B) \wedge B]$$

$$J_n(B) = J_n(0) - \mu_p [J_n(B) \wedge B]$$

Pour résoudre simplement ces expressions nous allons identifier les équations avec :

$$X = A + (X \wedge B') \quad (1)$$

Si nous multiplions scalairement (1) par B', on obtient :

$$X \cdot B' = A \cdot B' \quad (2)$$

et le produit vectoriel de X et de B' s'écrit :

$$[X \wedge B'] = [A \wedge B'] + [(X \wedge B') \wedge B'] \quad (3)$$

La deuxième partie de l'expression (3) se simplifie avec :

$$(X \wedge B') \wedge B' = B'(X \cdot B') - X(B' \cdot B')$$

Donc en remplaçant dans l'expression (3) cela donne :

$$[X \wedge B'] = [A \wedge B'] + B'(X \cdot B') - X(B' \cdot B')$$

Reportons (3) et (2) dans (1).

$$X = A + [A \wedge B'] + B'(X \cdot B') - X(B' \cdot B') = A + [A \wedge B'] + B'(A \cdot B') - X(B' \cdot B')$$

$$X = \frac{A + [A \wedge B'] + B'(A \cdot B')}{1 + (B')^2}$$

Soit en remplaçant X, A et B' par leur expression :

$$J_p(B) = \frac{J_p(0) + [J_p(0) \wedge (B\mu_p)] + (B\mu_p)[J_p(0) \cdot (B\mu_p)]}{1 + (B\mu_p)^2}$$

Le numérateur peut se simplifier puisque $J_p(0) = \sigma E_e$ et $E_e \cdot B = 0$.

$$J_p(B) = \frac{\sigma}{1 + (B\mu_p)^2} (E_c + \mu_p (E_c \wedge B))$$

Le terme $\frac{\sigma}{1 + (B\mu_p)^2}$ représente la conductivité en fonction du champ magnétique et montre l'effet magnétorésistif du matériau. Quand l'induction magnétique augmente, il y a diminution de la conductivité du matériau. Cet effet est utilisé pour mesurer l'induction magnétique dans les capteurs magnétorésistif.

Sur la Figure 11, nous avons reporté la variation du rapport de la résistance mesurée (R_b) pour l'induction magnétique à la résistance mesurée à induction nulle (R_0), pour plusieurs valeurs de l'induction. Cette caractéristique suit à peu près une forme quadratique.

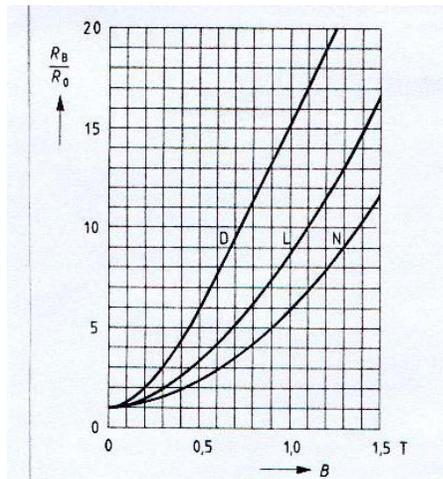


Figure 11 : dépendance de $\frac{R_b}{R_0}$ en fonction de l'intensité de l'induction magnétique B pour 3 niveaux de dopage . Le matériau utilisé est de l'Antimoine d'Indium et de l'Antimoine de Nickel (InSb / NiSb).

2. Magnétorésistance anisotrope (AMR)

Les capteurs magnétorésistifs existent surtout en couche mince. Ils présentent une forte sensibilité pour les faibles valeurs d'induction et une faible consommation d'énergie. Le maximum de variation de résistance est de l'ordre de 3 à 4%. Ces capteurs peuvent être produits en grande quantité à des prix très faibles.

Ces capteurs sont fabriqués à partir de couche ferromagnétique (par exemple du permalloy) qui présente une anisotropie magnétique obtenue par l'exposition à un champ magnétique fort pendant la formation du cristal. Cette exposition à un champ magnétique, le type de réseau cristallin et la géométrie déterminent la direction de facile aimantation.

La variation de la résistance est liée à l'angle φ entre la magnétisation M du matériau, et la direction de facile aimantation comme indiqué sur la Figure 12. θ est défini entre la magnétisation M et le courant I .

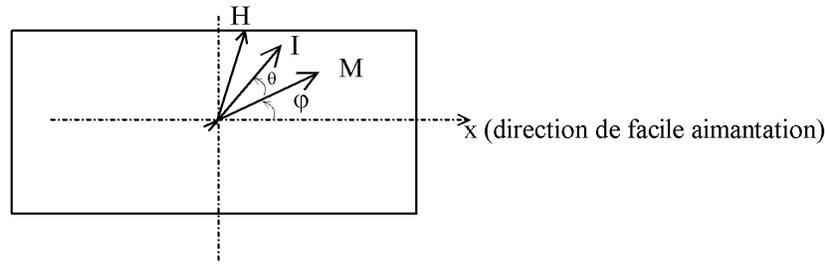


Figure 12 : géométrie d'un capteur magnétorésistif anisotropique avec la direction du courant, la magnétisation M et la direction du courant I

L'application d'une excitation magnétique H dans le plan entraîne une rotation de l'aimantation M. Supposons que le champ H soit appliqué suivant y et $H_x = 0$. La relation entre φ et H_y est :

$$\sin \varphi = \frac{H_y}{H_0}$$

La relation liant R à H est : $R(H) = R_{\perp} + \Delta R_{\max} \cdot \cos^2 \theta$

R_{\perp} est la résistance quand M est \perp à I.

Dans la suite, nous étudions deux cas particuliers : le courant est appliqué suivant une direction parallèle à direction de facile aimantation, ou le courant fait un angle de 45° avec la direction de facile aimantation. Ce dernier cas permet d'obtenir une courbe $R(H)$ assez linéaire.

2.1 Courant suivant la direction de facile aimantation

$$\theta = -\varphi. \text{ Donc, } \cos \theta = \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0}\right)^2} \text{ pour } H_y < H_0$$

Et la variation de résistance est donnée par :

$$\Delta R(H) = \Delta R_{\max} \cdot \left(1 - \left(\frac{H_y}{H_0}\right)^2\right).$$

La variation de résistance en fonction de H_y n'est pas linéaire. Les inconvénients de ce type de capteur sont : une mauvaise linéarité, une sensibilité très faible près de l'origine et une impossibilité de déterminer le sens de la variation de R en fonction de H_y .

2.2 Courant incliné de 45°

L'angle d'orientation entre la direction de facile aimantation et la direction du courant est de 45° . $\theta = 45 - \varphi$.

$$\cos(45 - \varphi) = \frac{\sqrt{2}}{2} (\cos \varphi + \sin \varphi) \text{ et } \cos \varphi = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi}$$

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{H_y}{H_0} + \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2} \right)$$

$$R(H) = R_{\perp} + \frac{\Delta R_{\max}}{2} \left(1 + 2 \frac{H_y}{H_0} \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2} \right).$$

La variation de résistance est donc donnée par la relation :

$$\Delta R(H) = \Delta R_{\max} \left(\frac{1}{2} \pm \frac{H_y}{H_0} \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2} \right).$$

Pour des variations faibles de H_y par rapport à H_0 , la variation de résistance est linéaire.

Pour réaliser l'inclinaison du courant, il est utilisé une géométrie dite « Barber Pole » représentée sur la Figure 13. Avec ce type de géométrie, les couches de matériau magnétorésistif alternent avec des couches d'un matériau à forte conductivité comme l'aluminium. Le courant est ainsi forcé de circuler perpendiculairement à la direction des couches d'aluminium, soit à 45° avec l'horizontale.

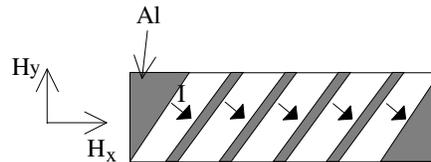


Figure 13 : constitution de la structure dite « Barber Pole »

L'augmentation de la résistivité consécutive à la rotation des lignes de courant, se trouve limitée par les couches d'aluminium. Nous avons placé sur la Figure 14 la variation de résistance en fonction de l'induction magnétique pour un matériau magnétorésistif et une géométrie utilisant la technique « Barber Pole ». La variation de résistance est donnée par la relation : R_0 étant la résistance en l'absence de champ, et ΔR la variation de résistance fonction des caractéristiques du matériau.

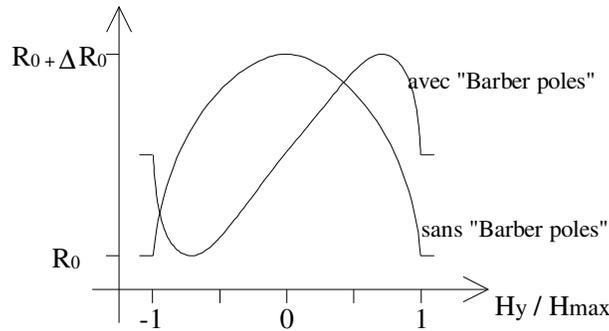


Figure 14 : caractéristiques des capteurs magnétiques. La structure « Barber Pole » autorise une plus grande linéarité autour de zéro

Pour réaliser un capteur magnétorésistif, plusieurs résistances variables en fonction de l'induction magnétique sont assemblées pour constituer un pont de Wheastone. L'orientation des couches en aluminium est alternée entre 45° et -45° par rapport à l'horizontale. Le pont permet d'avoir une tension nulle au repos, et il permet en alternant le sens des barber pole d'augmenter la linéarité. Cette structure est représentée sur la Figure 15.

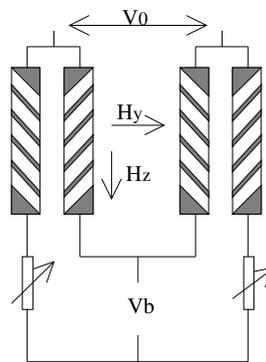


Figure 15 : pont de Wheastone de capteur magnétorésistifs. V_0 est la tension de polarisation et V_b la tension de sortie. Les deux résistances variables sont ajustées pour assurer l'équilibrage du pont

La tension de sortie du pont de Wheastone de la Figure 15 est donnée par la relation suivante :

$$V_b = V_0 \frac{\Delta R}{R_0} \frac{H_y}{H_0} \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0}\right)^2}.$$

En pratique lorsque l'on recherche des capteurs d'induction magnétique linéaires, ce sont surtout les générateurs de Hall qui sont utilisés, certainement en raison de leur linéarité plus grande. D'autre part, la plupart des capteurs magnétorésistifs disponibles, sont sensibles aux champs magnétiques dirigés suivant la plaquette, et non perpendiculairement à la face sensible comme les générateurs de Hall.

3. Réalisation des capteur magnétorésistif

Plusieurs techniques sont utilisées pour réaliser les capteurs magnétorésistifs. Philips utilise une technique de photolithographie à partir de permalloy ($\text{Ni}_{18}\text{Fe}_{19}$). Ce matériau magnétique est évaporé et oxydé sur un support en silicium. Les techniques « Barber pôles » sont employés pour linéariser la caractéristique de la tension en fonction de l'induction magnétique.

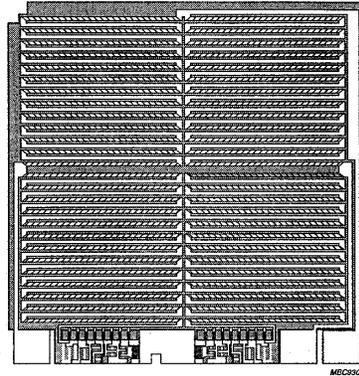
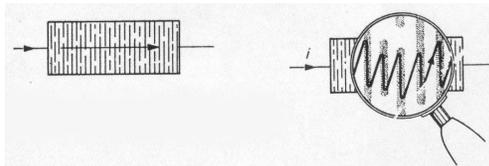
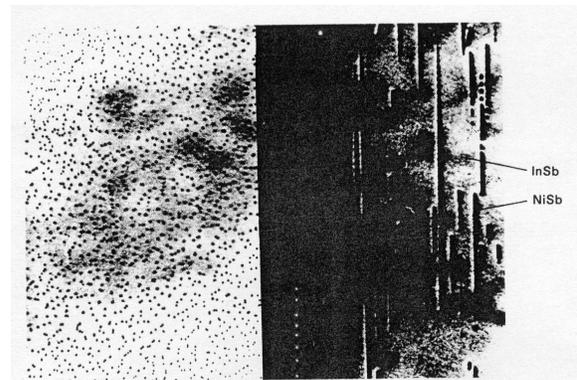


Figure 16 : réalisation d'un capteur magnétorésistif. On distingue les zones sensibles connectées les unes aux autres en série

Siemens emploie de l'antimoine d'indium (InSb) ou de l'antimoine de nickel (NiSb) pour réaliser le barreau de semi-conducteur. L'antimoine de nickel est solidifié en forme d'aiguille dans l'antimoine d'indium et ces aiguilles sont arrangées parallèlement à la longueur de la barre. Les aiguilles se comportent comme des courts-circuits et constituent donc des directions privilégiées de passage du courant. En présence d'induction magnétique les lignes de courant sont déviées et le courant ne passe plus au travers des aiguilles. Il s'ensuit que la résistance varie en fonction de l'induction magnétique en étant assez linéaire.



Déplacement du courant en présence ou en absence de B



Gros plan sur la technologie Siemens

Référence	Plage d'utilisation (T)	Sensibilité S en mV.mT^{-1} pour 5 V d'alimentation	$\frac{\partial S}{\partial \theta}$ par degré à I constant	Résistance du pont
KMZ10A Philips	-0.625 mT à +0.625 mT	64	-0.15 %. $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1.3 K Ω
KMZ10C Philips	-3.75 mT à +3.75 mT	6	-0.15 %. $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1.7 K Ω

Tableau comparatif des capteurs magnétorésistifs

4. Magnétorésistance géante

Comme nous l'avons vu pour la magnétorésistance, un champ magnétique modifie la trajectoire d'un électron en mouvement et il y a modification de la résistance du matériau en fonction du champ magnétique. Pour la plupart des métaux, cet effet est très faible. En 1988, Baibich a mesuré une variation de la résistance de 50 % quand il appliquait un champ magnétique sur des films multicouches d'épaisseurs très faibles de quelques dizaines d'Angström d'épaisseur. Cette énorme variation de la résistance fut appelée Magnétorésistance géante (GMR).

L'effet de magnétorésistance géante apparaît lorsqu'un sandwich de couche ferromagnétique et de couches de matériaux non magnétiques (FeCr, FeNiAg, FeNiCu avec des épaisseurs par exemple de Fe = 30 Å et Cr = 9 Å) est soumis à un champ magnétique extérieur. L'épaisseur des différentes couches doit être beaucoup plus faible que le libre parcours moyen (longueur moyenne entre deux collisions) dans le multicouche.

L'effet de magnétorésistance géante fut découvert avec un multicouche de fer et de chrome. Dans ce cas, en l'absence de champ magnétique le couplage anti-ferromagnétique entre les couches de fer au travers des couches de chrome maintient les couches successives de fer dans une orientation antiparallèle. La magnétisation de chaque couche est orientée alternativement dans un sens et dans l'autre comme on peut le voir sur Figure 17. Quand on applique un champ magnétique extérieur (environ 20 kG), les interactions entre les différentes couches s'estompent et les couches de fer se magnétisent dans la direction imposée par le champ magnétique extérieur. La résistance de passage du courant transversalement aux couches est plus faible quand les couches sont magnétisées dans le même sens que le moment magnétique extérieur, que dans le cas où la magnétisation est orientée alternativement dans un sens et dans l'autre. La magnétorésistance découle de cet effet.

La résistance d'un courant électrique dans un métal dépend du processus de diffusion et du nombre de collisions que subissent les porteurs de charges dans le métal. Si le processus de diffusion est fort, le libre parcours moyen entre deux collisions est faible et la résistance importante. Inversement, si le processus de diffusion est faible, le libre parcours moyen entre deux collisions est grand et par conséquent la résistance faible. L'existence de la magnétorésistance géante rend le processus de diffusion plus important pour des électrons ayant une orientation dans un sens que dans l'autre.

Nous considérons que les électrons de passage du courant ont un spin de type parallèle ou antiparallèle par rapport au vecteur de magnétisation. D'autre part, nous supposons que l'orientation du spin par rapport à la magnétisation extérieure fait varier la diffusion des électrons et par conséquent la résistance du multicouche. Ainsi, lorsque le spin de l'électron est orienté dans le sens antiparallèle au moment magnétique extérieur, la diffusion des électrons est très importante et il s'ensuit une résistance élevée du multicouche. Par contre, si le spin et le moment magnétique sont parallèle, le libre parcours moyen est grand et la résistance à l'état passant faible.

Sur la Figure 17 nous présentons deux multicouches (FeCr) avec en Figure 17.a l'application d'une induction faible, et sur la Figure 17.b une induction de l'ordre du Tesla. Le moment magnétique des couches magnétiques successives sont antiparallèle sur la Figure 17.a et parallèle sur la Figure 17.b. Sur la Figure 17.a, un électron favorisé (qui a un spin orienté dans le même sens que le vecteur magnétisation de la couche) diffuse sans collision jusqu'à une couche où il se trouve défavorisé. Au contraire, sur la Figure 17.b, les électrons favorisés sortent sans encombre du multicouches. Sur la Figure 17.a aucuns des électrons ne sort librement, tandis que sur la Figure 17.b, la moitié des électrons sort librement. La résistance du multicouches de la Figure 17.a est donc beaucoup plus grande que celle de la Figure 17.b. On constate donc une diminution de la résistance avec l'augmentation de la valeur de l'induction.

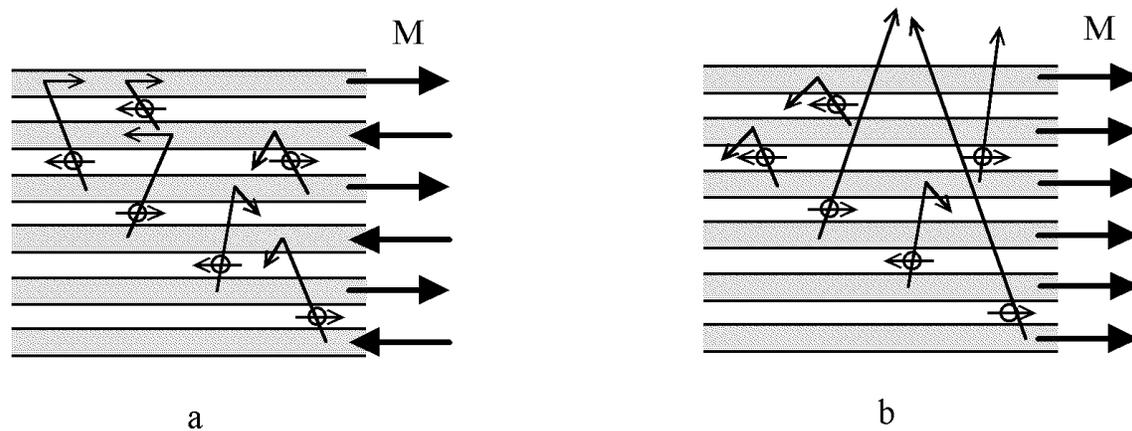


Figure 17 : schéma de la conduction dans un multicouche montrant la résistance plus ou moins importante suivant l'orientation de la magnétisation de la couche par rapport à l'orientation du spin de l'électron

4.1 Réalisation des capteurs magnétorésistifs géants

La conversion de la variation de résistance en la variation de tension en fonction du champ magnétique passe par la disposition de résistance sensible à l'effet de magnétorésistance en pont de Weastone. En général deux résistances sont alors blindées par une couche magnétique comme on peut le voir sur la Figure 18. Il est aussi déposé un concentrateur de flux pour augmenter la sensibilité dans une direction.

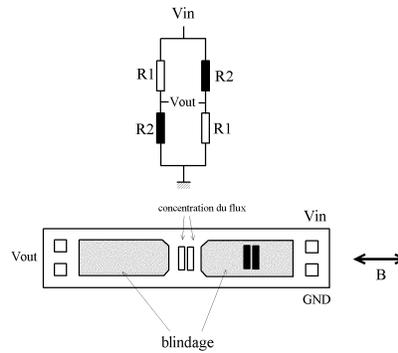


Figure 18 : principe et réalisation d'un capteur de champ magnétique [NVE]

C. Magnétomètre « fluxgate »

Le magnétomètre qui est un dispositif de mesure de champ magnétique extrêmement précis, peut être utilisé pour la mesure des champs magnétiques continu ou basse fréquence dans la gamme de 10^{-10} à 10^{-4} Tesla. La configuration de base est présentée sur la Figure 19.

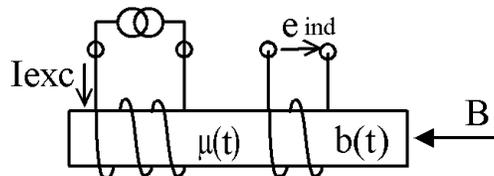


Figure 19 : configuration de base du magnétomètre

Le principe de fonctionnement repose sur l'utilisation d'un matériau magnétique à cycle carré comme du permalloy. Ce matériau est périodiquement saturé par un courant d'excitation I_{exc} sinusoïdal ou triangulaire. La tension relevée sur l'enroulement auxiliaire e_{ind} est nulle pendant les phases où le matériau est saturé, et non nulle en dehors (le flux n'est pas nul uniquement pendant la phase de non saturation et cela justifie le terme de porte de flux «flux gate»). En présence d'un champ magnétique extérieur, ou d'un courant de fréquence beaucoup plus faible que le courant d'excitation, la saturation n'est plus symétrique.

Les principes de mesure reposent sur la mesure de cette dissymétrie. La Figure 20.a montre le principe de la mesure du déphasage entre les impulsions de sortie pour détecter la présence du courant à mesurer. Le courant à mesurer est de forme triangulaire, et sa présence modifie les temps t_1 et t_2 .

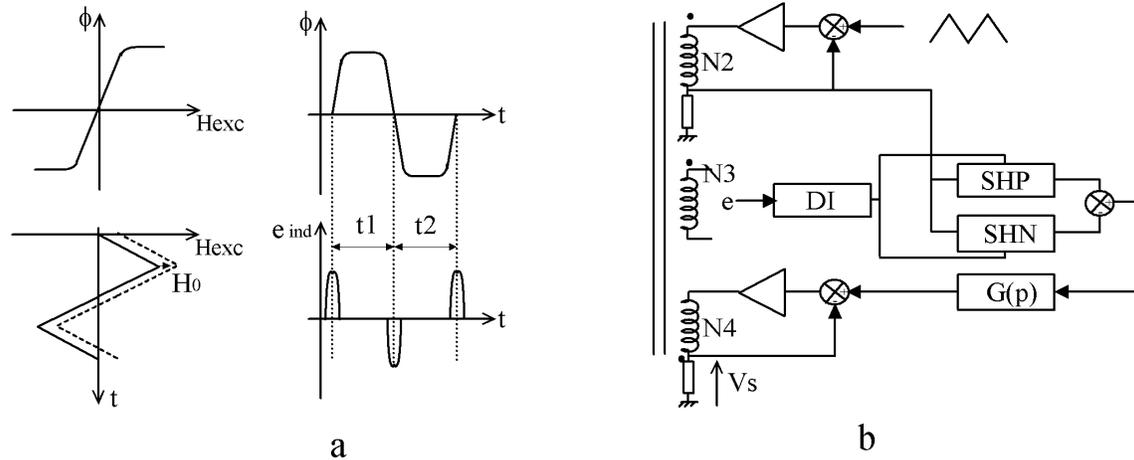


Figure 20 : principe de la méthode de décalage des impulsions

Le schéma de principe de mesure du courant utilisant le principe de décalage entre deux impulsions est décrit sur la Figure 20.b. Le courant à mesurer circule dans l'enroulement N1 et le courant de compensation triangulaire dans l'enroulement N2. Les impulsions en sortie e commande le détecteur DI pour échantillonner le courant d'excitation par les blocs SHP et SHN. La différence des deux grandeurs de courant échantillonnées commande l'enroulement N4 pour réaliser l'asservissement à champ nul. La tension Vs est l'image du courant à injecter dans l'enroulement N4 pour retrouver la saturation symétrique.

L'autre principe est basé sur la détection de l'harmonique 2. La symétrie de saturation du matériau fait apparaître l'harmonique 2 du courant à mesurer. En présence de courant l'harmonique 2 disparaît, et il est alors appliqué un courant de compensation. Cette technique est décrite sur la Figure 21. Le signal sinusoïdal de fréquence 2f car la fréquence des impulsions est double de celle du courant d'excitation attaque l'étage de démodulation synchrone. La capacité C1 sert à fixer la résonance du circuit pour accroître la sélectivité du montage. C2 supprime le couplage continu. Le filtre passe bas de sortie permet de retrouver la composante basse fréquence du courant à détecter, et le courant au travers de la résistance R est l'image du courant nécessaire pour faire apparaître l'harmonique 2 en sortie du bobinage de détection.

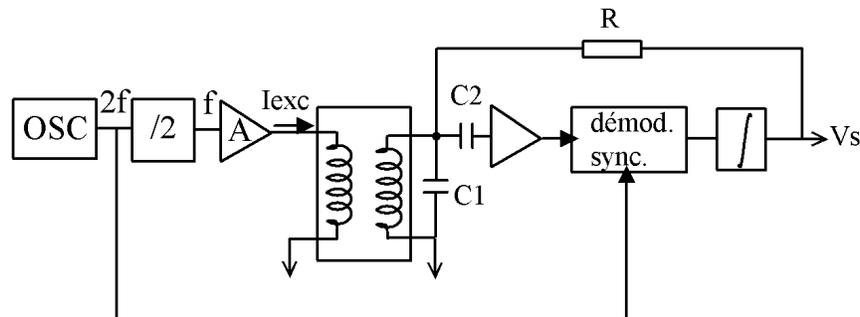


Figure 21 : principe d'un magnétomètre utilisant une détection basée sur le 2^{ème} harmonique