

CHAPITRE 4

CAPTEURS MAGNETIQUES

Unités:	H: champ magnétique	[A/m]
	B: induction magnétique	[Vs/m ²] =[T]
	M: aimantation (magnétisation)	[A/m]
	Φ: flux d'induction magnétique	[Vs]=[Tm ²]
	χ: susceptibilité	[nombre « pur »]
	μ_r: perméabilité relative	[nombre « pur »]
	μ: perméabilité	[H/m]
	μ₀: perméabilité du vide (=4π×10 ⁻⁷ H/m)	[H/m]

Relations:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M}$$

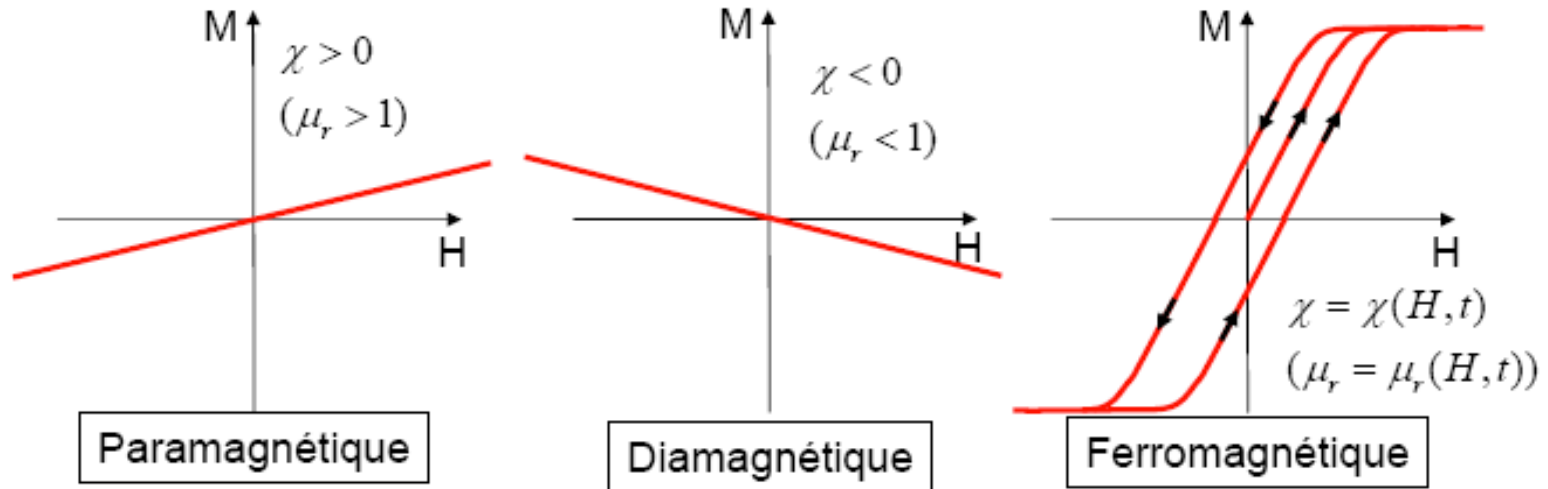
$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{H} (1 + \chi) = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H}$$

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} \quad \rightarrow \quad \mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\chi = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{H}} \quad \mu_r = 1 + \chi$$

Notes :

- 1) Unités et relations dans le *système international* (SI).
- 2) La relation $\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M}$ est valable dans tous les matériaux et toutes les conditions.
- 3) Dans certain cas χ et μ sont fonction de \mathbf{H} , de l'histoire magnétique de l'échantillon (e.g., hystérèse), et de la direction de \mathbf{H} par rapport aux axes cristallines (i.e., χ et μ sont des tenseurs).



Matériaux paramagnétiques, diamagnétiques, et ferromagnétiques, selon la courbe $M(H)$.

Diamagnétisme, paramagnétisme, ferromagnétisme («soft» et «hard»)

	DIAMAGNETIC	PARAMAGNETIC	FERROMAGNETIC SOFT (IDEAL)	FERROMAGNETIC HARD (IDEAL)
$B = 0$				
$B \downarrow$ $mB \gg kT$				

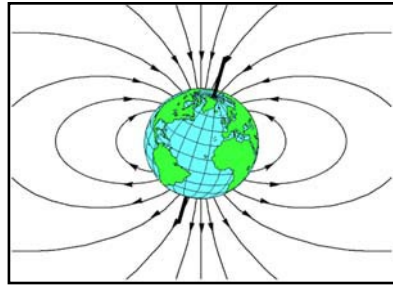
TABLE 30.2 Magnetic Susceptibilities of Some Paramagnetic and Diamagnetic Substances at 300 K

Paramagnetic Substance	χ	Diamagnetic Substance	χ
Aluminum	2.3×10^{-5}	Bismuth	-1.66×10^{-5}
Calcium	1.9×10^{-5}	Copper	-9.8×10^{-6}
Chromium	2.7×10^{-4}	Diamond	-2.2×10^{-5}
Lithium	2.1×10^{-5}	Gold	-3.6×10^{-5}
Magnesium	1.2×10^{-5}	Lead	-1.7×10^{-5}
Niobium	2.6×10^{-4}	Mercury	-2.9×10^{-5}
Oxygen	2.1×10^{-6}	Nitrogen	-5.0×10^{-9}
Platinum	2.9×10^{-4}	Silver	-2.6×10^{-5}
Tungsten	6.8×10^{-5}	Silicon	-4.2×10^{-6}

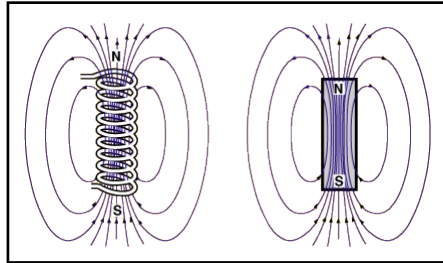
Sources de champs magnétiques:

- Mouvement de charges (courants) «macroscopique» et «microscopique»
- Moment magnétique intrinsèque d'une particule (électron, proton, neutron...)

Exemples:



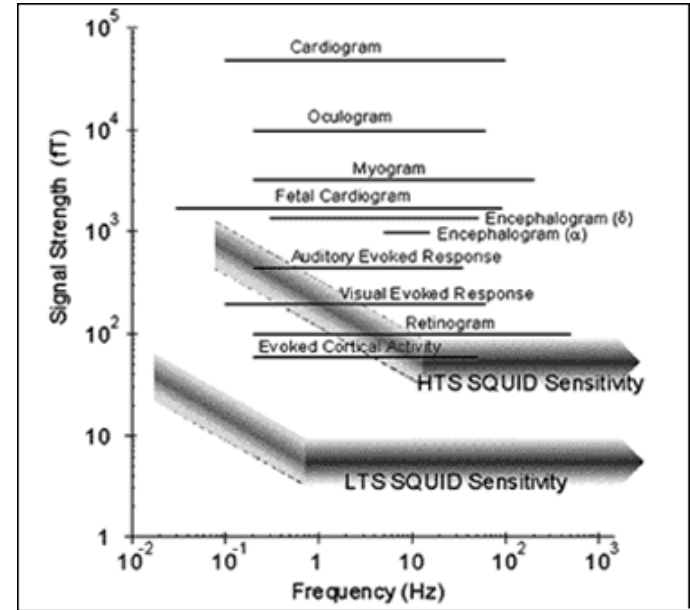
Terre (en surface) : $\sim 10 \mu T$



Courant dans une bobine : typ. 0 à 20 T(max. DC: 45 T, max. pulsed : ~ 1000 T)

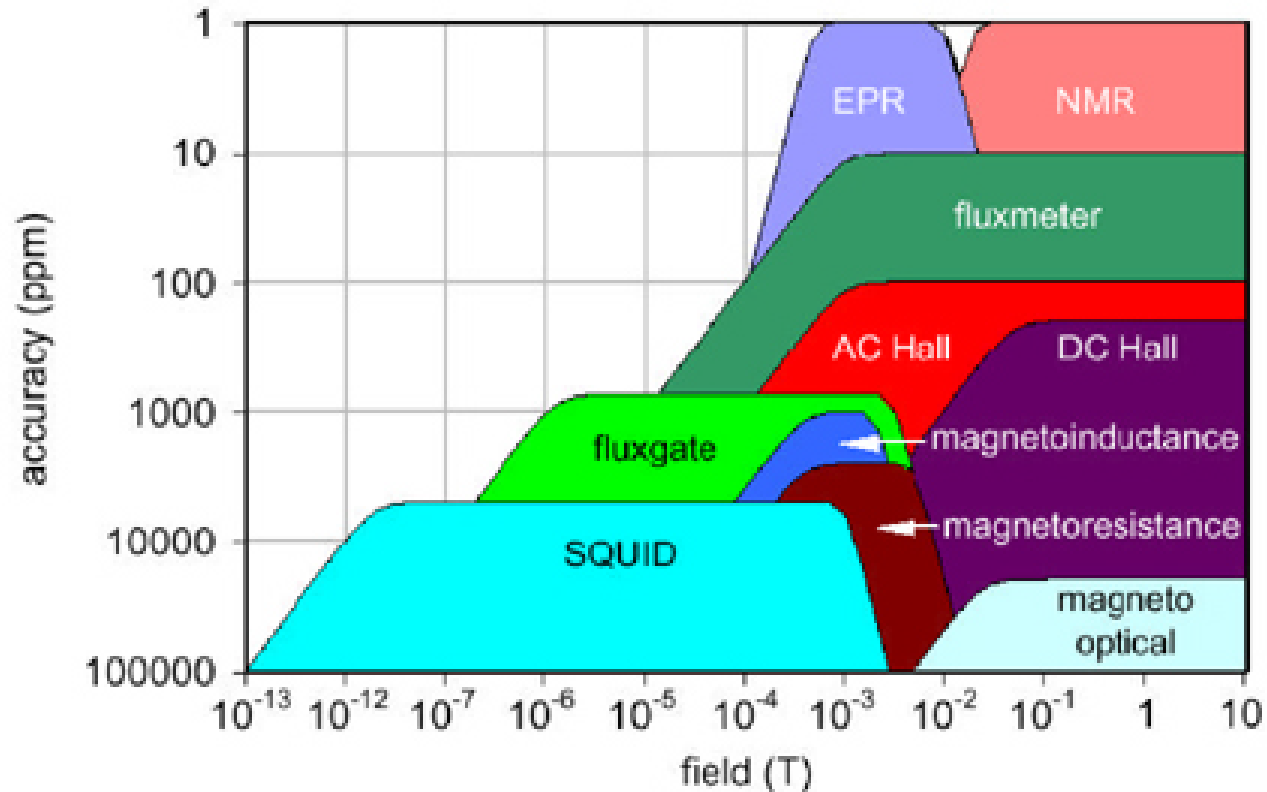
Aimant permanent : typ. 0 à 2 T(max. ~ 5 T)

(voir aussi : [https://en.wikipedia.org/wiki/Orders_of_magnitude_\(magnetic_field\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Orders_of_magnitude_(magnetic_field)))

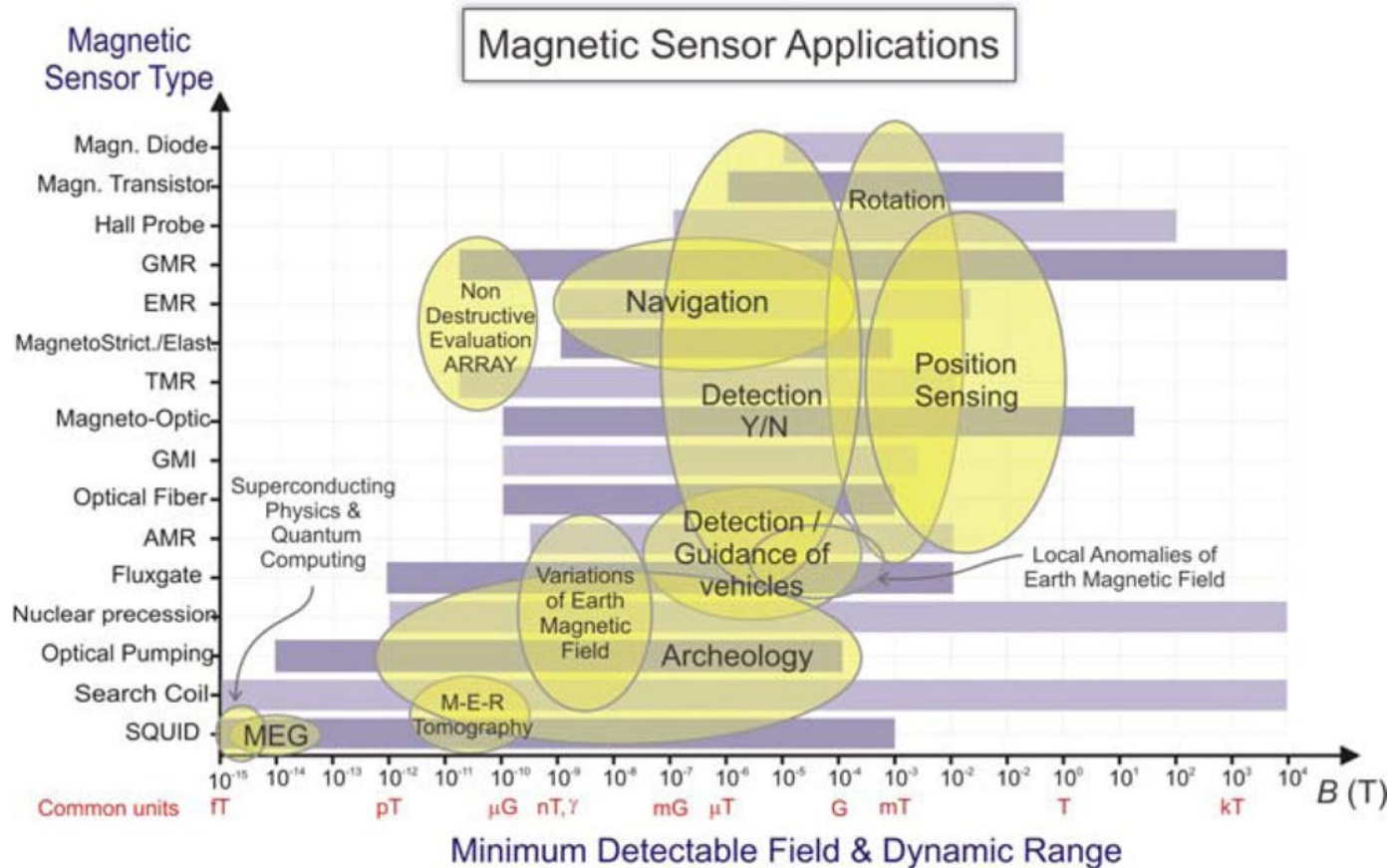


Corps humain : 100 fT à 10 pT

Capteurs des champs magnétiques:



Exactitude et champs mesurables avec différents capteurs magnétiques.



Capteurs, résolutions, plage de mesure (17 ordres de grandeur, de 1 fT à 1000 T), applications.

Microscopie magnétique:

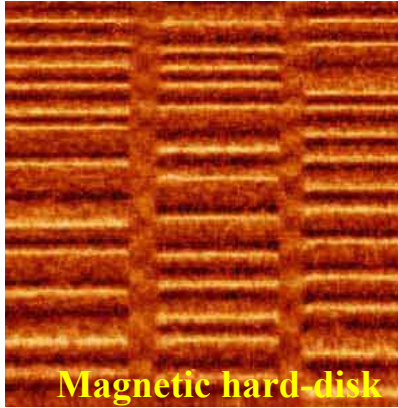


Image obtained by Magnetic Force Microscopy (MFM)



Image obtained by Magnetic Force Microscopy (MFM)

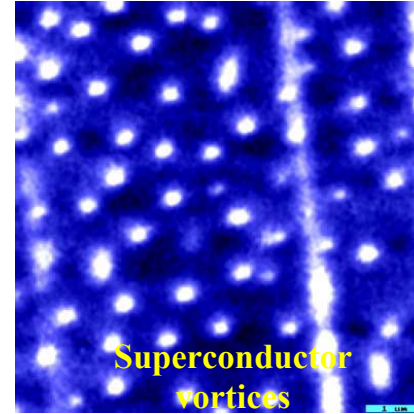


Image obtained by Magnetic Force Microscopy (MFM)

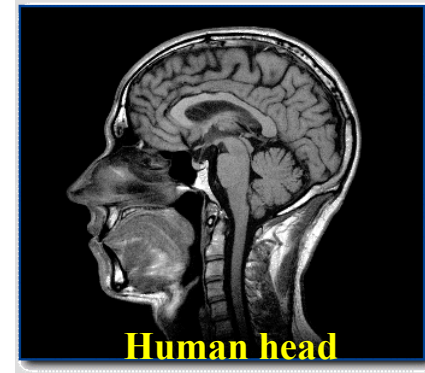


Image obtained by Nuclear Magnetic Resonance Imaging (MRI)

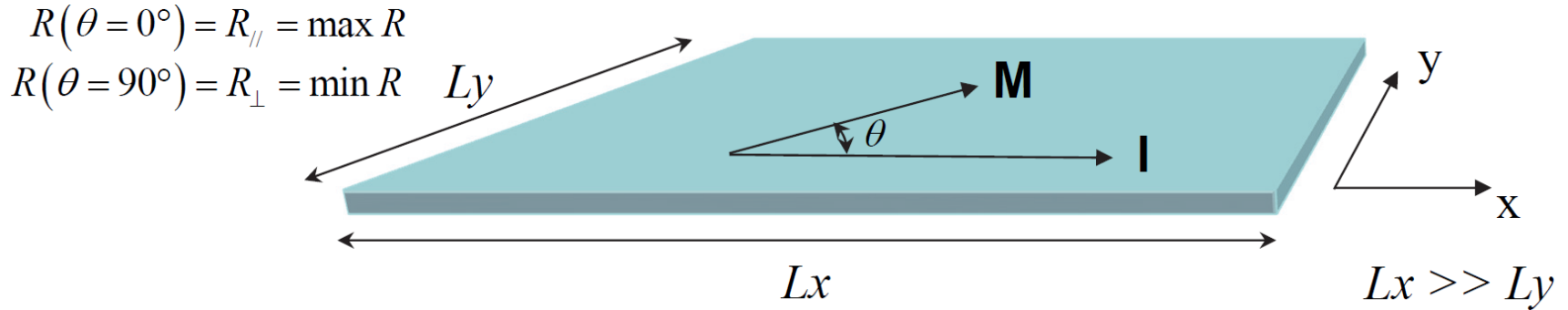
Capteurs magnétorésistifs anisotropes AMR $H_{\text{ext}} \rightarrow \text{rotation de } \mathbf{M} \rightarrow \Delta R$

(AMR: Anisotropic MagnetoResistance)

(\mathbf{M} = aimantation)

Construction: Bande rectangulaire mince ferromagnétique "doux" (e.g., $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$). Les dipôles magnétiques interagissent avec le champ magnétique créé par eux-mêmes. L'alignement des dipôles magnétiques dans la direction «long» de la bande réduit au minimum l'énergie magnétique de la bande (anisotropie de forme). Donc, dans un champ magnétique externe nul, l'aimantation est dans la direction "long" de la couche (qui est aussi la direction du courant imposée depuis l'extérieure).

Principe: En présence du champ magnétique externe à mesurer $\mathbf{H} = H_y \hat{y}$, la direction de l'aimantation \mathbf{M} change. Puisque la résistance de la bande R dépend de l'angle θ entre \mathbf{M} et le courant I , la résistance de la barre dépend de H_y .

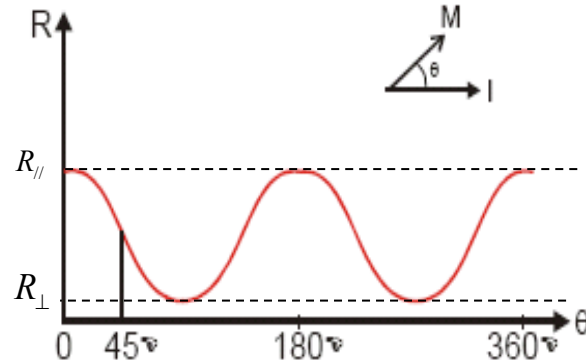


Remarque: L'explication physique selon laquelle la résistance R dépend de la direction du courant I par rapport à la direction de la magnétisation M est relativement complexe et nous ne la détaillons pas dans ce cours.

Variation de la résistance en fonction de l'angle entre courant et vecteur d'aimantation dans un matériau AMR :

$$R(\theta) = R_{//} - \Delta R_{MR} \sin^2 \theta$$

$$R(\theta) = R_{\perp} + \Delta R_{MR} \cos^2 \theta$$



$H_y = 0 \Rightarrow \theta = 0^\circ$ et $R = R_{//}$ (max. R)

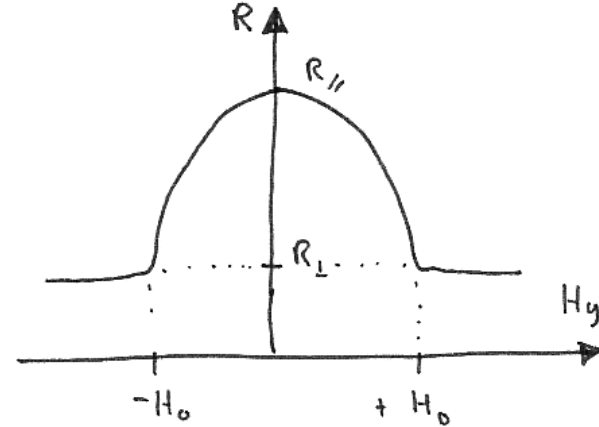
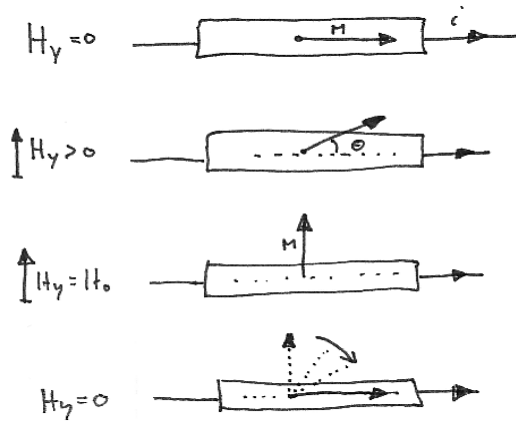
$H_y > H_0 \Rightarrow \theta = 90^\circ$ et $R = R_{\perp}$ (min. R)

Matériau	ρ [$10^{-8} \Omega\text{m}$]	$\Delta\rho/\rho$ [%]	H_0 [A/m]	$\mu_0 M_s$ (T)
Ni ₈₁ Fe ₁₉ (permalloy)	22	2.2	250	1.1
Ni ₈₆ Fe ₁₄	15	3.0	200	0.95
Ni ₅₀ Co ₅₀	24	2.2	2500	1.25
CoFeB amorphe	86	0.07	2000	1.3

Résistivité, variation de la résistance, champ de saturation, et aimantation de saturation.

Angle du vecteur \mathbf{M} pour un H_y externe perpendiculaire

Pour $|H_y| < |H_0|$, $\sin \theta \cong (H_y/H_0) \rightarrow R(H_y) \cong R_{//} - \Delta R_{MR} (H_y/H_0)^2$



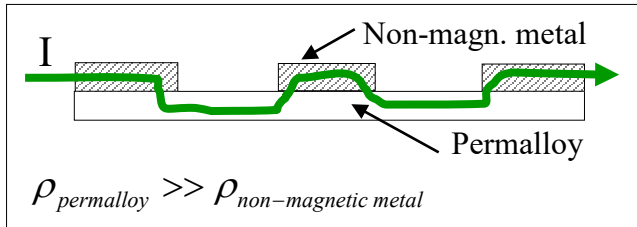
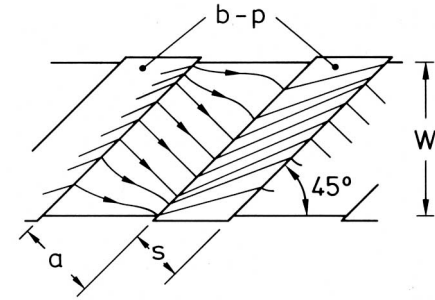
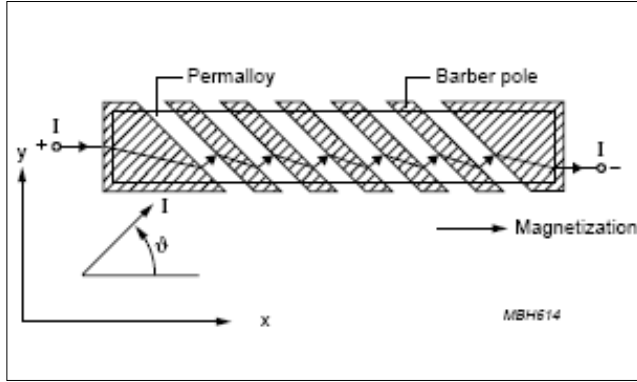
Lorsque $H_y=0$, l'anisotropie de forme tend à aligner le vecteur d'aimantation \mathbf{M} selon l'axe x . Si le courant est aussi selon l'axe x , la résistance est maximum. Un champ externe H_y perpendiculaire à l'axe x tend à faire tourner la magnétisation vers l'axe y et la résistance diminue. Pour un champ $H_y=H_0$ la magnétisation est dans la direction y et la résistance est minimum. Pour un champ $H_y>H_0$ l'angle entre la magnétisation et le courant reste la même (i.e., 90°), donc la résistance reste aussi la même. Par conséquence, la mesure de champs $H_y>H_0$ n'est pas possible.

- Problèmes pour petit H_y : sensibilité très faible (la variation de R est très faible pour un champ H_y proche de zéro), non-linéaire, impossible de déterminer le signe de H_y ($+H_y$ ou $-H_y$ donne la même variation de R).

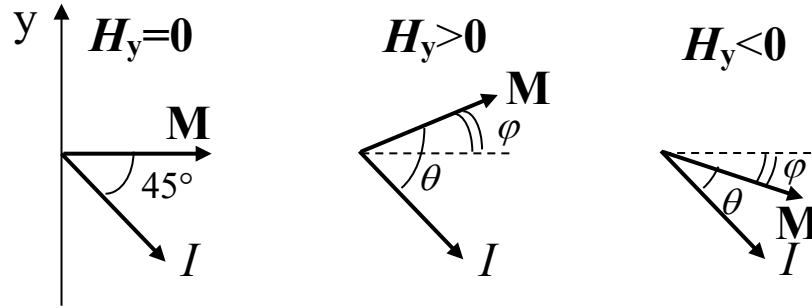
Solution: géométrie en «chevrons».

Géométrie en «chevrons» (barber poles)

Idée: couche AMR + une couche conductrice placée au-dessus et structurée en chevron.



Ligne de courant dans la géométrie "chevrons". Entre les éléments métalliques non-magnétiques (barber poles, souvent en aluminium), le courant passe dans la couche AMR perpendiculairement aux élément métallique non-magnétique (chemin de résistance plus faible), et donc à 45° par rapport à l'axe du barreau et à la magnétisation à $H_y=0$.



$$\text{Si } \theta = \left(\frac{\pi}{4} - \varphi \right) \quad \rightarrow \quad \sin^2 \theta = \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \varphi \right) = \frac{1}{2} (1 - \sin 2\varphi) = \frac{1}{2} \left(1 - 2 \frac{H_y}{H_0} \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2} \right)$$

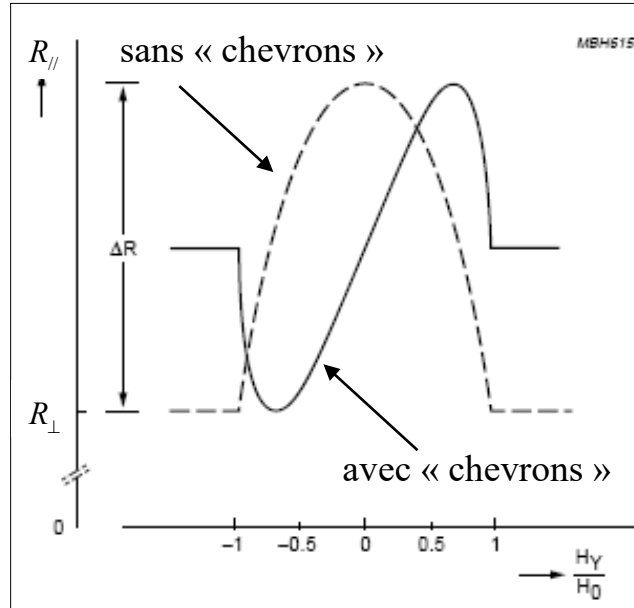
$$(\text{identité trigonométrique : } \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \varphi \right) = \frac{1}{2} (1 - \sin 2\varphi), \sin 2\varphi = 2 \sin \varphi \cos \varphi)$$

$$(\text{relations AMR : } \sin \varphi \cong \frac{H_y}{H_0} \Rightarrow \cos \varphi \cong \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2})$$

$$\text{Champs faibles } (H_y/H_0 < 0.3) \sin^2 \theta \cong \frac{1}{2} \left(1 - 2 \frac{H_y}{H_0} \right) \quad \rightarrow$$

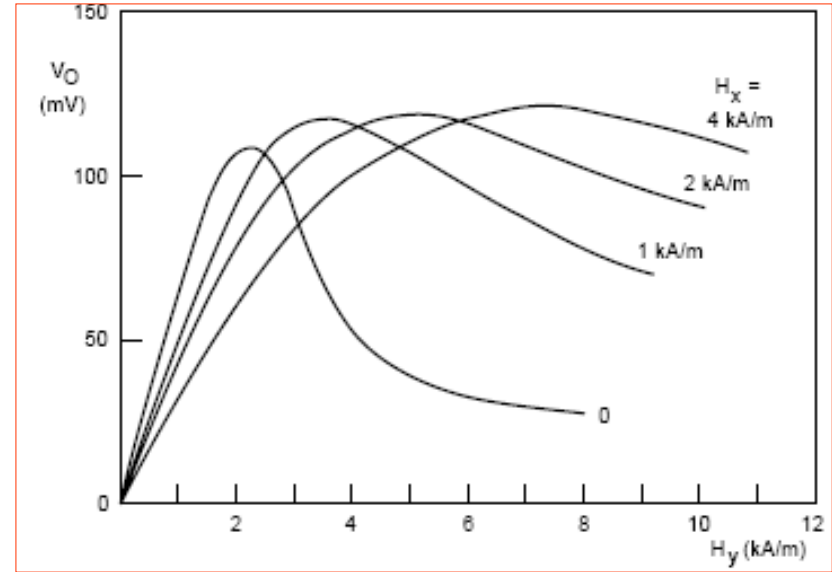
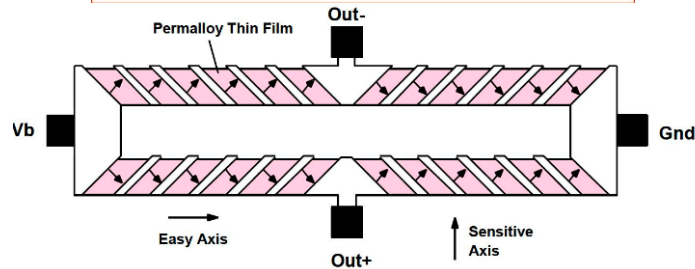
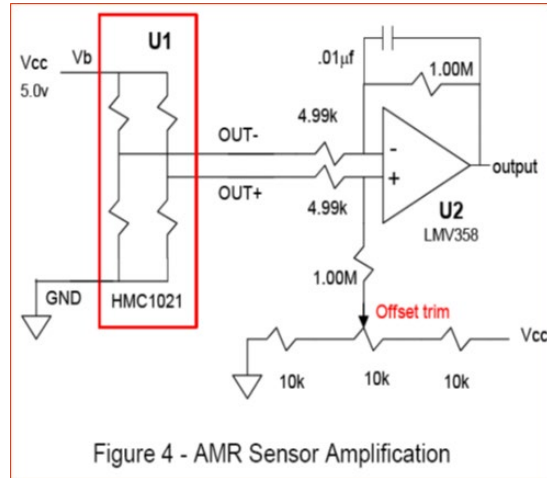
$$\rightarrow \quad R = R_{//} - \Delta R_{MR} \sin^2 \theta \cong R_{//} - \Delta R_{MR} \frac{1}{2} \left(1 - 2 \frac{H_y}{H_0} \right) = R_{//} - \frac{1}{2} \Delta R_{MR} + \Delta R_{MR} \frac{H_y}{H_0} \quad \rightarrow$$

→ Pour faibles champs H_y , le capteur AMR avec géométrie en «chevrons» est sensible, linéaire et capable de déterminer le «signe» du champ H_y .



Variation de la résistance en fonction du champ magnétique H_y avec et sans «chevrons». Pour faible champs magnétiques, le capteur AMR avec configuration en «chevrons» est sensible, linéaire, et capable de déterminer le signe du champ magnétique.

Montage en pont et électronique des AMR.



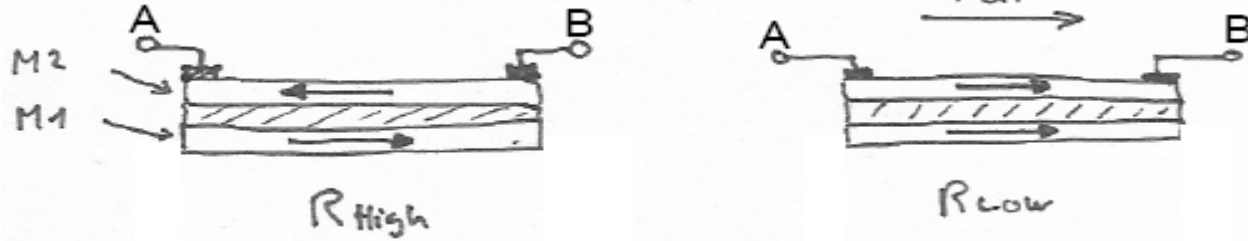
Si on applique un champ additionnel selon x (direction du courant) l'étendue de mesure est plus grande mais la sensibilité à bas champs est plus faible.

Capteurs GMR

$H_{\text{ext}} \rightarrow \text{changement de l'angle entre } M_1 \text{ et } M_2 \rightarrow \Delta R$

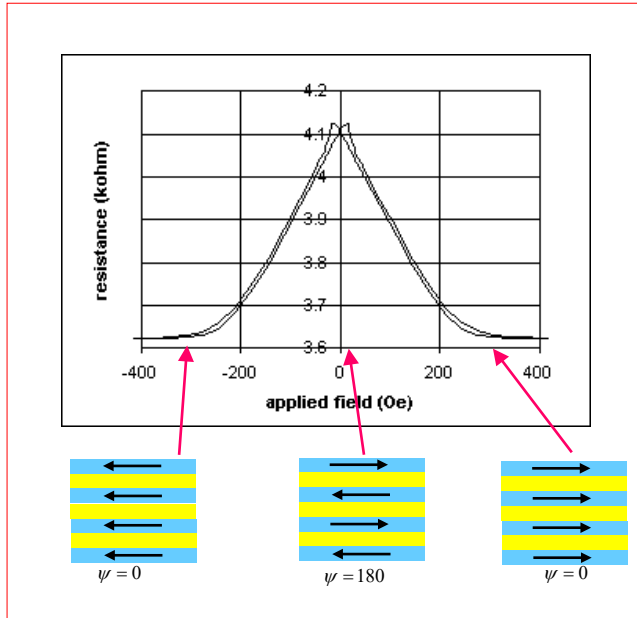
(GMR=Giant MagnetoResistance)

Principe: La résistance dépend de l'angle entre les deux vecteurs d'aimantation.

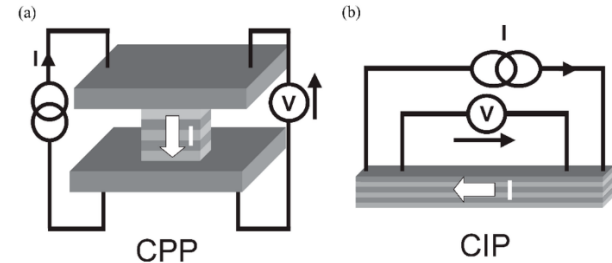


Capteur GMR: les deux couches magnétiques M1 et M2 sont séparées par un conducteur non-magnétique (d'épaisseur inférieure aux libre parcours des électrons pour éviter la perte de polarisation magnétique des électrons dans cette couche par collision avec le réseau d'atomes). L'épaisseur totale du capteur (conducteur ferromagnétique M1 + conducteur non-ferromagnétique + conducteur ferromagnétique M2) est bien plus petite que la distance entre les contacts A et B. Donc le courant est uniformément distribué dans les trois couches. A champ nul, il se produit spontanément un couplage antiparallèle entre M1 et M2 due à l'interaction dipolaire entre les deux couches ferromagnétique (minimisation de l'énergie magnétique totale). Chaque électron est polarisé dans une couche ferromagnétique, passe la couche non-ferromagnétique sans collisions, entre dans l'autre couche ferromagnétique et subit une collision. La probabilité de collision ("diffusion magnétique") dépend du sens de la polarisation de l'électron par rapport à le sens de la magnétisation (l'explication physique est complexe). Par conséquent, la résistance entre les contacts A et B dépend de l'angle entre M1 et M2. Un champ magnétique externe tend à aligner M1 et M2 dans sa direction et donc à changer la résistance.

$$R = R_{\varphi=180^\circ} - \Delta R_{GMR} (1 + \cos \varphi) / 2$$



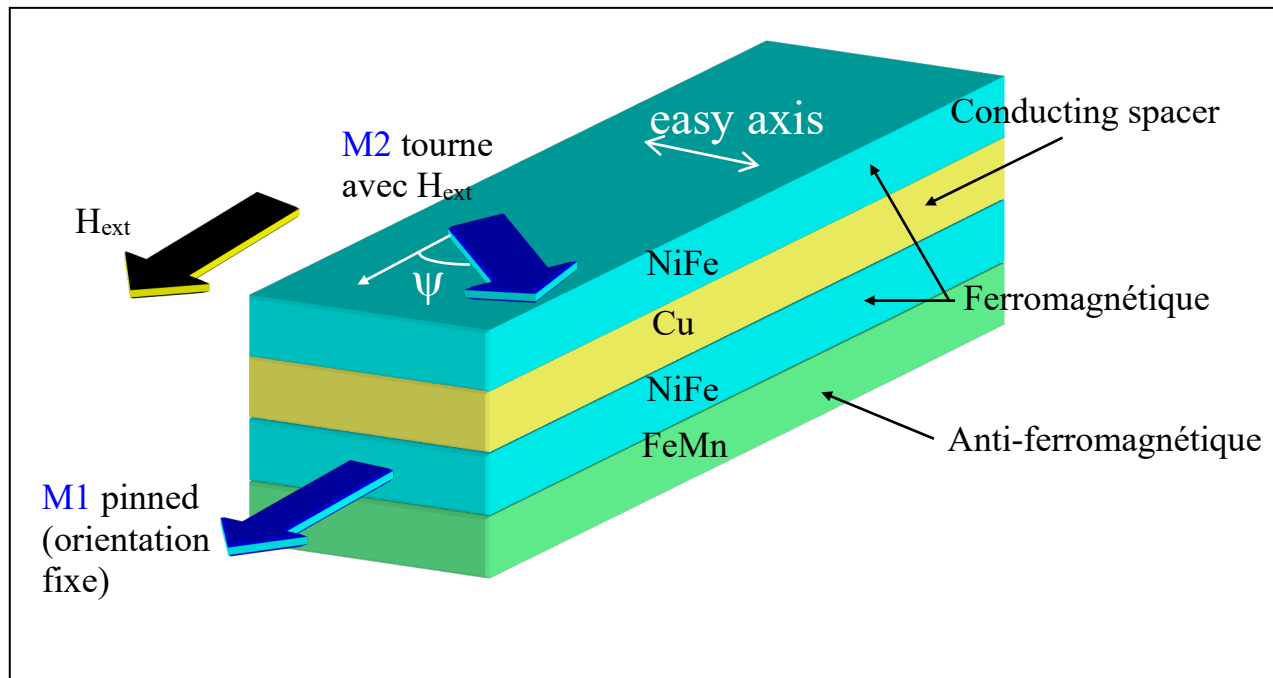
- Deux configurations possible:
1. Current-in-plane (CIP)
 2. Current-perpendicular-to-plane (CPP)



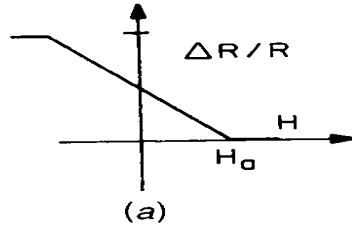
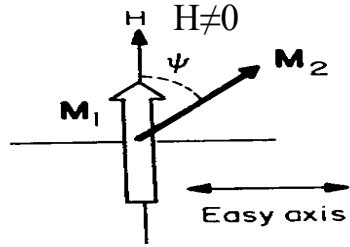
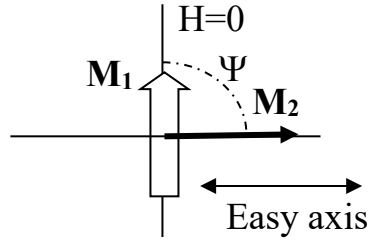
- Multicouches alternées très fines. Exemple: Fe(3 nm)/Cr(0.9 nm)/Fe(3 nm)
- Caractéristiques : R : few $k\Omega$ $\Delta R/R$: -5 à -20%
Etendue de mesure: 0 à 10 mT Résolution: 0.1 nT/Hz^{1/2}
- Applications : capteur de position et vitesse (meilleure résolution que les capteurs Hall et AMR), têtes de lecture pour disque dur magnétique, ... (voir: www.nve.com, www.research.ibm.com,...)

Problème: Comme pour les AMR, impossible de déterminer le signe de H_y ($+H_y$ ou $-H_y$ donne la même variation de R). Comportement complexe (non-linéarités, hystérèses, ...) autour de $H_y=0$.

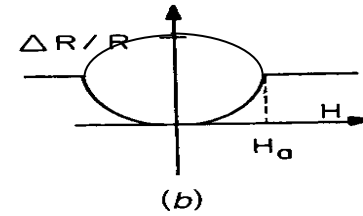
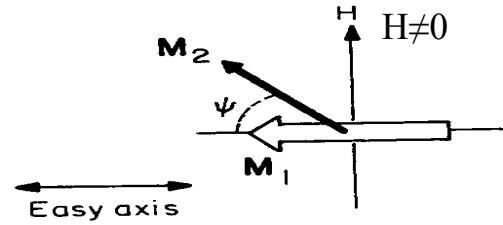
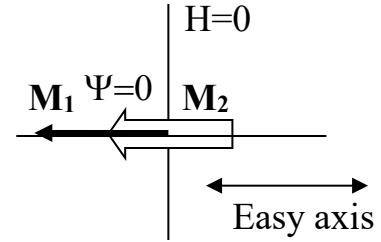
Solution: M1 fixe ("pinned layer"), M2 avec "easy axis" à 90° par rapport a M1 (easy axis=direction de la magnétisation pour $H=0$).



La couche M1 est bloquée dans une direction fixe par la couche antiferromagnétique (explication physique complexe lié à l'interaction d'échange). La couche M2 peut tourner avec le champ externe par rapport à la couche M1, à partir d'un angle de 90° à champ externe nul déterminé par l'«easy axis» du matériau.



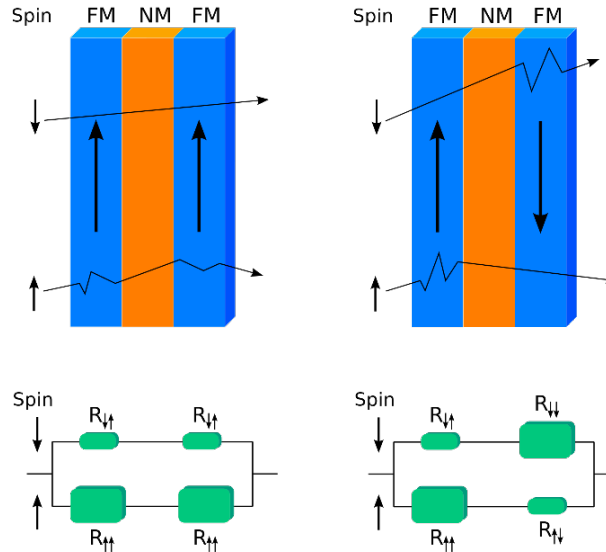
$M_1 \perp (\text{easy axis}) \Rightarrow R(H) \text{ linear}$



$M_1 \parallel (\text{easy axis}) \Rightarrow R(H) \text{ quadratic}$

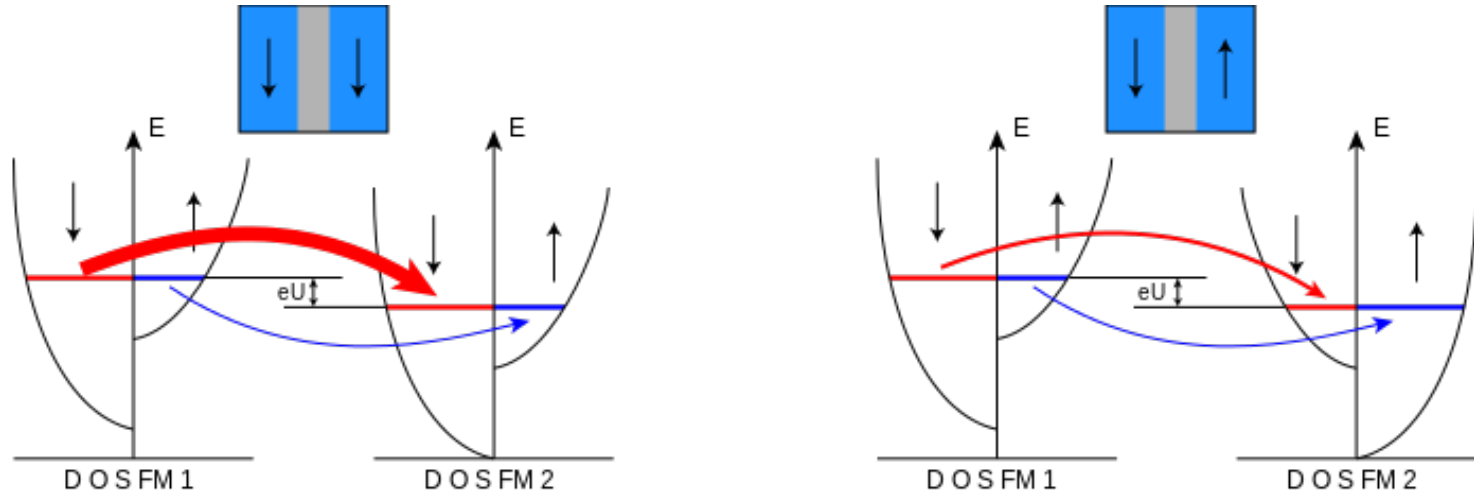
Giant magnetoresistance (GMR) vs Tunnel magnetoresistance (TMR)

Giant magnetoresistance (GMR)



Il est composé de deux couches ferromagnétiques séparées par une couche **conductrice** non ferromagnétique très mince. Un courant d'électrons contient des spins polarisés «up» et «down» en égale abondance. Lorsque ces électrons entrent dans une couche ferromagnétique magnétisée, l'une des polarisations de spin se disperse plus que l'autre. Si les couches ferromagnétiques sont parallèles, les électrons qui n'ont pas été dispersés par la première couche ne le seront pas par la seconde. Le résultat est une résistance totale plus faible. Si les couches sont antiparallèles, chaque polarisation de spin se disperse en quantité égale, puisque chaque électron rencontre une couche parallèle et une couche antiparallèle. La résistance est alors plus élevée que dans la configuration parallèle.

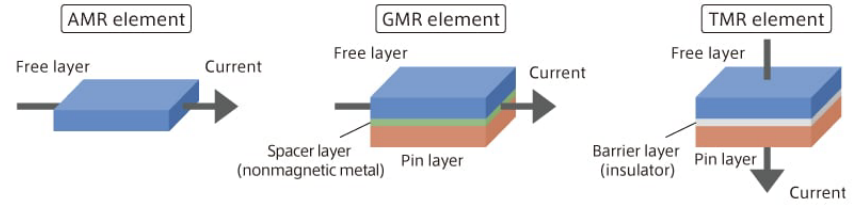
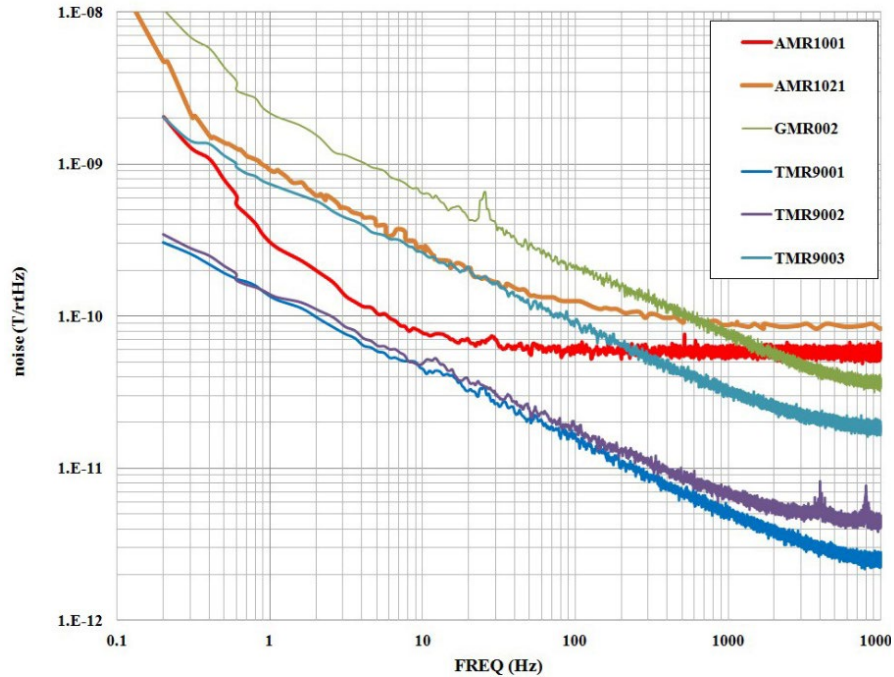
Tunnel Magnetoresistance (TMR)



Il est constitué de deux couches magnétiques séparées par une couche mince **isolante** non ferromagnétique. Le courant tunnel dépend de l'orientation relative des deux couches ferromagnétiques. Dans un ferromagnétique magnétisé, la densité d'états diffère entre «spin up» et «spin down», provoquant l'aimantation intrinsèque du matériau. L'aimant a plus d'états disponibles pour une orientation du spin que l'autre. Quand une tension de polarisation est appliquée à travers la barrière, les électrons traversent la barrière, par effet tunnel, en fonction de la disponibilité des états libres avec la même polarisation de l'autre côté. Si les deux couches magnétiques sont parallèles, la majorité des électrons dans une trouve de nombreux états d'orientation similaire disponible dans l'autre, provoquant un fort courant de tunnel (faible résistance). Se ils sont antiparallèles la résistance est plus élevée. L'effet TMR est plus grand que l'effet GMR d'un facteur 10 environ. Les capteurs TMR sont également utilisés dans les disques durs.

Remarque: La physique requise pour comprendre en détail les principes de fonctionnement des capteurs AMR, GMR et TMR est complexe. Dans ce cours, nous ne décrivons que très "qualitativement" leur principe de fonctionnement.

Résolution typique des capteurs AMR, GMR, TMR



AMR : Anisotropic magneto-resistance

$$B_{\min} \cong 80 \frac{\text{pT}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

GMR: Giant magneto-resistance

$$B_{\min} \cong 20 \frac{\text{pT}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

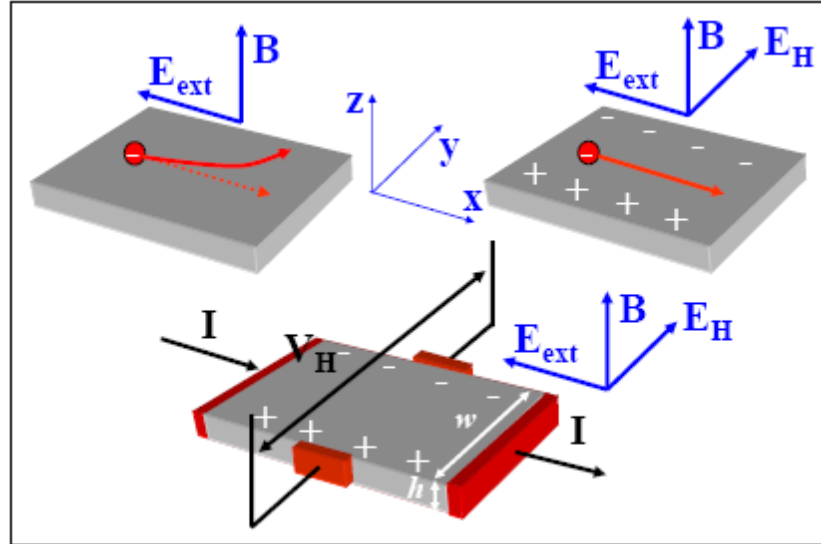
TMR: Tunneling magneto-resistance

$$B_{\min} \cong 2 \frac{\text{pT}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

Capteurs à effet Hall

$$\Delta B \rightarrow \Delta V$$

Principe :



Force de Lorentz :

$$\mathbf{F} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \wedge \mathbf{B})$$

$$F_x = e(E_x + v_y B_z - v_z B_y)$$

$$F_y = e(E_y - v_x B_z + v_z B_x)$$

$$F_z = e(E_z + v_x B_y - v_y B_x)$$

Transport :

$$\mathbf{F} = m\dot{\mathbf{v}} = m\Delta\mathbf{v} / \Delta t \cong m\mathbf{v} / \tau$$

(τ : temps entre deux collisions, \mathbf{v} : vitesse de drift)

$$mv_x / \tau = e(E_x + v_y B_z - v_z B_y)$$

$$mv_y / \tau = e(E_y - v_x B_z + v_z B_x)$$

$$mv_z / \tau = e(E_z + v_x B_y - v_y B_x)$$

Courant zéro dans les directions y et z : $v_y \cong v_z \cong 0$

$$mv_x / \tau = eE_x$$

$$0 = e(E_y - v_x B_z)$$

$$0 = e(E_z + v_x B_y)$$

Et donc :

$$v_x = \frac{e\tau}{m} E_x$$

$$E_y = v_x B_z$$

Tension de Hall :

$$V_H = \int_{-w/2}^{w/2} E_y dy = v_x B_z w = \frac{\mu\rho}{h} IB_z = \frac{1}{neh} IB_z$$

avec les définitions :

w: largeur

h: épaisseur

n: densité de charge

$$\mu \equiv \frac{v_x}{E_x} = \frac{e\tau}{m}$$

(μ : mobilité)

$$\rho \equiv \frac{m}{en\tau} = \frac{1}{\mu n} \quad (\rho : \text{résistivité})$$

$$J \equiv env_x$$

(J : densité de courant)

$$I \equiv Jwh$$

(I : courant)

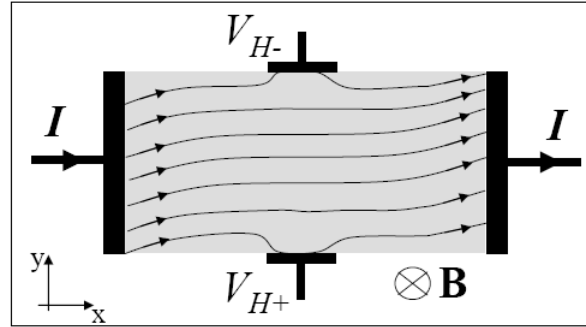
$$\text{Signal : } V_H = \frac{1}{enh} IB = S_I IB = SB$$

$$S_I \equiv \frac{1}{enh} : \text{sensibilité en courant, en V/AT})$$

$$S \equiv \frac{1}{enh} I : \text{sensibilité, en V/T}$$

donc V_H ne dépend pas, en première approx., de la surface du capteur mais seulement de son épaisseur.

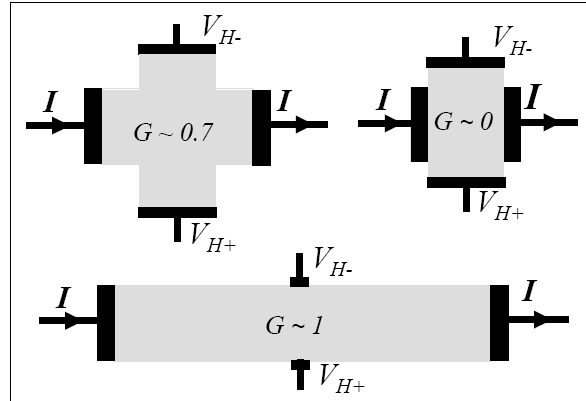
Facteur géométrique



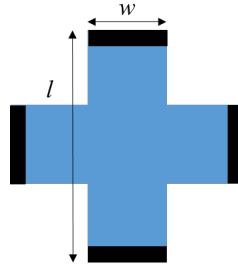
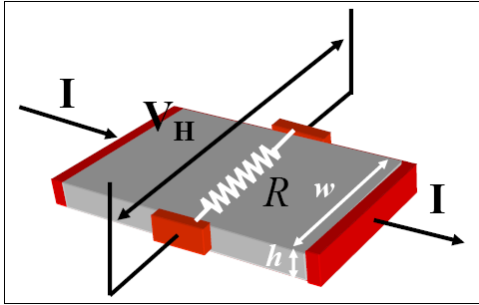
Courant dans un capteur Hall. L'approximation $v_y=0$ est raisonnable mais pas exact par tout.

La «vrai» tension Hall est : $V_H = G \frac{1}{nqh} IB_z$

G : dépend de la géométrie (facteur géométrique).



Bruit et résolution:



Signal : $V_H = \frac{1}{enh} IB = S_I IB = SB$

$S_I \equiv \frac{1}{enh}$: sensibilité en courant, en V/AT)

$S \equiv \frac{1}{enh} I$: sensibilité, en V/T

Bruit : $V_{n,rms} = \sqrt{4kRT\Delta f}$

(Bruit thermique)

Résolution : $B_{\min} = \frac{V_{n,rms}}{V_H / B} = \frac{\sqrt{4kRT\Delta f}}{S_I I}$

Pour une géométrie a croix symétrique: $B_{\min} = \frac{\sqrt{4kRT\Delta f}}{S_I I} = \sqrt{4kT\Delta f} \frac{\rho l}{wh} \frac{enh}{I} = e\sqrt{4kT\Delta f} \sqrt{\frac{n}{\mu} \frac{hl}{w}} \frac{1}{I}$

Pour obtenir une bonne résolution il faut:

1. un matériau à haute mobilité (μ grand)
2. un dopage faible (n petit)
3. une petite épaisseur h
4. un grand I

mais I (et aussi n et h) est limité par :

1. l'échauffement
2. la puissance disponible
3. la saturation de la vitesse de porteur de charge (électrons ou trous)
4. le bruit $1/f$ ($\propto I$)

$$\text{Si } P \text{ est fixé } P = RI^2, I = \sqrt{P/R}, B_{\min} \propto \frac{\sqrt{R}}{S_I I} = \frac{R}{S_I \sqrt{P}} = \frac{\rho l}{wh} \frac{neh}{\sqrt{P}} \propto \frac{1}{\mu} \frac{1}{\sqrt{P}}$$

(donc seulement μ est, à puissance constante, important pour obtenir une bonne résolution).

Mobilité dans quelques semiconducteurs:

InAs	$\mu_n = 3.3 \text{ m}^2/\text{Vs}$
InSb	$\mu_n = 8 \text{ m}^2/\text{Vs}$
Si (faiblement dopé)	$\mu_n = 0.14 \text{ m}^2/\text{Vs}$

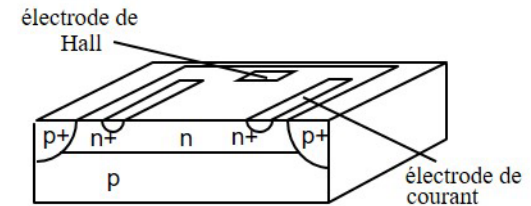
Le silicium (Si) a une mobilité relativement faible, mais la majorité des capteurs Hall sur le marché sont en silicium. La raison en est que le capteur Hall en silicium peut être réalisé avec une technologie CMOS peu coûteuse qui permet d'intégrer sur la même puce également l'électronique (analogique et numérique) du capteur.

Fabrication des capteurs Hall en silicium

Technologie sans «gate»:

Caractéristiques: $h \sim 1 \text{ à } 20 \text{ } \mu\text{m}$
Sensibilité typique $S_H \sim 300 \text{ V/AT}$

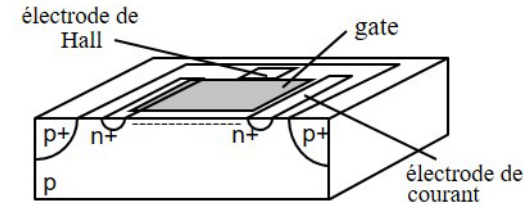
Très utilisé dans les capteurs sur le marché.



Technologie avec «gate»:

Caractéristiques: $h \sim 0.01 \text{ } \mu\text{m}$
mobilité faible
bruit 1/f grand
Sensibilité typique $S_H \sim 1000 \text{ V/AT}$

En changeant la tension de «gate» on change le nombre de porteurs de charge et, donc, la sensibilité (intéressante propriété mais peu utilisé dans les capteurs sur le marché).



Les capteurs Hall sont fabriqués en très grande quantité ($>10^6/\text{jour}$).

Applications : fermeture de clapet de natel et d'ordinateur portable, claviers d'ordinateurs, commutation des transistors dans les moteurs DC, capteur de position angulaire et de vitesse,

Magnétorésistance (dans un semi-conducteur)

$B \rightarrow \Delta R$

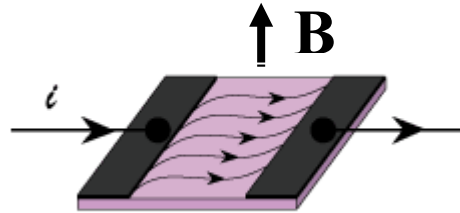
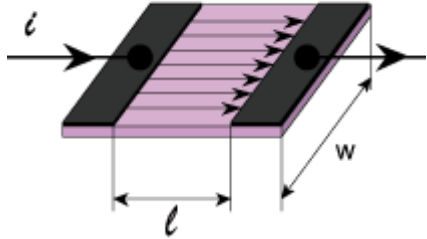


Illustration de l'effet de magnétorésistance lors de l'application d'un champ magnétique. A cause de la force de Lorentz les trajectoires des électrons sont plus long, donc plus grande résistance.

$$R_B \cong R_0 \left(1 + m (\mu B)^2 \right)$$

R_B : Resistance at magnetic field B (Ω)

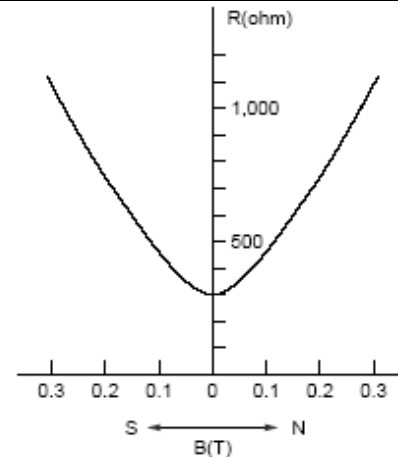
R_0 : Resistance at $B=0$ (Ω)

μ : Charge carriers mobility (m^2/Vs)

B : Magnetic field (T)

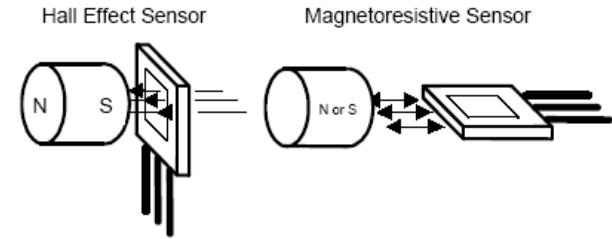
m : Geometrical factor depending on l/w (-)
($m=1$ for $l/w \ll 1$)

- Effet d'origine: force de Lorentz sur les électrons.
- A ne pas confondre avec l'effet AMR dans les matériaux ferromagnétiques.
- Dépend de la mobilité (donc bien dans les éléments tels que InSb avec grande mobilité, $\mu=8 \text{ m}^2/\text{Vs}$).

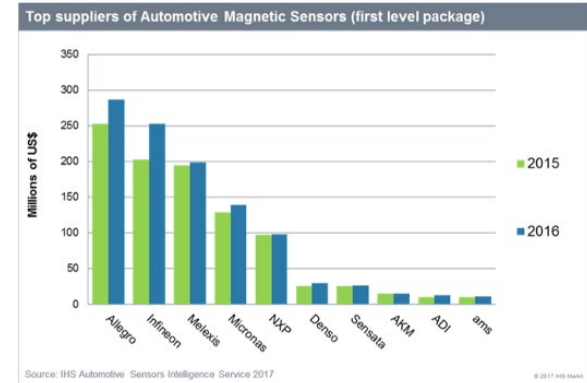


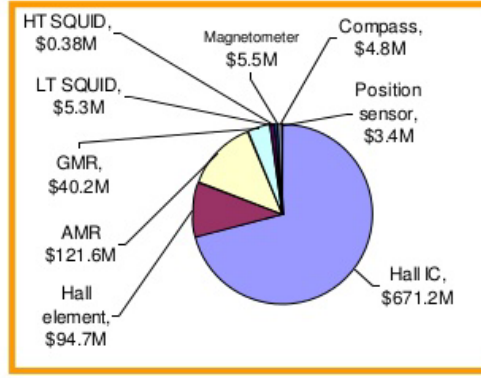
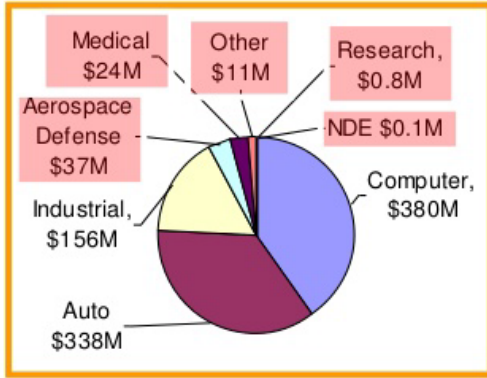
Variation de R en B^2 (ne mesure pas la direction du champ magnétique)

Applications des capteurs AMR, GMR, et Hall



Technology	Hall Effect	AMR	GMR	TMR
Power Consumption (mA)	5 ~ 20	1 ~ 10	1 ~ 10	0.001 ~ 0.01
Die Size (mm ²)	1 × 1	1 × 1	1 × 2	0.5 × 0.5
Field Sensitivity (mV/V/Oe)	~ 0.05	~ 1	~ 3	~ 100
Dynamic Range (Oe)	~ 10000	~ 10	~ 100	~ 1000
Resolution (nT/Hz ^{1/2})	>100	0.1 ~ 10	1 ~ 10	0.1 ~ 10
Temperature Performance (°C)	< 150	< 150	< 150	< 200

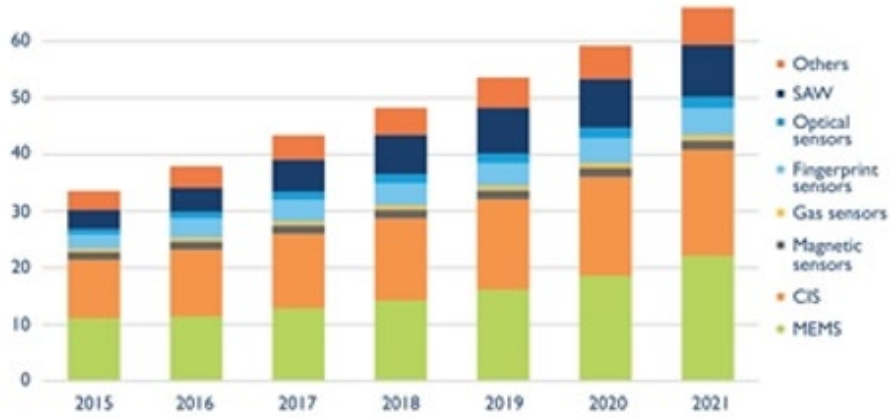




Worldwide **magnetic sensors** revenue (2005)

Total: 1 B\$ (2005)

Growth: 10%/year

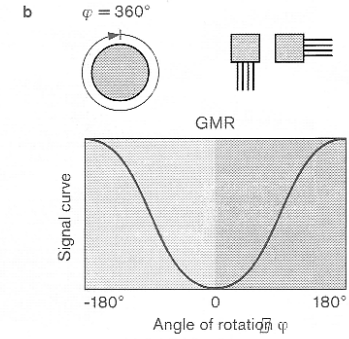
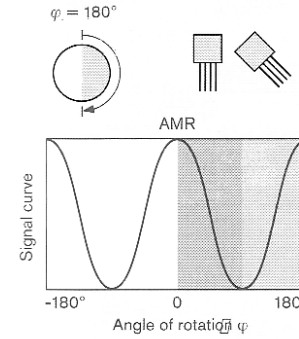
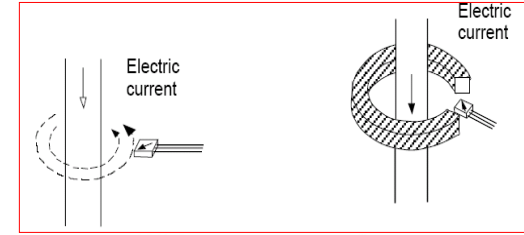
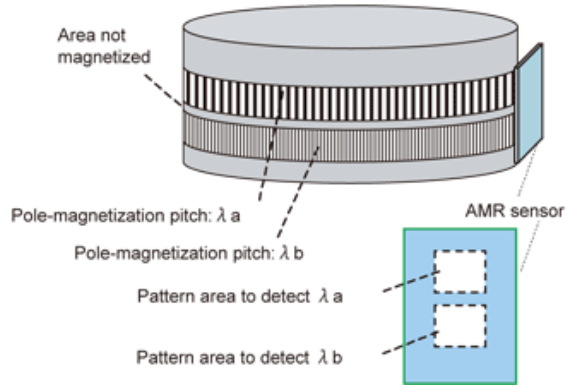
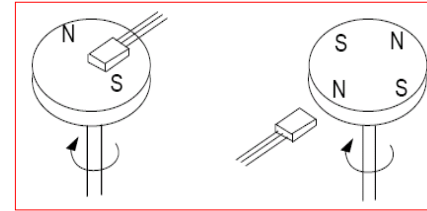
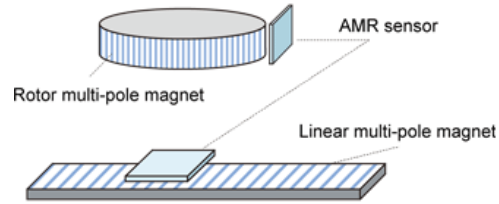


Worldwide **sensors** revenue (2017)

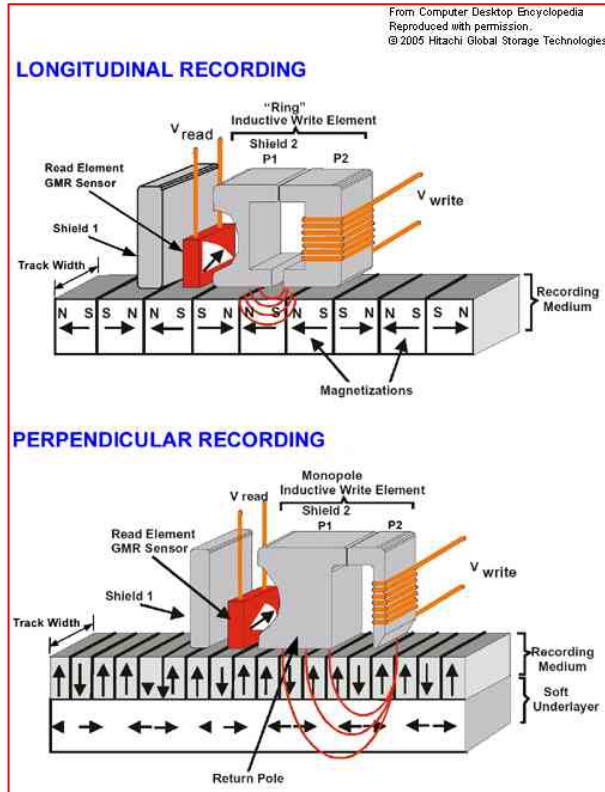
Total: 45 B\$ (2017)

Growth: 5%/year

1. Capteurs de position lineaire, position angulaire, et de courant avec AMR et GMR

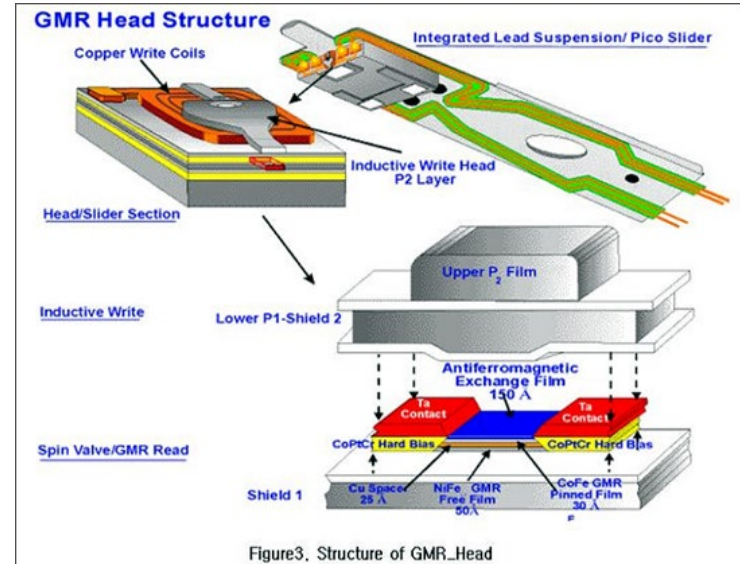


2. Têtes de lecture des Hard Disks GMR.

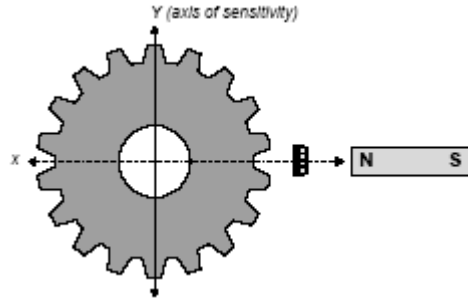


Note 1: Si le champ B est plus grand du champ coercitif, on change l'aimentation du domaine. Dans le cas du «perpendicular recording» le champ «de retour» doit être plus faible du champ coercitif (pour éviter de changer les données).

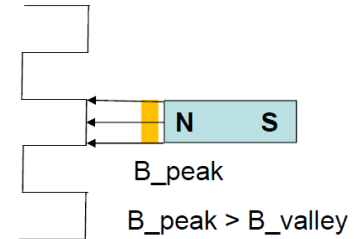
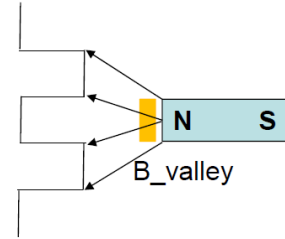
Note 2 : pour les hard disk la bande passante est très grande (pour lire et écrire rapidement) mais le bruit $1/f$ n'est pas important.



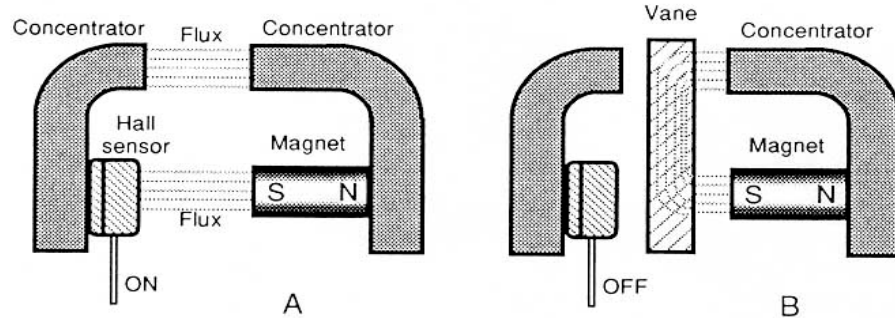
3. Capteur de vitesse angulaire Hall



Roue magnétique «soft», capteur Hall, aimant permanent.



4. Microcontacteur «switch» Hall



Fruton, 286

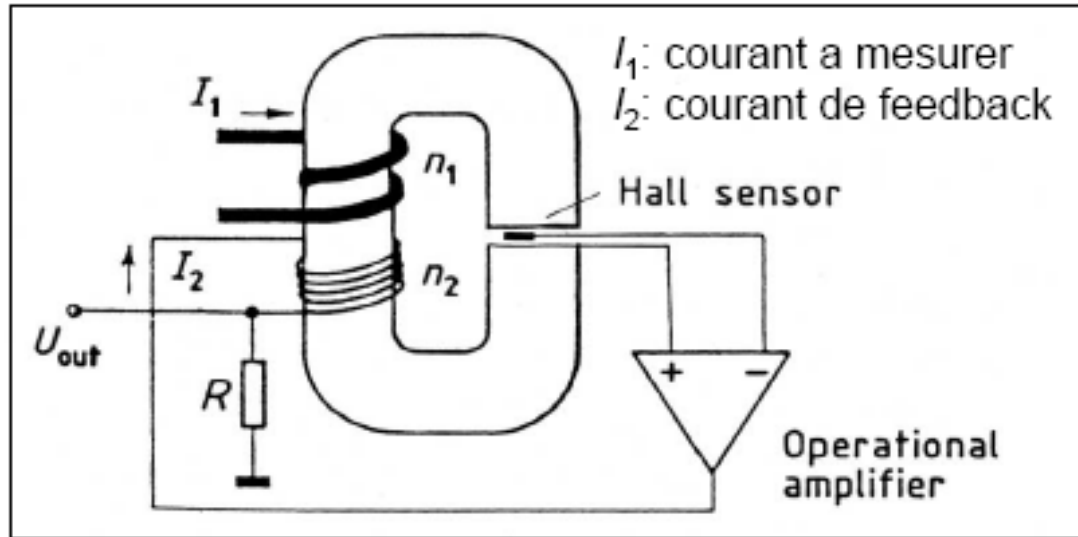
The Hall effect sensor in the interrupter switching mode
A: The magnetic flux turns the sensor on; B: the magnetic flux is shunted by a vane

7. Capteur de courant avec capteur Hall

Principe: mesure du champ magnétique produit par le courant avec un capteur Hall. Pour obtenir un champ magnétique plus grand avec le même courant (et donc meilleure résolution dans la mesure du courant), un circuit magnétique avec matériau ferromagnétique doux est utilisé.

Problème : circuit magnétique en matériau ferromagnétique doux \rightarrow hystérèse et non-linéarité.

Solution : contre-réaction pour garder la magnétisation (et le champ magnétique) à zéro.



Note : $n_2 \gg n_1$, afin de produire le contre-champ avec un courant beaucoup plus faible par rapport à celui que nous voulons mesurer.

- Application : compteur d'électricité domestique.

Capteur de débit

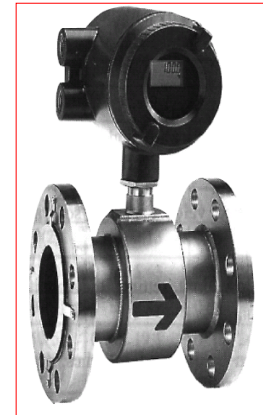
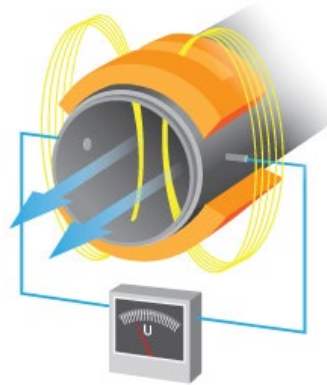
$$\Delta v \rightarrow \Delta V$$

Principe: Le principe de fonctionnement est basé sur la force de Lorentz agissant sur les particules chargées en mouvement (comme pour le capteur Hall). Cependant, ici le but n'est pas de mesurer un champ magnétique mais de mesurer le débit dans un champ magnétique connu.

Force exercée sur les ions :

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\Delta V \propto v_{\text{fluid}} B$$



(voir aussi vidéos et documentation Endress+Hauser (<http://www.endress.com>))

- Applications : industries diverses (alimentaires, etc.), mesure d'écoulement dans les conduites de forces dans les barrages,

Alternatives pour la mesure du débit: Vortex, Coriolis, thermique, ultrasons,



Electromagnetic



Vortex



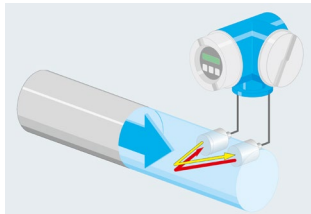
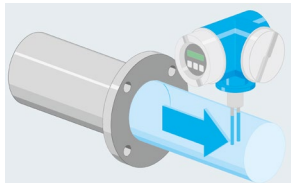
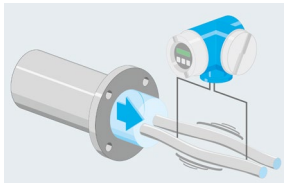
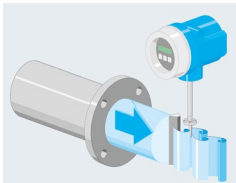
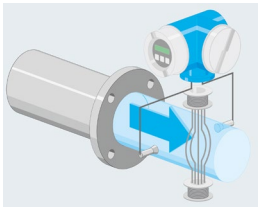
Coriolis



Thermal



Ultrasonic

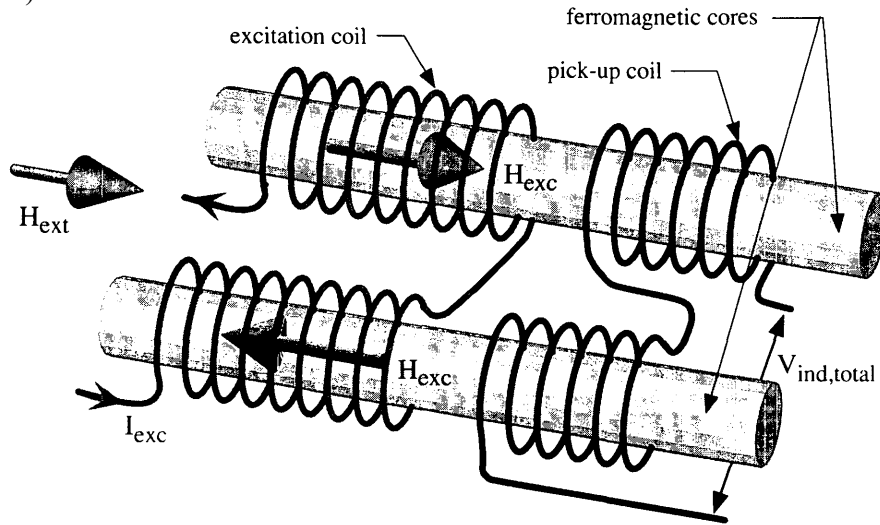


Fluxgate

$$\Delta H \rightarrow \Delta \Phi \rightarrow \Delta V_{\text{ind}}$$

Principe :

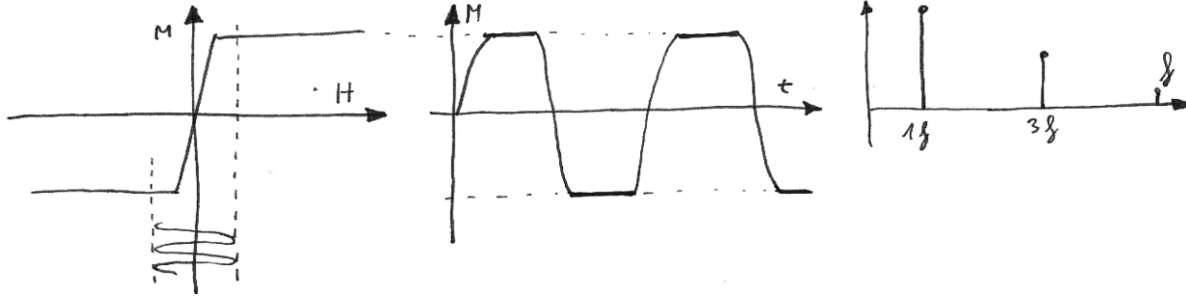
- Saturation/désaturation de la magnétisation d'un noyau ferromagnétique doux grâce à un champ alternatif H_{exc} produit par un courant alternatif dans une bobine d'excitation (excitation coil).
- Mesure de la tension induite aux bornes de la bobine de détection (pick-up coil).
- Si le champ magnétique externe H_{ext} est nul, la magnétisation (e la tension induite) contient seulement des harmoniques impaires.
- Si le champ magnétique externe H_{ext} est non-nul, la magnétisation (e la tension induite) contient aussi des harmoniques paires.
- L'amplitude de la deuxième harmonique est proportionnelle à H_{ext} .
- f)



Montage différentielle du fluxgate. Deux barreaux ferromagnétiques doux avec deux bobines (une bobine excitatrice et une bobine détectrice)

$$H_{ext} = 0$$

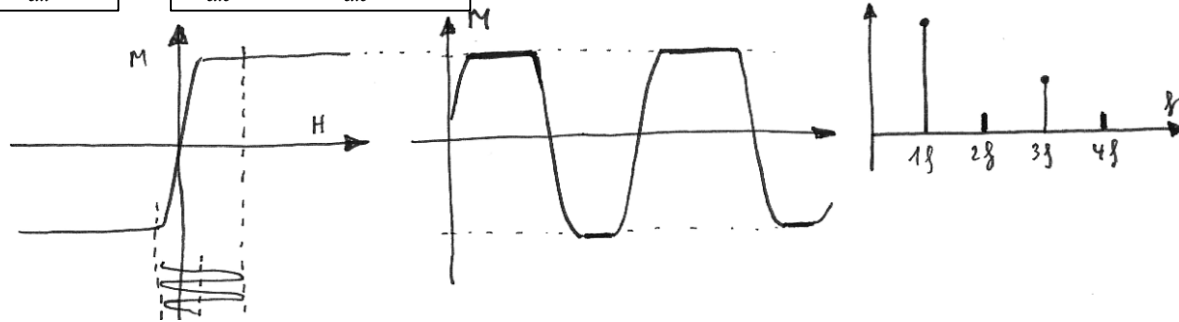
$$H_{exc}(t) = H_{exc} \sin \omega t$$



Sans champ externe, le champ oscillant d'excitation H_{exc} provoque une saturation symétrique de la magnétisation (qui donc est une somme d'harmoniques impaires).

$$H_{ext} \neq 0$$

$$H_{exc}(t) = H_{exc} \sin \omega t$$



Avec un champ externe H_{ext} , le champ total ($H_{ext} + H_{exc}$) provoque une saturation asymétrique de la magnétisation (qui donc contient aussi des harmoniques paires).

Théorie élémentaire :

Champ à mesurer : H_{ext}

Champ d'excitation : $H_{exc} \sin \omega t$

Champ total: $H = H_{ext} + H_{exc} \sin \omega t$

Hypothèse sur la non-linéarité de M (simplification):

$$B = \mu_0 (H + M) \cong \mu_0 (H + \mu_{rmax} H - \alpha H^3) \cong \mu_0 \mu_{rmax} H - \alpha H^3 \quad (\text{for } \mu_{rmax} \gg 1)$$

donc

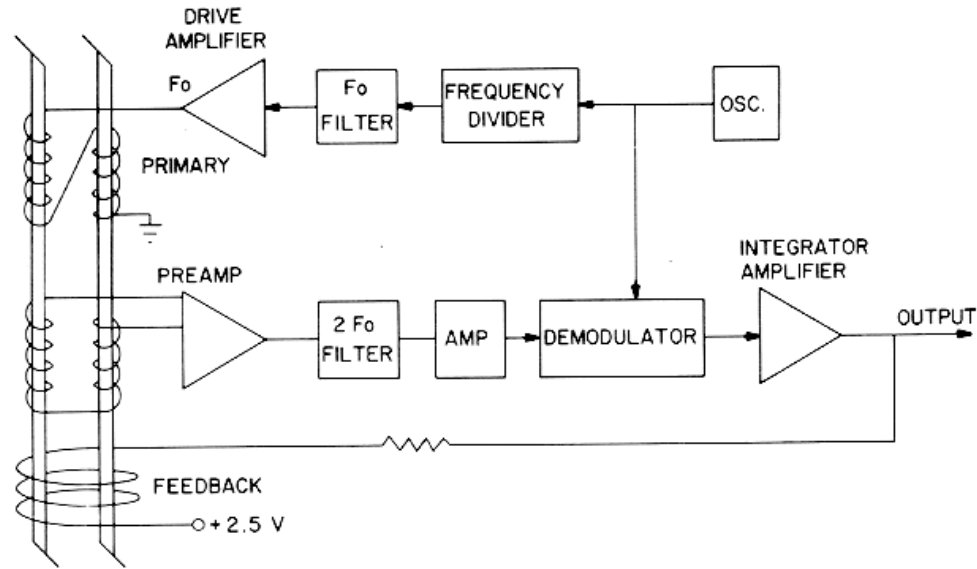
$$B = \underbrace{\mu_{max} H_{ext}}_{DC} + \underbrace{\mu_{max} H_{exc} \sin \omega t}_f - \underbrace{\alpha H_{ext}^3}_{DC} - \underbrace{3\alpha H_{ext}^2 H_{exc} \sin \omega t}_f - \underbrace{3\alpha H_{ext} H_{exc}^2 \sin^2 \omega t}_{2f} - \underbrace{\alpha H_{exc}^3 \sin^3 \omega t}_{3f} \text{ avec } \mu_0 \mu_{rmax} \equiv \mu_{max}.$$

La tension induit dans la bobine secondaire (pick-up coil) est :

$$\begin{aligned} V_{ind} &= -\frac{d\phi_B}{dt} = A \frac{dB}{dt} = \\ &= \underbrace{\mu_{max} H_{exc} \omega \cos \omega t}_f - \underbrace{3\alpha H_{ext}^2 H_{exc} \omega \cos \omega t}_f - \underbrace{6\alpha H_{ext} H_{exc}^2 \omega \sin \omega t \cos \omega t}_{2f} - \underbrace{3\alpha H_{exc}^3 \omega \cos \omega t \sin^2 \omega t}_{3f} \end{aligned}$$

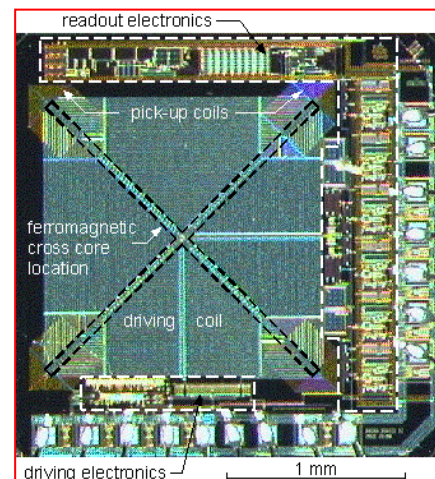
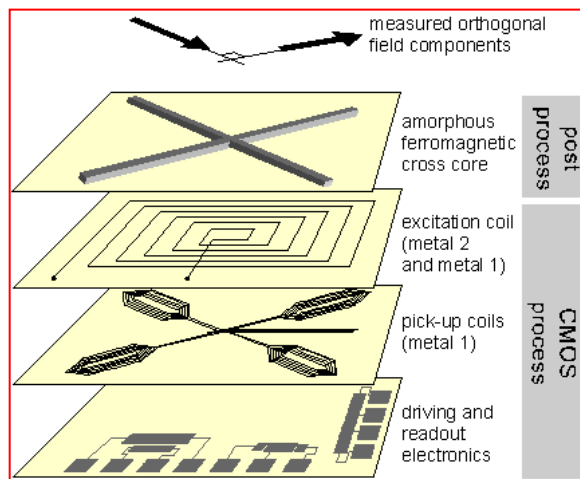
On remarque que la composante à $2f$ est directement proportionnelle à H_{ext} . Pour mesurer le champ $H_{ext} \rightarrow$ détection de la seconde harmonique à $2f$ avec démodulation synchrone.

Démodulation synchrone pour capteur fluxgate:



L'oscillateur génère un signal à $2f_0$. Le diviseur de fréquence produit un signal d'excitation à fréquence f_0 . Le multiplicateur (démodulateur) avec le filtre passe-bas (intégrateur) détecte la composante à $2f_0$. Eventuellement, la sortie du filtre passe-bas peut être utilisée pour un feedback (linéarisation de la réponse).

- Utilisé pour la mesure de champs faibles (monitoring du champ magnétique proche d'aimant pour MRI, Geomagnetism, boussole électronique, ...)
- Voir: www.walkerldjscientific.com, www.meda.com, www.bartington.com, www.stefan-mayer.com, ..



Fluxgate intégré CMOS.

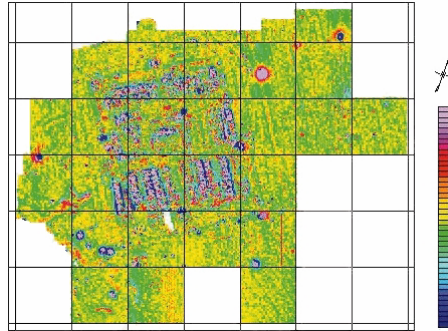
Specifications

Range switch	$\pm 2 \mu\text{T}$, $\pm 20 \mu\text{T}$, $\pm 200 \mu\text{T}$
Highest resolution	1 nT
Accuracy at 20 °C	$0.5 \% \pm 5 \text{ nT} \pm 1 \text{ Digit}$
Temperature range	0 to 50 °C
Zero drift	<0.1 nT/K
Analog output	0.01 V/ μT , 0.1 V/ μT , 1 V/ μT dep. on pos. of range switch, BNC-socket
Bandwidth	0 to 1 kHz (-3 dB)
Noise	<0.7 nT RMS ($0.1 \text{ Hz} < f < 200 \text{ Hz}$), typ. 20 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at $f = 1 \text{ Hz}$

Fluxgate de Stefan Meyer Instruments

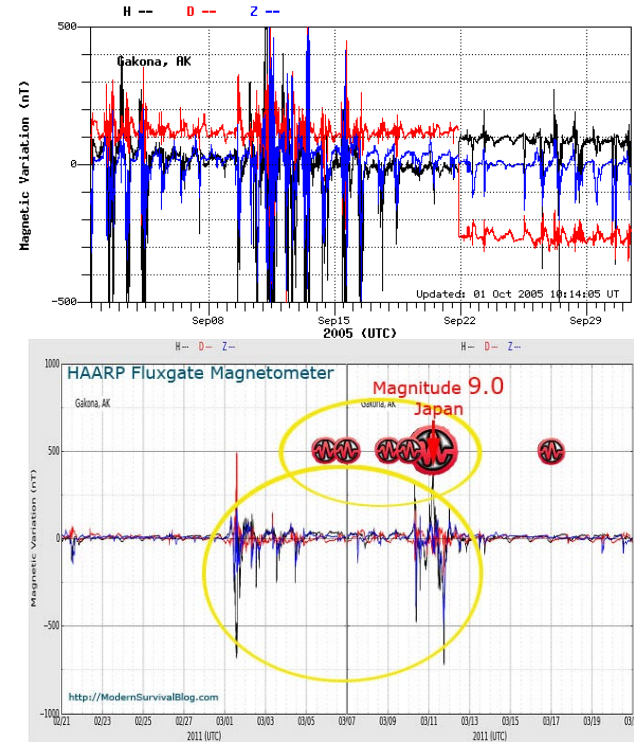


Archéologie



Deux tubes de 1 m de long, distants 1 m. Chacun contient deux flux gates, une à chaque extrémité du tube. Les détecteurs supérieurs rejettent le «fort» champ terrestre dépendant du temps (environ 40000 nT) et isolent les très petites variations causées par les «objets» archéologiques (jusqu'à 0,1 nT).

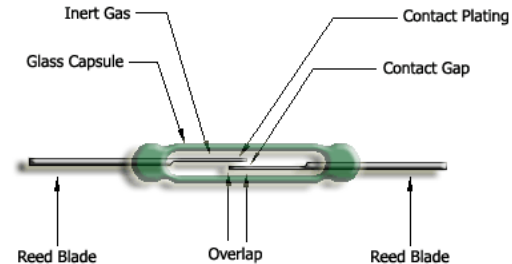
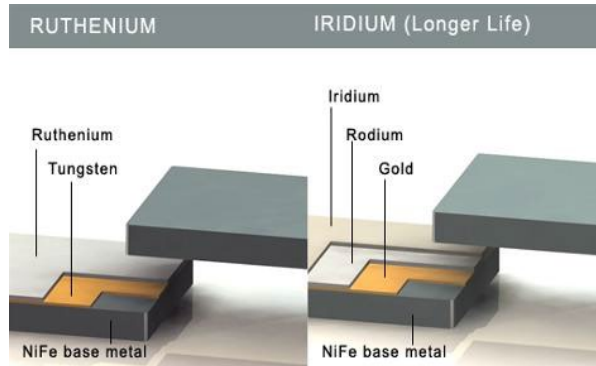
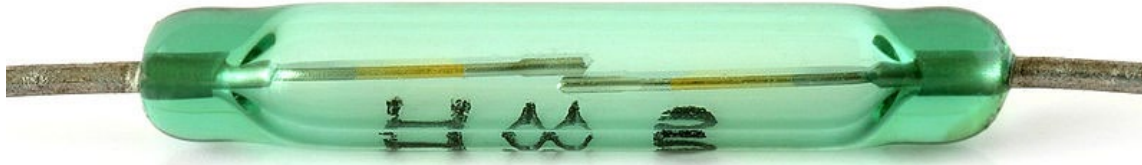
Géomagnétisme (Gakona, Alaska)

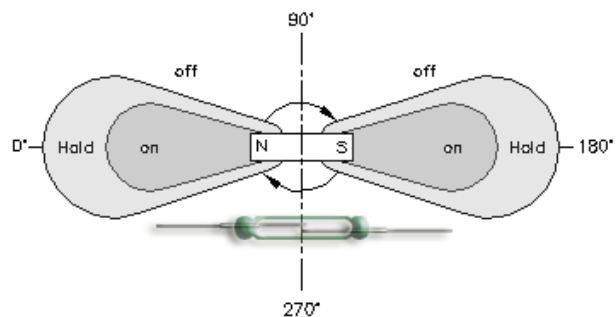
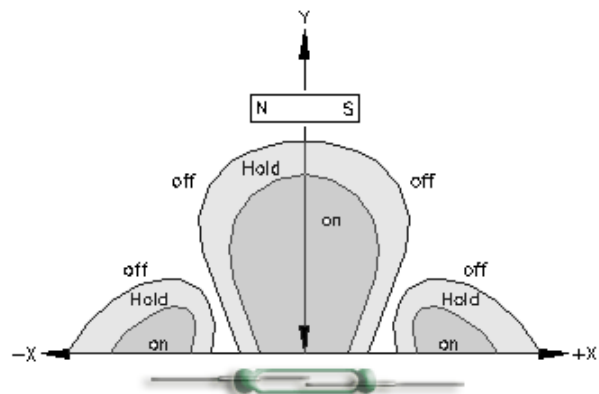
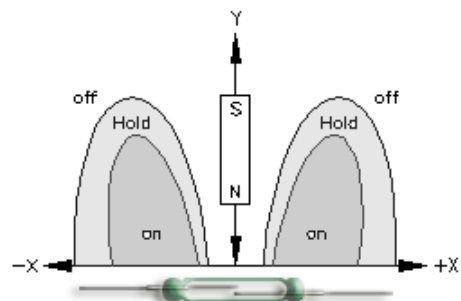


La surveillance du champ magnétique terrestre avec un réseau de capteurs magnétiques pourrait être utile pour la prévision des tremblements de terre. Cependant, malgré de nombreuses études, jusqu'à présent aucune méthode ne s'est révélée efficace pour la prévision des séismes.

Relais (Switch) REED

- Le Relais REED est interrupteur actionné par un aimant permanent. Il peut être utilisé comme capteur ON/OFF pour détecter le mouvement d'un aimant ou comme actionneur ON/OFF pour permettre à un courant de circuler.
- Constitué de deux pièces ferromagnétiques "soft" (exemple: NiFe).





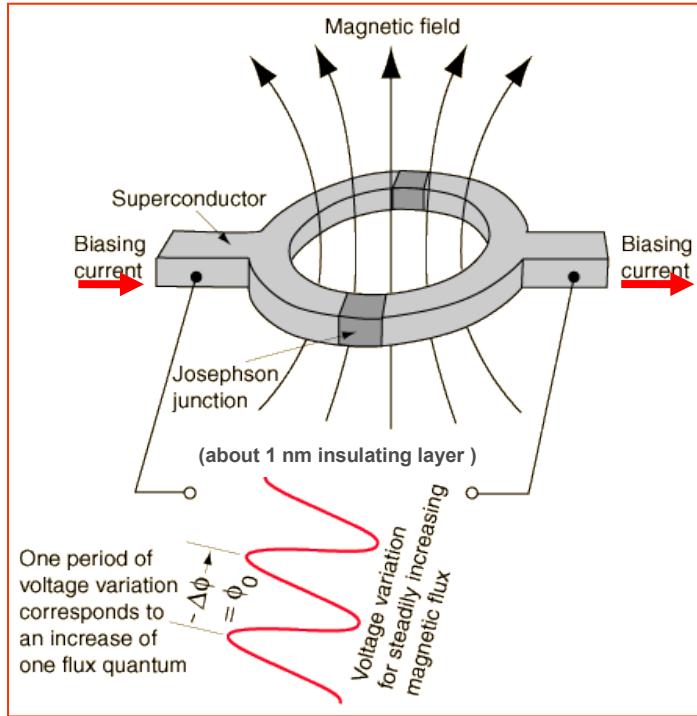
Région OFF: l'aimant génère un champ qui polarise les deux barreaux en sens opposée ou pas assez. L'éventuelle force d'attraction magnétique n'est pas suffisante pour vaincre la rigidité mécanique des deux pièces («ressorts»). Le circuit reste ouvert.

Région ON: l'aimant génère un champ qui polarise les deux barreaux dans le même sens. La force d'attraction magnétique est suffisante pour vaincre la rigidité mécanique des deux pièces («ressorts»). Le circuit se ferme.

Région HOLD : Les deux parties ferromagnétiques sont en contact. La force magnétique attractive est plus forte que les forces de rappel mécanique des deux «ressorts». Le circuit reste dans son état précédent (fermé ou ouvert).

DC SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)

$$\Delta B \rightarrow \Delta \Phi \rightarrow \Delta V$$



Condition «quantique»:

$$\Phi_B = n\Phi_0 \quad n \in \mathbb{N}$$

$$\Phi_0 = h / 2e \cong 2 \times 10^{-15} \text{ T m}^2$$

Φ_B : flux total dans la boucle

$$\Phi_B = \Phi_{B_{\text{ext}}} + \Phi_{B_{\text{int}}}$$

Un SQUID est un anneau supraconducteur avec, généralement, deux jonctions appelées jonctions Josephson. Josephson a prédit qu'un courant supraconducteur peut être maintenu dans la boucle, même si son chemin est interrompu par de minces barrières isolantes (ou conductrices).

Dans une boucle supraconductrice, le flux magnétique qui la traverse Φ_B , qui dépend du champ magnétique et de l'aire de la boucle, est quantifié en unités de Φ_0 , c'est-à-dire $\Phi_B = n\Phi_0$.

Un courant supraconducteur compensera la présence d'un champ magnétique appliqué extérieurement de sorte que le flux total à travers la boucle Φ_B (dû au champ extérieur plus le champ généré par le courant) soit toujours un multiple de Φ_0 .

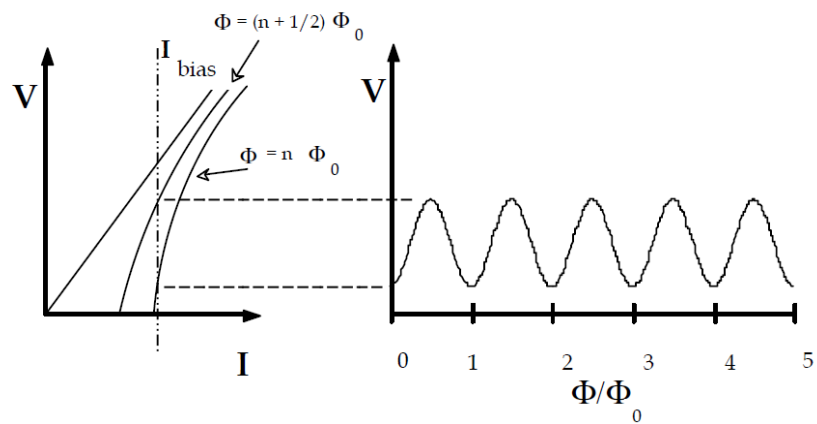
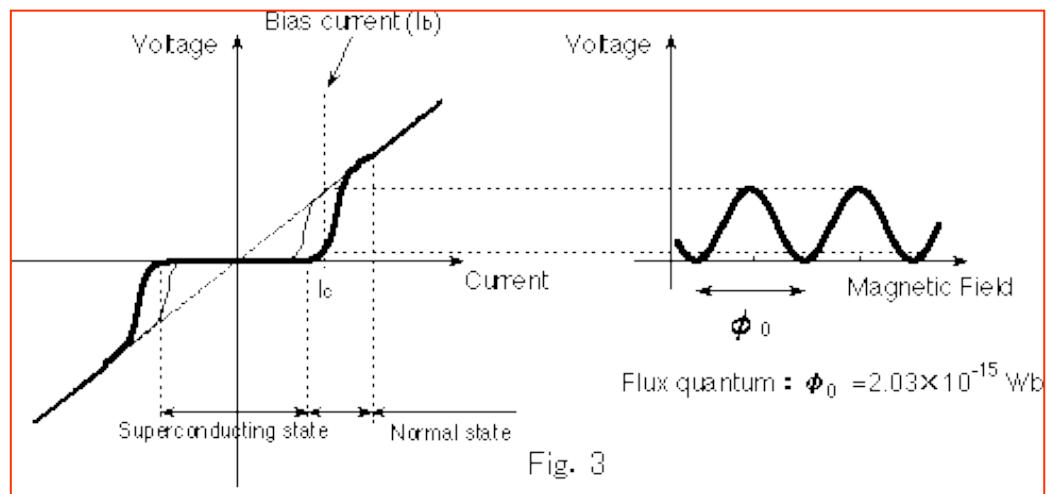
Le courant critique $I_c(B)$ est fonction du flux magnétique à travers la boucle et peut être exprimé comme (pour un SQUID avec deux jonctions identiques):

$$I_c(B) \cong 2I_c(0) \left| \cos\left(\pi \frac{\Phi_{B_{ext}}}{\Phi_0}\right) \right|$$

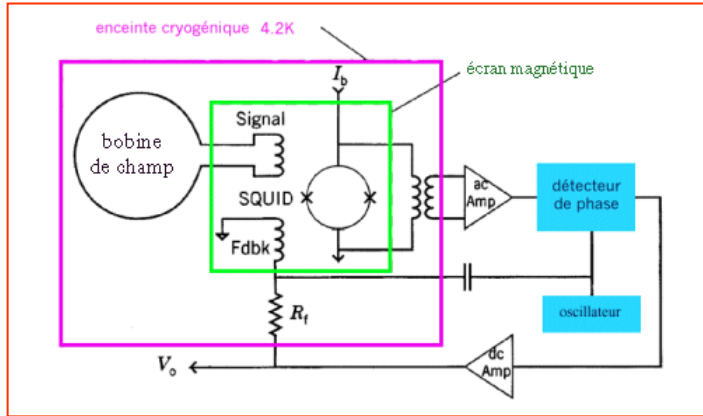
où $I_c(0)$ est le courant critique en l'absence d'un champ magnétique appliqué de l'extérieur.

Si un courant de bias I_{bias} inférieur au courant critique de jonction $I_c(B)$ est injecté à travers la boucle, il n'y aura pas de tension aux bornes de la boucle. Si le courant de polarisation est élevé au-dessus de ce courant critique, une tension se développe à travers la boucle.

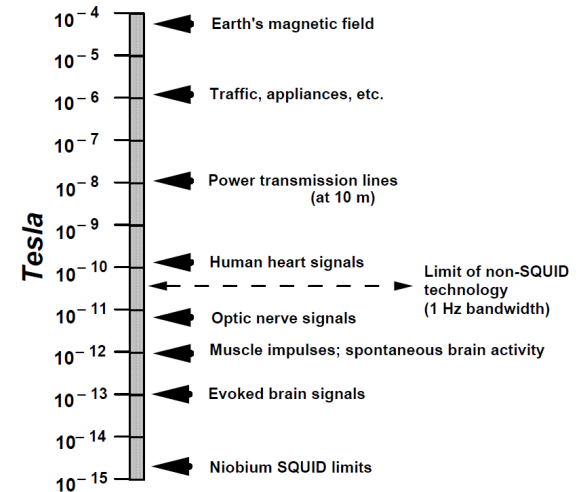
Le courant critique est si sensible au flux magnétique à travers la boucle supraconductrice que de très petites variations du champ magnétique peuvent être mesurées. Si un courant de bias I_{bias} proche du courant critique I_c est imposé de l'extérieur, la variation du courant critique $I_c(B)$ détermine une variation de la chute de tension aux bornes de la jonction. La chute de tension aux bornes de la jonction est une fonction périodique du champ magnétique appliqué extérieurement.



- Utilise des supraconducteurs (donc le SQUID doit être à basse température, typ. 77 K ou 4 K).
- Etendue de mesure: 10^{-14} à 10^{-6} T (champ terrestre: 10^{-4} T)
- Résolution: 1 à 10 fT/Hz^{1/2} (le SQUID est le capteur magnétique avec la meilleure résolution).
- Exactitude: en pratique mauvaise (difficile de mettre le champ à zéro, faire le comptage des passages par le maximum, et connaître précisément la surface de la boucle). Mais la précision n'est pas importante dans la plupart des applications des SQUIDS. L'extraordinaire résolution est la caractéristique plus importante.

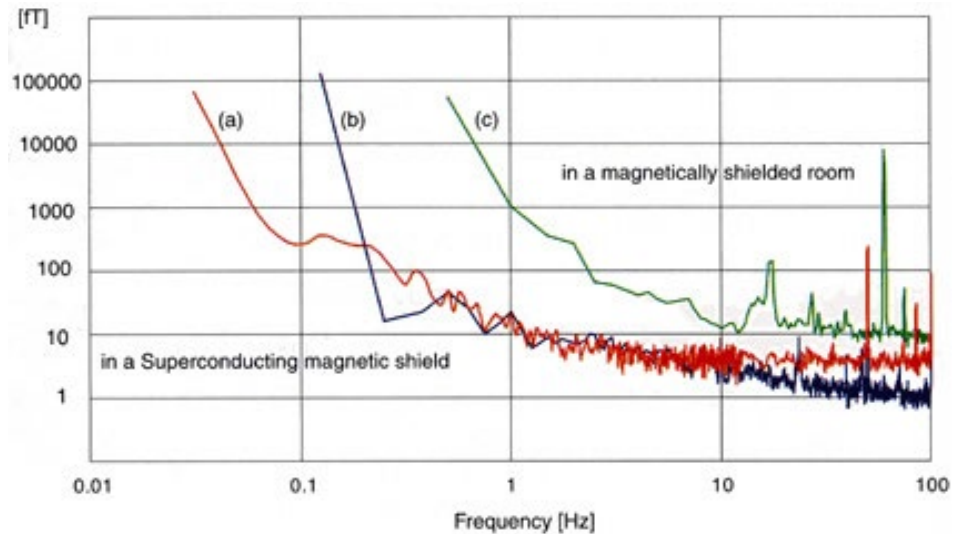


Magnetic Signal Levels



Magnétomètre à SQUID et sources de champs magnétiques faibles. Exemples: activité électrique du cœur : 10'000 à 100'000 fT, Activité électrique du cerveau : 1 fT à 100 fT

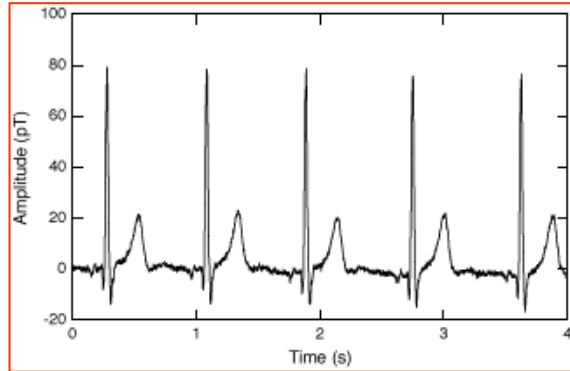
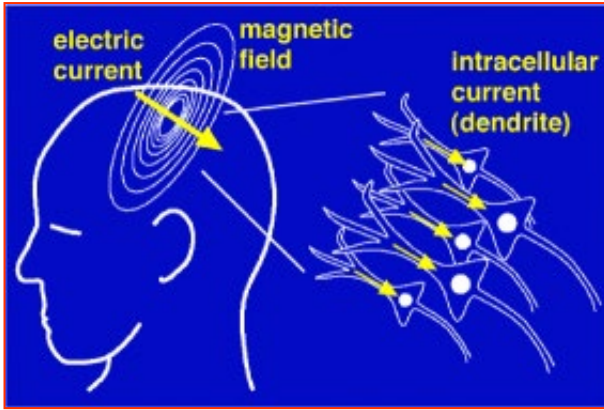
Sensor	Field Noise in $\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$	
	At 1 Hz	At 100 Hz
Flux Gate (room temperature)	30,000	30,000
77 K YBCO dc SQUID Magnetometer	<100	<40
4.2 K Nb dc SQUID Magnetometer	<5	<4



Bruit typique des SQUIDs en fonction de la fréquence.

Applications des SQUIDS :

Magnéto-encéphalogramme (MEG), magnéto-cardiogramme (MCG), tests biologiques à l'aide de marqueurs magnétiques, inspection des aliments, caractérisation des matériaux, ..



Magnéto-encéphalogram (MEG).



Magnéto-cardiogramme (MCG).