

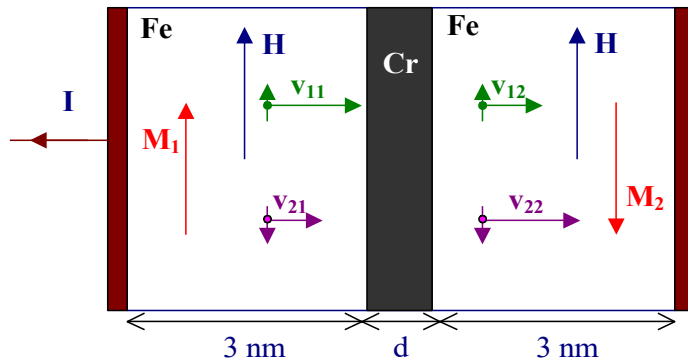
par Gilbert Gastebois

1. Description

La magnétorésistance géante (GMR) est un phénomène découvert indépendamment par Albert Fert et Peter Grünberg (prix Nobel conjoint en 2007) dans les couches ultra minces de fer séparées par un métal non ferromagnétique. Fert a travaillé à la température de l'hélium liquide (4,2 K) et Grünberg à température ambiante où l'effet était beaucoup plus faible. L'expérience est l'aboutissement de la théorie de la spintronique, c'est à dire l'influence de l'orientation du spin de l'électron sur sa mobilité dans un matériau ferromagnétique. Phénomène purement quantique comme tout ce qui concerne le ferromagnétisme.

La suite décrit l'expérience de Fert.

2. Schéma



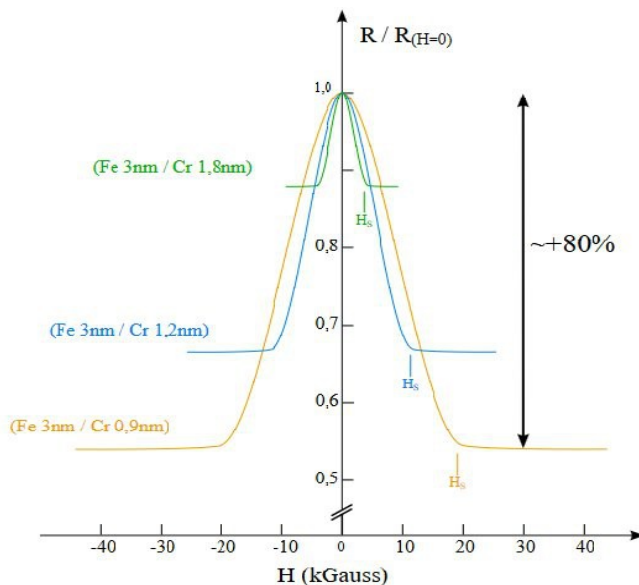
Le dispositif est constitué de deux couches très très fines de fer séparées par une couche encore plus fine de chrome

d Épaisseur du chrome

H Champ magnétique externe

v Vitesse d'entraînement des électrons

M Aimantation du fer



Courbes $r = R(H)/R(0) = f(H)$

obtenues par A.Fert pour différentes épaisseurs d de Cr

$d = 1,8 \text{ nm}$

$d = 1,2 \text{ nm}$

$d = 0,9 \text{ nm}$

La résistance diminue en fonction de H jusqu'à un seuil correspondant à la saturation de l'aimantation du fer.

Les valeurs de r_s et H_s dépendent de l'épaisseur d .

r_s augmente avec d

H_s diminue avec d

3. Étude phénoménologique de la magnétorésistance géante

3.1 Principe de la spintronique

Dans un matériau ferromagnétique,- le fer dans l'expérience - le libre parcours moyen l des électrons de conduction entre deux collisions avec les atomes de fer, est différent selon que leur spin est parallèle au vecteur aimantation du fer ou antiparallèle. Le spin parallèle est favorisé. Le spin ne peut avoir que ces deux orientations.

La mobilité μ des électrons est proportionnelle à l donc μ est plus grande pour les électrons de spin parallèle.

Quand on associe deux couches de fer séparées par une fine couche non ferromagnétique, les deux couches interagissent fortement entre elles. Cette interaction entre spins, est d'autant plus forte que les couches sont proches. Cette interaction est purement quantique.

L'interaction consiste en un forçage antiparallèle des aimantations des deux couches et une influence sur les mobilités des électrons de conduction des deux couches.

Les couches sont très fines de manière à n'y avoir qu'un seul domaine magnétique. Dans ces conditions, l'aimantation est pratiquement saturée même à $H = 0$ et tous les atomes de fer ont la même orientation de spin. Les électrons de conduction du fer ayant leur spin parallèle ou antiparallèle par rapport à l'aimantation sont tous de spin haut ou bas.

3.2 Étude du phénomène

On étudie l'effet du champ externe H orienté vers le haut ($H > 0$) sur la couche 2 à droite où l'aimantation est vers le bas. Ce champ n'a aucun effet sur la couche 1 à gauche où l'aimantation est parallèle au champ et déjà saturée.

Pour simplifier l'écriture et parce qu'on n'exprime que le rapport $r = R_{(H)}/R_{(0)}$, on prendra toutes les constantes égales à 1.

ainsi les résistances $R = L/(ne\mu S)$ deviennent $R = 1/\mu$, l'aimantation $M = M_2/M_{2max}$ varie de -1 (saturation vers le bas) à +1 (saturation vers le haut) et $\mu_{min} = 1$.

On fait l'hypothèse d'une variation linéaire de μ avec l'aimantation M

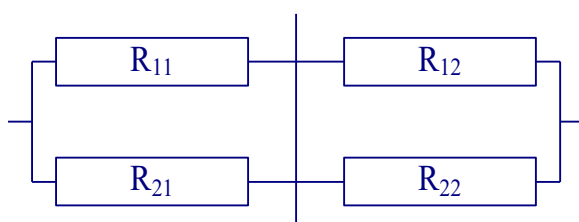
Spin haut : $\mu_H = 1 + k(1 + M)/2$

pour $M = 1$, $\mu_H = 1 + k$ est maximal et pour $M = -1$, $\mu_H = 1$ est minimal

Spin bas : $\mu_B = 1 + k(1 - M)/2$

pour $M = -1$, $\mu_B = 1 + k$ est maximal et pour $M = 1$, $\mu_B = 1$ est minimal

Le courant I est constitué par le flux des électrons de spin haut de mobilité $1 + k$ dans la couche 1 suivi du flux des électrons de spin haut de mobilité $\mu_H = 1 + k(1 + M)/2$ dans la couche 2, auquel s'ajoute en parallèle, le flux des électrons de spin bas de mobilité 1 dans la couche 1 suivi du flux des électrons de spin bas de mobilité $\mu_B = 1 + k(1 - M)/2$ dans la couche 2. On peut donc modéliser le dispositif en négligeant la résistance de la couche intermédiaire en chrome, par deux résistances R_{11} et R_{12} en série placées en parallèle avec deux résistances R_{21} et R_{22} en série.



Résistance totale :

$$R_H = 1/(1/(R_{11} + R_{12}) + 1/(R_{21} + R_{22}))$$

$$R_{11} = 1/(1 + k) \quad R_{12} = 1/(1 + k(1 + M)/2)$$

$$R_{21} = 1 \quad R_{22} = 1/(1 + k(1 - M)/2)$$

$$r = R_H / R_0 \quad R_0 = R_{H=0}$$

Quand $H = 0, M = -1$, on a $R_H = R_0 = (2 + k)/(2(1 + k))$ donc

$$r = 2(1 + k) / (1 / (1 / (1 + k) + 1 / (1 + k(1 + M)/2)) + 1 / (1 + 1 / (1 + k(1 - M)/2))) / (2 + k)$$

En développant, on obtient :

$$r = (1 + k) ((2 + k)^2 - k^2(1 + M)^2/4) / ((2 + k)(1 + k) + k^2(1 + k/2)(1 - M^2)/4) / (2 + k)$$

Il ne reste plus qu'à relier M et H

La relation qui semble le mieux correspondre à l'expérience est une relation quadratique :

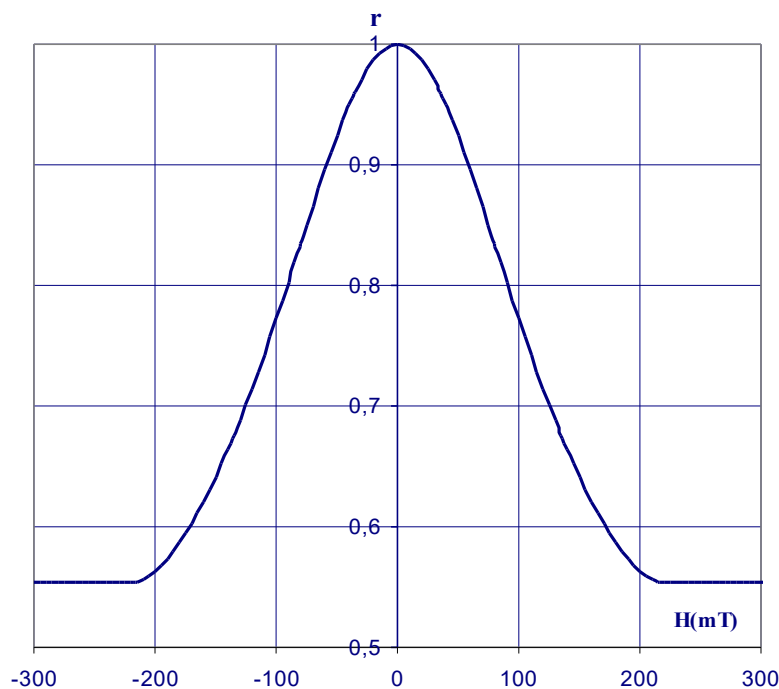
$$\text{Pour } H \leq H_s : M = 2(H/H_s)^2 - 1$$

$$\text{Pour } H > H_s : M = 1$$

$$r = (1 + k) ((2 + k)^2 - k^2(H/H_s)^4) / ((2 + k)(1 + k) + k^2(1 + k/2)(H/H_s)^2(1 - (H/H_s)^2)) / (2 + k)$$

$$\text{Si } H \geq H_s \quad r = r_s = 4(1 + k)/(2 + k)^2$$

Pour $H < 0$, C'est l'aimantation de la couche 1 qui s'inverse et les résistances R_{11} et R_{21} ainsi que R_{12} et R_{22} inversent leur rôle. Finalement $r(-H) = r(H)$. Il n'y a donc rien à modifier puisque $r = f(H)$ est paire.



$$d = 0,9 \text{ nm}$$

La courbe expérimentale donne :

$$\delta = (1 - r_s)/r_s \approx 80\%$$

ce qui donne :

$$r_s \approx 1/1,8 = 0,555 \text{ et}$$

$$k = 2(1 - r_s + (1 - r_s)^{1/2})/r_s = 4$$

$$H_s = 217 \text{ mT}$$

$$r = (1 - 4(H/H_s)^4/9) / (1 + 1,6(H/H_s)^2(1 - (H/H_s)^2))$$

La courbe obtenue est suffisamment proche de la courbe expérimentale pour considérer que les hypothèses sont convenables (au moins pour $d = 0,9 \text{ nm}$).

3.3 Relation entre H_s , r_s et d

L'étude des courbes expérimentales laisse penser que dans les limites $d < 2 \text{ nm}$

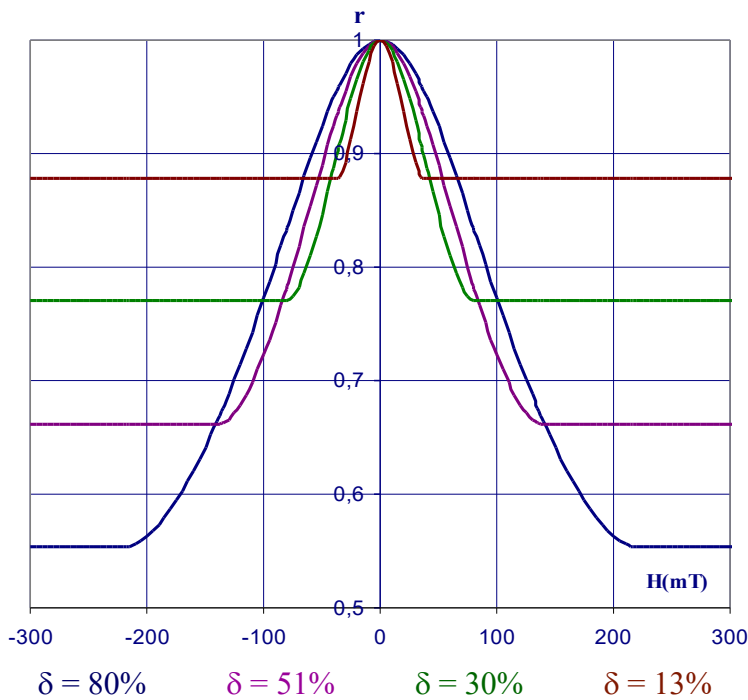
les variations de r_s avec d sont linéaires, on a quelque chose comme :

$$r_s = 0,36 d + 0,23$$

et d'autre part H_s diminue avec r_s selon une loi qui ressemble à :

$$H_s = 270(1/r_s - 1)$$

Avec ces relations empiriques, on obtient les courbes suivantes :



$d = 1,8 \text{ nm}$ $r_s = 0,88$ $H_s = 38 \text{ mT}$
 $d = 1,5 \text{ nm}$ $r_s = 0,77$ $H_s = 81 \text{ mT}$
 $d = 1,2 \text{ nm}$ $r_s = 0,66$ $H_s = 138 \text{ mT}$
 $d = 0,9 \text{ nm}$ $r_s = 0,55$ $H_s = 217 \text{ mT}$

Les courbes obtenues sont très semblables aux courbes expérimentales.

4. Utilisation de la magnétorésistance géante.

Depuis sa découverte, la valeur de δ qui caractérise la magnétorésistance géante a été largement augmentée même à température ambiante par l'utilisation d'un empilement parfaitement contrôlé de nombreuses couches. On a maintenant une variation notable de la résistance même pour des modifications infimes de H .

C'est donc devenu un dispositif extrêmement sensible de détection des champs magnétiques.

On l'a donc incorporé notamment dans les têtes de lecture des disques durs. La très grande sensibilité permettant de détecter des champs beaucoup plus faibles, on a pu utiliser des volumes de matériau magnétique beaucoup plus faible pour matérialiser un bit, ce qui a multiplié considérablement la mémoire des disques durs à surface identique. La mémoire a pu être multipliée par 100.