

# Cycle d'hystérésis

Assistant responsable

Oscar Cubero (217)

1 novembre 2006

## Résumé

Cette expérience permet de mesurer le cycle d'hystérésis et la perméabilité d'un matériel ferromagnétique.

## 1 Théorie

### 1.1 Perméabilité magnétique

Le ferromagnétisme est une propriété importante d'un nombre limité de solides ; en particulier des trois métaux Fe, Co, Ni et de leurs alliages, de l'alliage de Heussler(Al,Cu) et des ferrites.

Lors du passage d'un courant  $I$  dans une bobine dont la longueur  $L$  est grande par rapport à son diamètre, pour un nombre de spires  $N$ , il prend naissance à l'intérieur un champ magnétique homogène d'intensité :

$$H = \frac{N}{L}I \quad (1)$$

correspondant au champ d'induction magnétique  $B_0 = \mu_0 H = \mu_0 \frac{N}{L}I$ . Une aiguille aimantée située à l'extérieur de la bobine peut être déviée par le champ produit par cette dernière.

Si un barreau de fer est introduit dans la bobine, on constate que *la déviation de l'aiguille est beaucoup plus prononcée*, ce qui indique une forte augmentation du champ d'induction magnétique. Au champ  $H$  de la bobine s'est ajouté un champ supplémentaire  $h$  qui est dû à la magnétisation du barreau de fer.

La relation entre la magnétisation  $m$  et  $h$  est donnée par  $m = \mu_0 h$  où  $\mu_0$  est la perméabilité du vide. Ainsi, l'induction magnétique totale est :

$$B = B_0 + m = \mu_0 (H + h). \quad (2)$$

Sous l'hypothèse que la réponse du barreau est linéaire, c'est à dire, en supposant que le champ  $h$  est proportionnel au champ appliqué  $H$ , i.e.  $h = \chi H$ , avec  $\chi$  une constante :

$$B = \mu_0 (H + \chi H) = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu H = \mu B_0 \quad (3)$$

où  $\mu = 1 + \chi$ . La constante  $\chi$  est appelée *susceptibilité magnétique linéaire* et  $\mu$  est la *perméabilité magnétique relative* au matériau.

En général,  $\mu$  est définie par :

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} = 1 + \frac{dh}{dH}. \quad (4)$$

Les substances ferromagnétiques présentent une perméabilité relative  $\mu$  très élevée (jusqu'à  $10^4$ ).

## 1.2 Cycle d'hystéresis

Un *cycle d'hystéresis* est une courbe comme celle de la figure 1 ; elle représente donc le champ  $h$  du noyau ferromagnétique en fonction du champ  $H$  appliqué par la bobine. On dit qu'il y a d'hystéresis parce que la courbe  $h=h(H)$  obtenue à la croissance de  $H$  ne se superpose pas avec la courbe  $h=h(H)$  obtenue à la décroissance de  $H$ . Le cycle d'hystéresis est toujours symétrique.

Aux points  $b$  et  $e$  le champ  $h$  n'est plus proportionnel au champ  $H$  qui le produit et une valeur  $h$  limite est atteinte, appelée champ de *saturation*. Lorsque l'on diminue l'intensité du champ  $H$  à zéro, un champ  $h \neq 0$  est observé (champ *rémanent*), et il est nécessaire d'appliquer un champ  $H$  de sens opposé (champ *coercitif*) pour faire disparaître la rémanence.

Sur un tel cycle  $\mu$  n'est en général pas une constante. Toutefois, on définit la perméabilité de la substance sur le régime linéaire, points  $d$  où  $f$ .

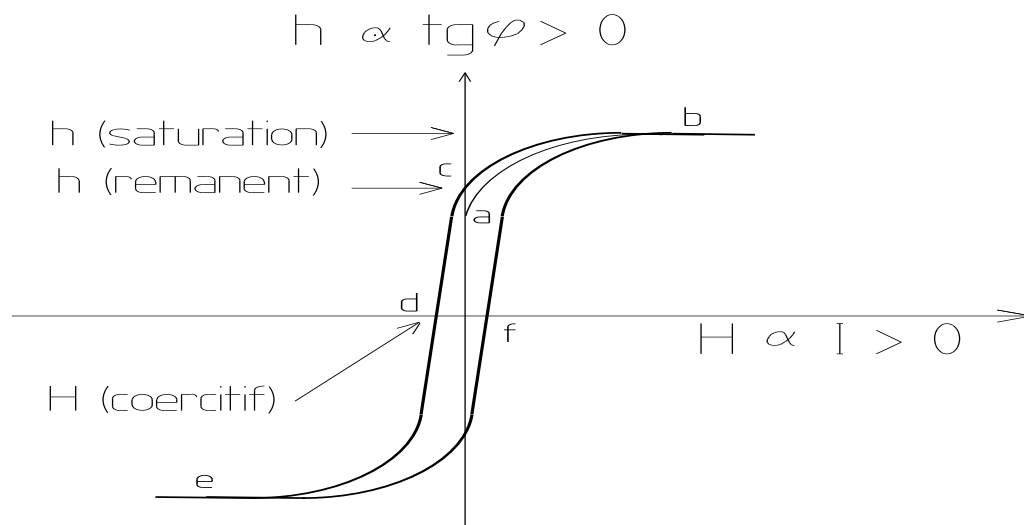
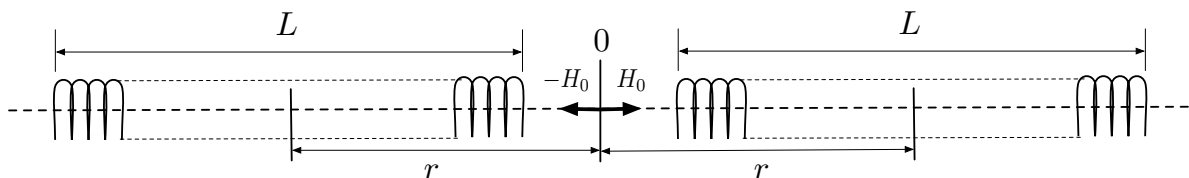


FIG. 1 – Cycle d’hystéresis.

## 2 Expérience

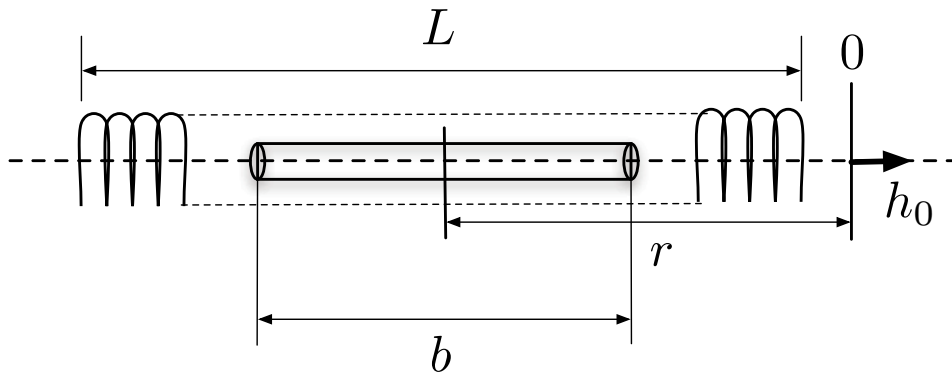
### 2.1 Méthode de mesure : le magnétomètre

La méthode consiste à choisir un axe sur lequel on place deux bobines identiques ; le point de symétrie est appelé *point 0*. On fait circuler dans les deux bobines un courant de même intensité mais de sens opposé. Les deux bobines induisent alors des champs magnétiques d’orientation opposées,  $H$  et  $-H$ , ce qui conduit à annuler, au points 0, la composante parallèle<sup>1</sup> à l’axe du champ total  $H_0^{\text{tot}} = H_0 - H_0$ .



Un barreau ferromagnétique (longueur  $b$ , rayon  $R$ ) est alors introduit au centre de l’une des bobines ; le champ magnétique mesuré au point 0 est le champ  $h_0$  produit par le barreau.

<sup>1</sup>Pour désigner la composante parallèle à l’axe des bobines, on utilisera un indice 0.

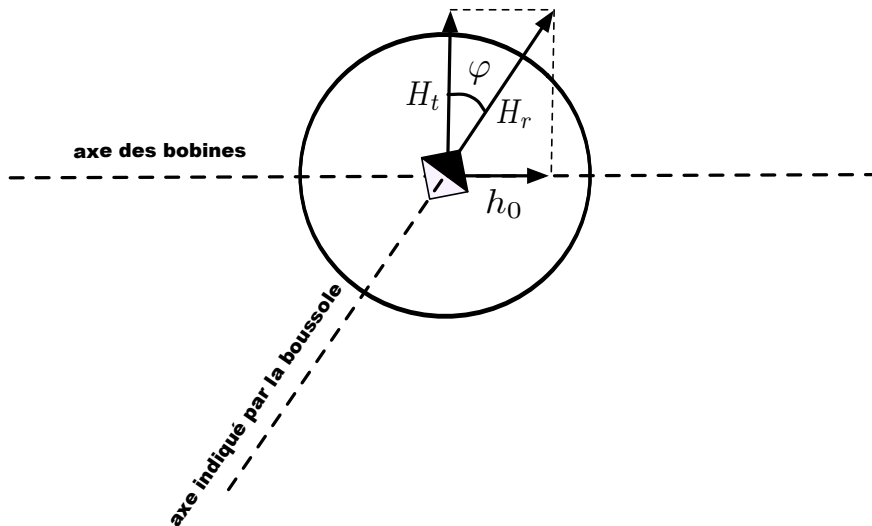


La composante  $h_0$  du champ induit est fonction des paramètres de la bobine, du barreau et du champ induit  $h$  dans le noyau ferromagnétique :

$$h_0 = \frac{hV}{2\pi} \frac{r}{\left(r^2 - \frac{b^2}{4}\right)^2}, \quad (5)$$

où  $V$  est le volume du barreau.

Pour connaître  $h$  il suffit par conséquent de mesurer  $h_0$ . La mesure de  $h_0$  s'effectue avec une boussole, par comparaison avec l'intensité, connue, de la composante parallèle  $H_t$  du champ magnétique terrestre dans le laboratoire. L'axe des bobines est placé *perpendiculairement au champ terrestre* :



Le champ  $h_0$  est alors obtenu comme :

$$h_0 = H_t \tan \varphi \quad (6)$$

Finalement, avec (5) et (6), on obtient :

$$h = H_t \frac{2\pi}{V} \frac{\left(r^2 - \frac{b^2}{4}\right)^2}{r} \tan \varphi = K \tan \varphi \quad (7)$$

Le champ  $H_t$  dans le laboratoire est de 11.04 A/m.

D'autre part, le champ produit par la bobine (celle où l'on a mis le noyau) est connu par l'expression (1) :

$$H = \frac{N}{L} I \quad (8)$$

## 2.2 Traitement des résultats

On mesure directement le courant  $I$  et l'angle  $\varphi$ , à partir de lesquelles on calcule les champs  $h$  et  $H$  avec les expressions (7) et (8).

On graphique le cycle d'hystérésis  $h=h(H)$ .

Observer les domaine de saturation, l'existence d'une aimantation rémanent et d'un champ coercitif.

Sur le cycle, il convient d'identifier un domaine linéaire et de calculer par régression linéaire la pente correspondante pour déterminer  $\mu$  avec la relation (4).

### 3 Montage expérimental et mode opératoire

Normalement, le dispositif est déjà monté correctement ; toutefois, avant de mesurer, faites-le vérifier par un assistant.

On peut voir sur la figure ci-dessous le schéma électrique du montage expérimental. Le but est de pouvoir alimenter les bobines du magnétomètre avec un courant continu depuis 0 A jusqu'à 4 A, avec la possibilité d'en changer le sens.

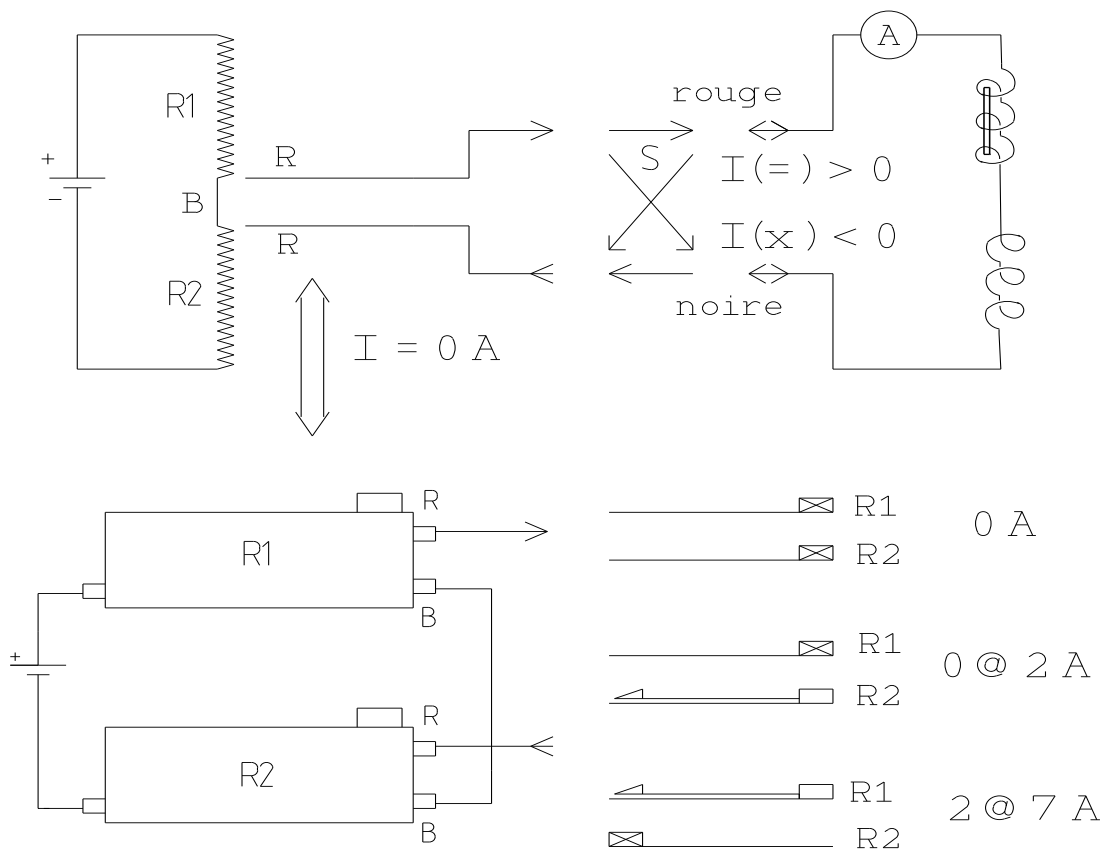


FIG. 2 – Schéma électrique.

### 3.1 Potentiomètres

$R_1$  et  $R_2$  sont des potentiomètres (la résistance maximum du  $R_1$  est de  $13\Omega$  tandis que celle de  $R_2$  est de  $160\Omega$ ). Chaque potentiomètre a trois bornes, dont deux (rouge (R) et blanc (B)) sur le même côté, que nous nommerons côté droit. Les bornes B des deux potentiomètres sont reliées entre elles, et la source de courant est branchée aux deux côtés gauches de  $R_1$  et  $R_2$ .

Sur chaque potentiomètre il y a un curseur que nous pouvons glisser pour faire varier sa résistance et par conséquent le courant dans les bobines. Quand les deux curseurs sont tout à droite le courant est zéro (voir schéma). Pour augmenter le courant il faut glisser gentiment le curseur du potentiomètre  $R_2$  vers la gauche et une fois tout à gauche on aura un courant de  $2A$ . Si maintenant nous voulons augmenter encore plus le courant il faut commencer à glisser le curseur du potentiomètre  $R_1$  aussi vers la gauche jusqu'à atteindre la valeur désirée ( $\approx 4A$ ). Pour descendre le courant on parcourt le même chemin mais en arrière, c'est à dire, on glissera le curseur du  $R_1$  vers la droite et après celui de  $R_2$ , aussi vers la droite. De cette façon on a effectué le cycle suivant :  $0A \text{ --- } > 2A \text{ --- } > 4A \text{ --- } > 2A \text{ --- } > 0A$ .

Le commutateur S permet d'effectuer le même cycle mais avec le courant inversé.

### 3.2 Commutateur

Le commutateur est indiqué dans le schéma par la lettre S. Il nous permet de croiser la sortie par rapport à l'entrée. Avec le commutateur S sur la position '=' le courant passe directement, et sur la position 'x' le courant est inversé.

### 3.3 Ampèremètre et bobines

Pour être consistant pendant toute l'expérience il ne faut pas modifier les connexions, même celles de l'ampèremètre (lettre A dans la figure). On mesure un courant DC, et donc l'ampèremètre affiche un signe + ou - en fonction du sens du courant. La connexion doit être faite de la façon suivante :

*Le câble qui sort de la borne rouge du commutateur doit entrer sur l'entrée '+/rouge' de l'ampèremètre, et le câble qui sort de la borne '-/noire' de l'ampèremètre doit être branché sur la bobine dans laquelle on va placer le barreau.*

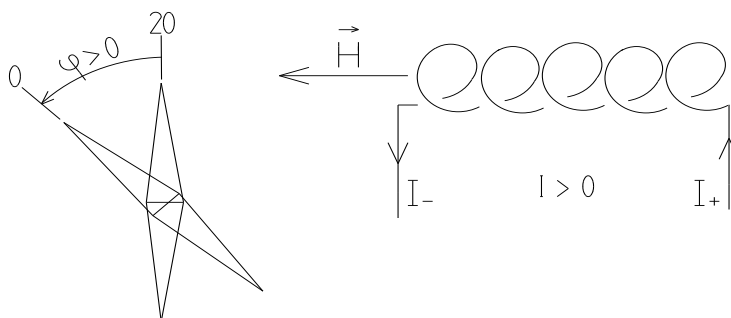
## 4 Sens du courant et angle de déviation de la boussole

L'aiguille de la boussole est un aimant et elle indique toujours le nord géographique terrestre<sup>2</sup>. En fait ce n'est pas tout-à-fait vrai : l'aiguille s'aligne selon le champ magnétique local, qui en l'absence de champ magnétique extérieur est dû au champ magnétique terrestre. Une bobine parcourue par un courant va créer un champ magnétique qui va s'ajouter vectoriellement au champ magnétique terrestre à l'endroit de la boussole. Le sens du champ magnétique ainsi créé dépend du sens du courant dans la bobine.

Dans la figure ci-dessous nous montrons la configuration de l'expérience avec les signes qu'on va utiliser pour le courant et l'angle de déviation de la boussole. La convention est la suivante :

*L'angle est positif si l'aiguille s'éloigne de la bobine où est le barreau.*

*Le signe du courant est celui indiqué par l'ampèremètre si on respecte le montage décrit ci-dessus.*



Au fur et à mesure de la mesure, et pour ne pas se tromper avec les signes, il est bien d'être conscient de où on se trouve sur la courbe d'hystérèse. La figure 1 présente le champ interne dans le barreau ( $h$ ) en fonction du champ externe appliqué ( $H$ ). Les grandeurs que nous mesurons directement sont le courant appliqué  $I$  (lecture sur l'ampèremètre) et l'angle de déviation de la boussole  $\varphi$ . Étant donné que le champ  $h$  est proportionnel à  $\text{tg}(\varphi)$  et que le champ  $H$  est proportionnel à  $I$ , une représentation de  $\text{tg}(\varphi)$  en fonction

<sup>2</sup>c'est à dire, le sud magnétique de "l'aimant terrestre".



de I contiendra la même information fondamentale que la courbe  $h=h(H)$  présentée dans la figure 1<sup>3</sup>.

Au début de l'expérience (sans courant), et après avoir mis le barreau, il y aura une déviation (positive ou négative)<sup>4</sup> sur la boussole dû au champ rémanent qui reste encore dans le barreau. Supposons qu'elle est positive et qu'on est par exemple au point  $a$  (sur la figure 1), il faut alors augmenter le courant jusqu'à  $\approx 4A$  pour amener le barreau à la saturation (point  $b$ ). Le courant lu par l'ampèremètre doit être positif et l'aiguille de la boussole doit montrer un angle positif. Si on commence à diminuer le courant on ira du point  $b$  au  $c$ , et à ce moment là, le courant sera zéro et l'angle positif. Pour pouvoir continuer le parcours et arriver jusqu'au point  $d$  il faut changer le sens du courant au moyen du commutateur S et recommencer à monter le courant. De  $c$  à  $d$  le courant lu sera négatif tandis que l'angle sera positif, et on continuera ainsi jusqu'à arriver au point  $d$ , où l'angle de déviation sera zéro, etc...

Remarques :

- 1.- Il faut prendre plus de points, c'est à dire, varier plus lentement le courant, pour les régions où le changement de l'angle est plus grand.
- 2.- **Ne jamais revenir en arrière, sinon il faut recommencer les mesures.**
- 3.- Tourner le commutateur seulement quand le courant est  $\approx 0A$ .

---

<sup>3</sup>Il faut rappeler que si  $\varphi > 0 \Rightarrow tg(\varphi) > 0$  et si  $\varphi < 0 \Rightarrow tg(\varphi) < 0$  pour  $\varphi \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ .

<sup>4</sup>Son signe dépend du sens dans lequel vous placez le barreau.