

G1. Cycle d'hystérèse magnétique

1 But de l'expérience

Les matériaux magnétiques occupent une très grande place en technologie, et leurs applications sont très nombreuses. Le but de cette manipulation est de se familiariser avec quelques-unes de leurs propriétés, et en particulier avec le cycle d'hystérèse et ses grandeurs caractéristiques.

2 Phénoménologie

2.1 Le magnétisme dans la matière

L'état magnétique de la matière peut être caractérisé par un vecteur \vec{M} appelé magnétisation, ou moment magnétique dipolaire par unité de volume. Dans le vide, l'induction magnétique \vec{B} et le champ magnétique \vec{H} sont liés par la relation

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ est la perméabilité absolue du vide.

Par contre, dans la matière, l'induction magnétique dépend de la magnétisation \vec{M} de la matière de la façon suivante :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$$

La magnétisation \vec{M} de la matière est une fonction du champ \vec{H} , de la nature de la substance, et des traitements magnétiques, mécaniques et thermiques antérieurement subis par la substance.

La Figure 1 indique l'allure générale de la courbe de dépendance de B en fonction de H dans la matière. Cette courbe montre que l'induction B tend vers une valeur limite B_s , dite valeur de saturation. On distingue deux zones : une zone linéaire (a) et une zone de saturation (b). Dans la zone linéaire ($H < H_s$), on peut écrire

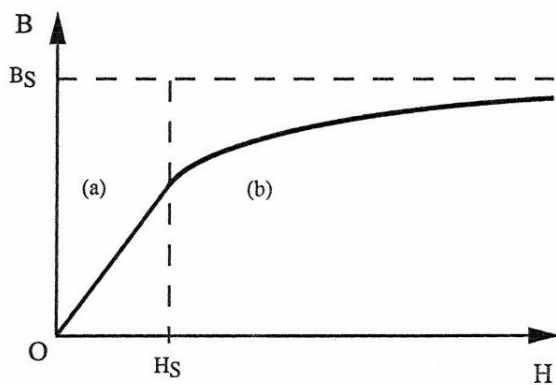
$$\vec{M} = \mu_0 \chi_m \vec{H}$$

où χ_m est la susceptibilité magnétique de l'échantillon de matière considéré.

Il en résulte que

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} (\chi_m + 1) = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

où $\mu_r = \chi_m + 1$ est la perméabilité relative de la matière considérée.



Dans la zone de saturation ($H > H_s$), \vec{M} n'est plus une fonction linéaire de \vec{H} . On ne peut donc plus écrire $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$, car μ_r ne serait plus une constante, mais une fonction de \vec{H} . On peut cependant définir localement une valeur plus générale μ_r^* de la perméabilité magnétique, en considérant des accroissements de B et H comme suit.

FIGURE 1 – Induction magnétique B en fonction du champ magnétique dans la matière H .

$$d|\vec{B}| = \mu_0 \mu_r^* d|\vec{H}| \quad \Rightarrow \quad \mu_r^* = \frac{1}{\mu_0} \frac{d|\vec{B}|}{d|\vec{H}|}$$

Suivant leur nature, les matériaux peuvent présenter trois comportements magnétiques très différents, qu'on qualifie de diamagnétisme, paramagnétisme ou ferromagnétisme.

2.2 Le diamagnétisme

Dans le cas des matériaux diamagnétiques, la magnétisation \vec{M} est une fonction linéaire de \vec{H} , avec $\chi_m < 0$. Le diamagnétisme est lié au fait que les orbites électroniques agissent chacune comme des petites spires de courant. Il en résulte que tous les corps exhibent du diamagnétisme, pouvant être masqué d'ailleurs par la présence de moments magnétiques permanents. Le diamagnétisme est un phénomène indépendant de la température.

2.3 Le paramagnétisme

Certains atomes et certains ions (oxygène, air, sels de fer, etc.) possèdent un moment magnétique propre. En l'absence de champ \vec{H} , ceux-ci sont orientés au hasard et, de ce fait, ne produisent pas de magnétisation macroscopiquement observable. Mais l'application d'un champ magnétique

\vec{H} extérieur aura pour effet d'orienter ces moments magnétiques dans sa propre direction, faisant apparaître ainsi un moment magnétique macroscopique \vec{M} non nul. Cette orientation préférentielle cesse avec la disparition de \vec{H} , sous l'effet de l'agitation thermique du milieu.

Dans le cas où il n'y a pas d'interaction entre les différents moments magnétiques individuels, l'effet est appelé paramagnétisme et $\chi_m > 0$. Dans les cas usuels, \vec{M} est une fonction linéaire de \vec{H} . Le paramagnétisme dépend de la température.

2.4 Le ferromagnétisme

S'il existe un fort couplage entre les moments magnétiques individuels qui sont orientés localement dans une même direction, l'agitation thermique demeure impuissante à détruire cet alignement au-dessous d'une certaine température (température de Curie). Ce phénomène, appelé ferromagnétisme, s'observe à l'échelle macroscopique par la présence de domaines appelés domaines de Weiss, à l'intérieur desquels tous les moments sont orientés dans la même direction. Au sein d'une matière ferromagnétique n'ayant pas subi l'influence d'un champ magnétique \vec{H} extérieur non nul, ces domaines s'orientent dans la direction du champ \vec{H} et développent ainsi une forte magnétisation macroscopique \vec{M} .

Le ferromagnétisme dépend de la température et de l'état ferromagnétique d'une substance. Il dépend également de son histoire (champs \vec{H} appliqués antérieurement, traitements thermodynamiques, etc.). Les principaux corps ferromagnétiques sont le fer, le cobalt et le nickel.

2.5 Cycle d'hystérèse

Le cycle d'hystérèse illustre la relation existant entre l'aimantation \vec{M} (ou l'induction \vec{B}) en fonction du champ magnétique appliqué \vec{H} (voir Fig. 2). Il caractérise chaque corps ferromagnétique et sa forme dépend en outre de la géométrie de l'échantillon, des contraintes mécaniques auxquelles ce dernier est soumis, de sa température, etc.

On y distingue :

- la courbe OP de première aimantation
- la valeur H_s du champ de saturation (pour lequel tous les domaines de Weiss ont une même direction)
- la valeur B_r de l'induction rémanente
- la valeur H_c du champ coercitif
- la symétrie du cycle (des points $P'(-H_s)$ et $P(H_s)$ par rapport à O).

Si l'on fait osciller le champ H entre deux limites $-H_m$ et $+H_m$, symétriques par rapport à O avec $H_s \neq H_m$, on obtient d'autres cycles qui admettent encore l'origine O pour centre de symétrie.

Le parcours d'un cycle d'hystérèse sous l'effet d'un champ magnétique extérieur cyclique dissipe de l'énergie au sein du matériau ferromagnétique. L'énergie dissipée τ sur un cycle fermé, pour \vec{H} et \vec{B} uniformes dans un échantillon de substance de volume V , se calcule facilement par la relation

$$\tau = V \oint_C \vec{H} \delta \vec{B}$$

où C désigne la courbe fermée du cycle en question.

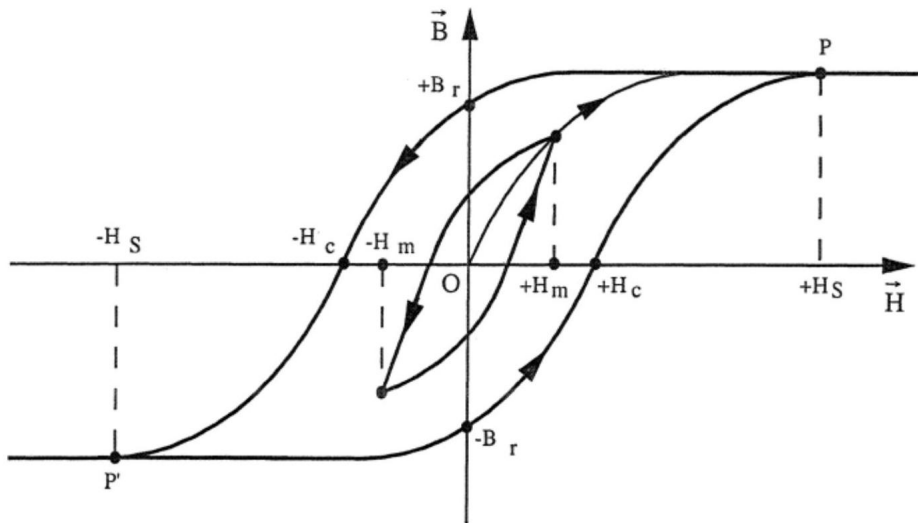


FIGURE 2 – Cycle d'hystérèse.

3 Montage expérimental

La Figure 3 illustre schématiquement le type de montage utilisé pour obtenir le cycle d'hystérèse d'une substance sur un traceur $x - y$ et la photo d'installation est présente sur la Figure 4.

On dispose d'un transformateur PHYWE, dont les bobines primaire et secondaire peuvent être choisies avec un certain nombre de spires (300, 600, 1'200, $2 \times 1'800$ ou 12'000 spires), ce qui permet d'ajuster la sensibilité de l'appareillage de tester en circuit magnétique fermé des échantillons parallélépipédiques. On dispose aussi d'un transformateur cylindrique, dont le primaire comporte 450 (405) spires, et le secondaire 4'980 (4'920) spires, qui permet de tester en circuit magnétique ouvert des échantillons sous forme de barreau.

Le primaire du transformateur est alimenté par une source de tension continue réglable par un potentiomètre, dont la polarité peut être inversée à l'aide d'un commutateur. La tension apparaissant aux bornes d'une résistance (1Ω) branchée en série avec le primaire du transformateur est branchée à l'entrée x du traceur $x - y$.

Le secondaire du transformateur est connecté à un montage intégrateur, c'est-à-dire à un circuit électronique dont la tension de sortie est proportionnelle à l'intégrale de la tension d'entrée. La tension de sortie de l'intégrateur est alors connectée à l'entrée y du traceur $x - y$.

L'intégrateur est constitué par un amplificateur opérationnel et un réseau RC, dont il n'est pas nécessaire ici de comprendre le fonctionnement. Pour commencer, allumer l'intégrateur "On". Le circuit intègre alors lorsque l'interrupteur est sur "Integrate". Vous pouvez remettre à zéro l'intégration à l'aide de l'interrupteur placé en position "Reset". Lorsque l'intégrateur fonctionne, il peut arriver qu'une "dérive" soit observée (sur l'axe y), en l'absence d'une variation de H . Pour obtenir des cycles d'hystérèse de bonne qualité, cette dérive de l'intégrateur doit être très précisément compensée à l'aide du potentiomètre "Drift compensation". Pour cela, avant de débiter l'enregistrement d'un cycle, on multiplie fortement la sensibilité de l'axe y, on tourne au minimum le courant et la tension puis on compense la dérive à l'aide du potentiomètre. On revient ensuite à la sensibilité initiale et l'enregistrement peut débiter.

On trace alors manuellement, à condition d'avoir réglé convenablement les sensibilités selon x et y du traceur, le cycle d'hystérèse de la substance considérée en augmentant et en diminuant deux fois de suite la tension de sortie de la source continue, la première fois avec une polarité donnée, la deuxième fois en inversant la polarité (mettre au minimum le courant et la tension avant d'inverser la polarité). Le fait d'utiliser le générateur en limitation de tension permet à l'expérimentateur un meilleur contrôle sur l'expérience.

À noter encore que l'intégrateur est un circuit électronique et que, par conséquent, sa tension de sortie est limitée par deux valeurs de saturation. Il faut donc prendre garde de choisir, suivant le matériau mesuré, des bobines primaire et secondaire avec des nombres de spires tels que l'intégrateur n'entre jamais dans son domaine de saturation au cours du cycle d'hystérèse.

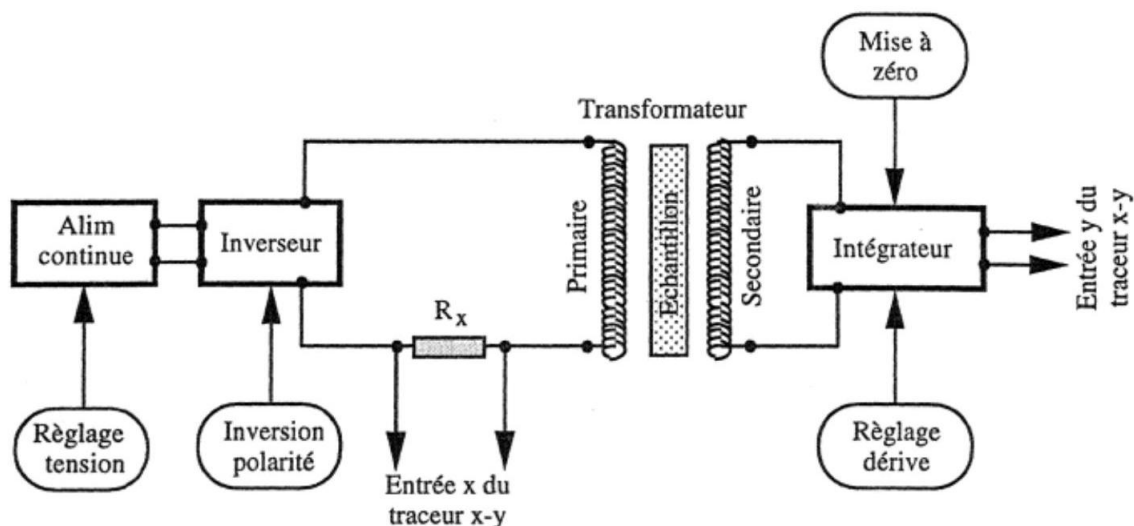


FIGURE 3 – Schéma du montage.

4 Suggestion de travaux

- Essayer d'expliquer pourquoi la tension sur l'entrée x de l'enregistreur est proportionnelle au champ magnétique H appliqué à la substance mesurée. Peut-on calibrer l'axe horizontal du traceur (par exemple en $[A/m]$ par V) ?
- Essayer d'expliquer pourquoi la tension sur l'entrée y de l'enregistreur est proportionnelle à l'induction magnétique B au sein de la substance mesurée. Peut-on calibrer l'axe vertical

du traceur (par exemple en $[\text{Vs/m}^2]$ par V) ? Raisonner pour chacun des deux types d'installations (transformateur PHYWE et cylindrique).

Choisir l'une des deux installations expérimentales pour la suite des expériences.

Choix 1 : transformateur PHYWE

- Relever le cycle d'hystérèse du transformateur PHYWE, d'abord lorsqu'il est ouvert, puis lorsqu'il est fermé avec le bloc PHYWE (bleu). Vérifier que l'on peut obtenir plusieurs cycles (plusieurs valeurs de H_m). Déterminer les paramètres essentiels. Que se passe-t-il si l'on effectue un balayage asymétrique ($H_m - 2H_m$ par exemple) ?
- Mêmes mesures que précédemment, mais en utilisant les autres matériaux à disposition (acier, aluminium, cuivre, etc.) pour fermer le transformateur PHYWE. Classez les échantillons en fonction de leur caractéristique magnétique.
- Déterminer la constante μ^* de chacun des matériaux.
- Observer la modification du cycle d'hystérèse quand vous empilez des matériaux identiques. Concluez.
- Observez la perte de la caractéristique d'hystérèse magnétique avec la séparation du bloc PHYWE avec l'installation du transformateur. Pour cela, vous disposez d'un certain nombre de plaques amagnétiques d'épaisseur de 0.5 mm que vous pouvez intercaler entre le transformateur et le bloc PHYWE. Proposer une explication.
- Le bloc PHYWE est composé de lamelles. Relever le cycle d'hystérèse suivant que les lamelles soient orientées verticalement ou à plat. Concluez.

Choix 2 : transformateur cylindrique

- Relevez le cycle d'hystérèse du vide (aucun échantillon). Le primaire est la partie ayant le moins de spires.
- Mêmes mesure que précédemment, mais en utilisant les matériaux à disposition (acier, aluminium, cuivre, laiton, nickel, monel, etc.).
- Trouvez une procédure pour calibrer les axes du traceur x - y.
- Déterminer (numériquement et pour une sélection de mesures) les différentes grandeurs ayant trait au cycle d'hystérèse (H_s, B_s, B_r, \dots), ainsi que la valeur de permittivité de chacun des matériaux.

Autres idées :

- Chercher et donner quelques applications des matériaux magnétiques, en mettant en évidence les caractéristiques particulières du cycle d'hystérèse utilisées dans ces applications
- Observez ce que l'on appelle un matériau ferromagnétique dur en remplaçant le transformateur (PHYWE ou cylindrique) par le transformateur en forme d'anneau (se trouve dans le dernier tiroir au fond). Quels changements frappants observez-vous sur le cycle d'hystérèse ?

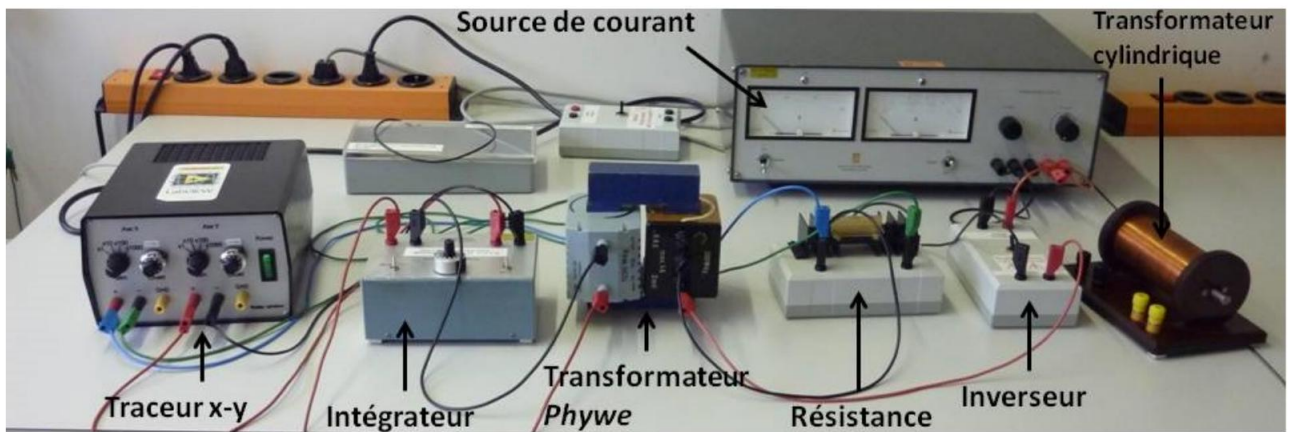


FIGURE 4 – Image de l'installation.

— Idées personnelles