

TP Cours

Ferromagnétisme - Transformateur

1. PROPRIETES DES MILIEUX FERROMAGNETIQUES

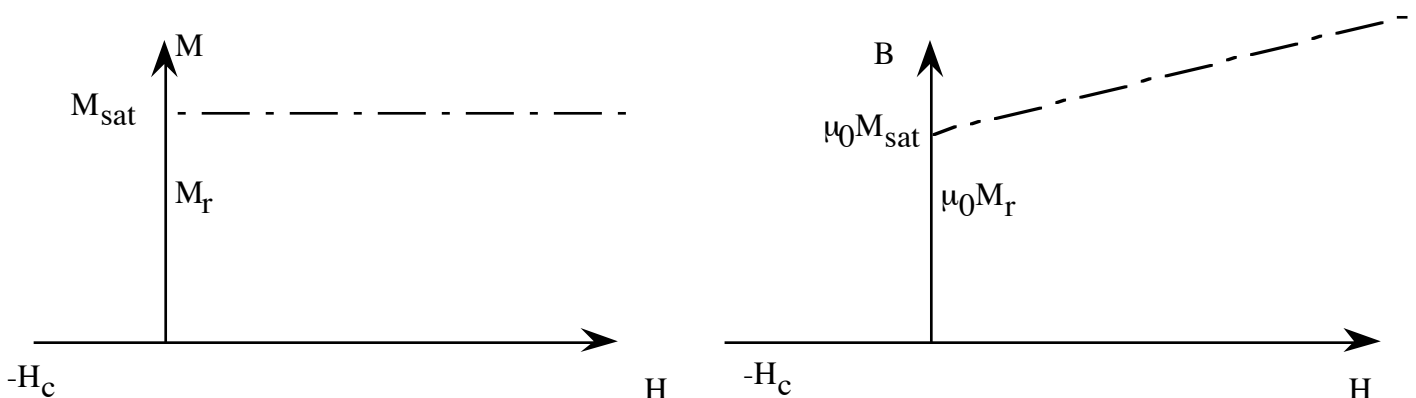
La réalisation de transformateurs nécessite l'utilisation de matériaux fortement aimantables. Ce sont les ferromagnétiques. Nous n'étudierons pas la théorie microscopique permettant d'expliquer le comportement particulier de l'aimantation dans ces milieux et nous nous contenterons de donner les caractéristiques et manifestations macroscopiques de l'application d'un champ magnétique dans ces matériaux.

1.1. Première aimantation : non linéarité

Lorsqu'on place un barreau de fer, jamais soumis auparavant à un champ magnétique, à l'intérieur d'un solénoïde, ce barreau de fer s'aimante : le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde est alors bien supérieur à celui qu'on obtiendrait dans un solénoïde vide.

En outre, lorsqu'on augmente le courant dans le solénoïde, le champ magnétique n'augmente pas proportionnellement : le phénomène est non-linéaire. Remarquons en revanche que d'après le théorème d'Ampère des milieux magnétiques, le vecteur \vec{H} garde lui un module proportionnel au courant circulant dans le solénoïde, puisqu'on peut toujours écrire $H = nI...$

La courbe $M = f(H)$ que l'on construit en soumettant le matériau pour la première fois à un champ magnétique (par l'intermédiaire de l'établissement du courant I) s'appelle **la courbe de première aimantation**. Elle a l'allure suivante :



Ses caractéristiques principales sont l'existence d'une **saturation** (M_{sat} peut atteindre quelques $10^6 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$) et la **non-linéarité** du phénomène avant saturation.

Quantitativement, on peut toujours poser $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$ mais en remarquant bien que χ_m n'est pas une **constante**. Sa valeur numérique maximale pour le fer par exemple est de l'ordre de 10000 : on voit bien à ce niveau la différence essentielle entre les ferromagnétiques et les paramagnétiques.

Le fait de bobiner des spires autour d'un matériau ferromagnétique et non "autour du vide" peut donc multiplier le champ qui traverse ces spires par 10000, et par conséquent également l'inductance propre du bobinage.

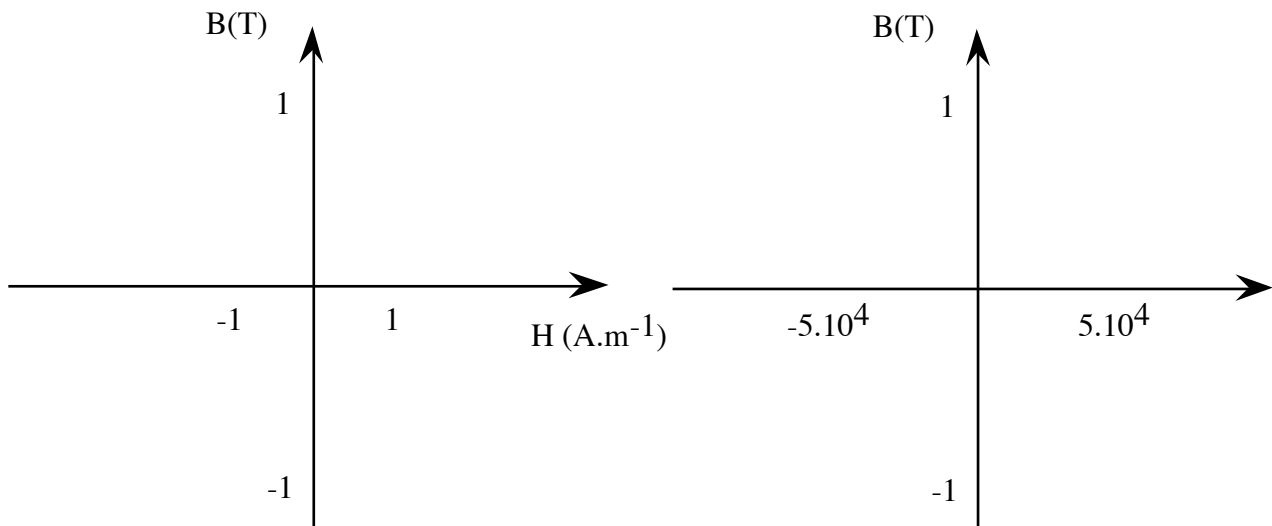
Retenons la relation :

$$\vec{M} = \chi_m(H) \vec{H} \quad \chi_m(H) \text{ très élevée}$$

1.2. Rémanence - hystérésis

Que se passe-t-il enfin quand on supprime le champ excitateur, c'est-à-dire quand on baisse le courant ? On ne repasse pas par les mêmes points de la courbe $M = f(H)$: il y a **hystérésis**, due à une **irréversibilité** microscopique du phénomène. **Notamment, en l'absence de tout courant I, le milieu garde une aimantation rémanente M_r , et donc un champ rémanent B_r . Il faudrait même faire circuler un courant négatif pour annuler ces valeurs rémanentes. La valeur correspondante de H est $-H_c$ où H_c est appelée excitation coercitive H_c .**

Quand le matériau est soumis à des courants sinusoïdaux, la courbe $B = f(H)$ (comme d'ailleurs la courbe $M = f(H)$), a l'allure d'un cycle : le **cycle d'hystérésis**.



Pour un même H, on peut donc avoir deux valeurs de B : **il est très important de remarquer que l'état d'aimantation d'un ferromagnétique dépend du champ auquel il est soumis, mais également de son "histoire" antérieure.**

On a fait figurer deux types de cycles auxquels correspondent deux types de ferromagnétiques : les ferromagnétiques **durs et doux** :

Ferromagnétiques durs :

- cycle "épais" : H_c très élevé supérieur à 10^3 A.m^{-1}
- donc utilisés pour fabriquer des aimants permanents (désaimantation difficile)
- matériaux : aciers, alliages tels que l'Alnico (Fe, Co, Ni, Al)

Ferromagnétiques doux :

- cycle "étroit" : H_c faible inférieur à 100 A.m^{-1}
- utilisés dans le cas d'appareils à courants et champs sinusoïdaux (nous verrons en effet que le phénomène d'hystérésis entraîne des pertes proportionnelles à la surface du cycle).

- matériaux : Fe + qq% Si, alliage Fe-Ni (Permalloy).

Citons pour terminer les corps **ferrimagnétiques** tels que les **ferrites** (oxydes mixtes de fer et d'un métal comme le zinc, de formule générale MO,Fe_2O_3). Ils possèdent une aimantation spontanée importante, mais une aimantation de saturation en général plus faible que pour les ferromagnétiques...

L'intérêt des ferrites doux est leur caractère fortement isolant, ce qui réduit les pertes par courants de Foucault et donc leur utilisation dans la fabrication de transformateurs (nous reviendrons sur ce point).

1.3. Désaimantation d'un matériau

Pour désaimanter un matériau en l'absence de champ extérieur ($B = 0$ et $H = 0$), il suffit de lui faire subir des cycles d'hystérésis d'amplitude de plus en plus faible en diminuant progressivement, en régime sinusoïdal, l'amplitude de l'excitation.

1.4. Influence de la température

La température joue un rôle important dans les propriétés d'un corps ferromagnétique. En effet celui-ci perd ces propriétés quand la température dépasse une température critique appelée **température de Curie**. Au delà de cette température le ferromagnétique redevient simplement paramagnétique. Ainsi un clou chauffé et porté à une température supérieure à T_c n'est plus attiré par un aimant.

Pour le fer, T_c est de l'ordre de 1000 K .

1.5. Synthèse

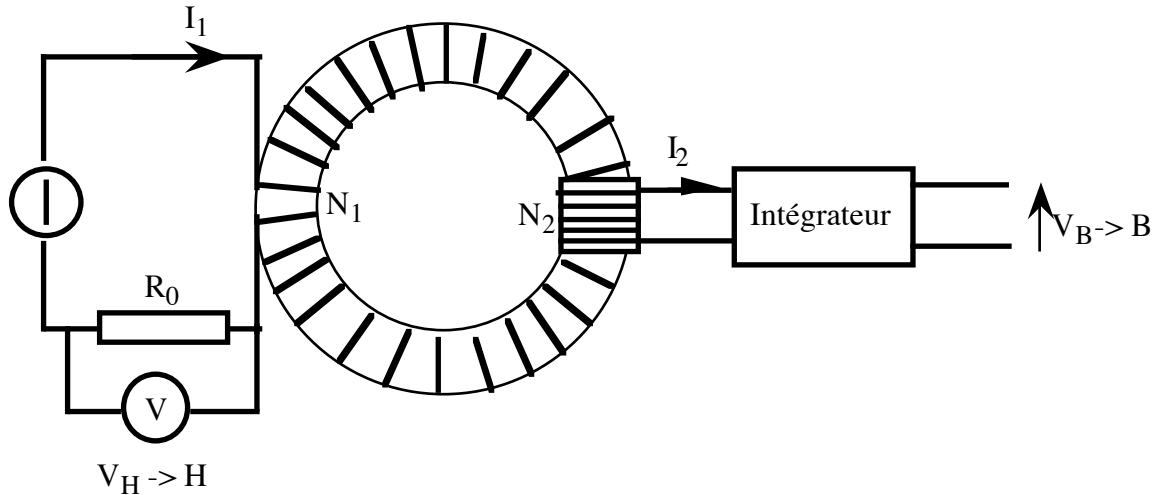
Les diverses études expérimentales permettent de dégager les propriétés macroscopiques fondamentales des milieux ferromagnétiques :

- **Forte aimantation**
- **Non-linéarité**
- **Aimantation rémanente et hystérésis**
- **Existence d'une température de Curie au-delà de laquelle disparaissent les propriétés ferromagnétiques**

2. TRACE EXPERIMENTAL DES CYCLES D'HYSTERESIS

2.1. Principe du dispositif expérimental

Pour construire expérimentalement les courbes $B = f(H)$ dont nous avons parlé nous utilisons le dispositif suivant : un tore ferri ou ferromagnétique, de circonférence moyenne \mathcal{L} , sur lequel on a enroulé N_1 spires reliées à une source :



Par symétrie, les lignes de champ de \vec{H} sont des cercles de même axe que le tore. En appliquant le théorème d'Ampère à \vec{H} , on voit que ce dernier est nul à l'extérieur du matériau, et uniforme à l'intérieur si le rayon d'une section du tore est petit devant le rayon du tore lui-même. On a :

$$\int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = N_1 I_1 = H \mathcal{L} \quad \text{d'où} \quad H = \frac{N_1 I_1}{\mathcal{L}}$$

H est proportionnel à I_1 , et donc aussi à la tension V_H aux bornes d'une résistance R_0 placée en série dans le circuit.

En outre, en enroulant N_2 spires supplémentaires sur le tore, et en recueillant la fem induite aux bornes de cet enroulement, à courant I_2 nul, on a :

$$e = - \frac{d\phi}{dt} = - N_2 S \frac{dB}{dt}$$

où S est la section du tore, et \vec{B} le champ magnétique total à l'intérieur du tore. A l'aide d'un intégrateur, on a donc accès à \vec{B} (et à \vec{M} par $\vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H}$) par l'intermédiaire de la tension V_B en sortie d'intégrateur. Il est donc possible de visualiser le cycle d'hystérésis en représentant la courbe $V_B = f(V_H)$.

2.2. Maquette utilisée

2.2.1. Amplificateur de puissance

Dans les expériences qui suivront, les N_1 spires du « primaire » ne sont pas alimentées directement par le générateur de fonctions, mais reliées à lui par l'intermédiaire d'un amplificateur de puissance. La puissance délivrée par le générateur est en effet trop faible pour effectuer des mesures significatives.

En outre, l'amplificateur permettra, dans une certaine mesure, de disposer d'une source de tension ou de courant indépendante de la charge, c'est-à-dire du circuit alimenté, ce qui ne serait pas le cas du générateur de fonctions, de résistance interne 50Ω , s'il sort sur une impédance trop faible.

Le générateur alimente l'ampli de puissance par l'entrée E_p . La sortie de l'ampli s'effectue entre les bornes S_p et R_p . Il faut noter que le circuit de sortie comprend alors en série une résistance $R = 1 \Omega$, par l'intermédiaire de laquelle on a accès au courant I_1 qui circule.

On peut transformer la source de tension entre S_p et R_p par une source de courant, en reliant les bornes C_c et R_p .

2.2.2. Amplificateur de mesure du courant

Le deuxième amplificateur est un simple ampli non inverseur. Les valeurs des résistances sont telles que $V_{C1} = 10 V_{RP}$ ou $V_{C1} = 100 V_{RP}$ suivant que la résistance entre C_1 et C_2 est court-circuitée ou non. Comme $V_{RP} = R I_1$, on obtient, **numériquement** :

$$V_{C1} = 10 I_1 \text{ ou } V_{C1} = 100 I_1$$

2.2.3. Intégrateur

On retrouve le montage classique de l'intégrateur ($R_{iA} = 2,7 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \mu\text{F}$), avec une résistance R_{iB} en parallèle sur C , pour palier aux défauts de l'A.O. Cette résistance, très élevée, permet d'obtenir un montage intégrateur pour des fréquences supérieures à $0,1 \text{ Hz}$!

Cependant, pour éviter toute dérive, il est nécessaire de procéder à un réglage d'offset de l'A.O. grâce au potentiomètre :

*Court-circuiter les entrées + et - de l'A.O. et agir **délicatement** sur le potentiomètre pour obtenir une tension de sortie nulle.*

2.3. Visualisation du cycle d'hystérésis

Le tore en ferrite est alimenté par la source de courant. Les N_2 spires du secondaire sont reliées à l'intégrateur. Grâce aux bornes BNC, on peut sortir, en X, la tension V_{C1} , proportionnelle à H , et en Y, la tension V_{si} , proportionnelle à B .

L'oscillo, réglé en mode XY permet alors de visualiser le cycle.

Réaliser le montage avec les valeurs : fréquence du signal 50 Hz , amplification en courant 100 , $N_2 = 20$ spires.

Observer tout d'abord sur l'oscillo les tensions V_{Cl} et V_{SP} , quand le tore est alimenté en courant, puis en tension. Commenter.

Agir sur le générateur de fonctions pour obtenir un « beau » cycle.

Observer qualitativement l'influence de l'amplitude et de la fréquence du signal d'entrée.

Reprendre les mêmes questions avec le tore en fer, alimenté par un signal de fréquence 20 Hz.

2.4. Grandeurs caractéristiques du cycle

A l'aide du logiciel Synchronie on peut enregistrer les cycles sur ordinateur et en déduire les grandeurs H_C , B_r , et un ordre de grandeur de μ_r à la saturation par exemple.

Déterminer les constantes numériques reliant V_{Cl} à H et V_{Si} à B . Enregistrer les cycles des matériaux en fer et en ferrite. Évaluer les grandeurs caractéristiques du cycle : H_c , B_r , $\mu_{r,sat}$ et M_{sat} .

2.5. Pertes par hystérésis

Intéressons-nous enfin à l'aspect énergétique du phénomène d'hystérésis : revenant au dispositif expérimental constitué par le tore magnétique sur lequel on a bobiné N_1 spires, on peut dire que la puissance délivrée par la source à ces spires est $P = I_1(V_1 - V_2)$, où $(V_1 - V_2)$ représente la tension aux bornes des spires. En négligeant leur résistance (ou plus exactement en laissant de côté le classique effet Joule), on a $(V_1 - V_2) = -e = \frac{d\phi}{dt} = N_1 S \frac{dB}{dt}$. On a vu d'autre part que $I = \frac{HL}{N_1}$. D'où :

$$P = H L S \frac{dB}{dt}$$

La puissance p délivrée par le générateur, **par unité de volume du matériau**, peut donc s'écrire :

$$p = H \frac{dB}{dt}$$

Sur le cycle d'hystérésis, la puissance moyenne s'écrit alors :

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T H \frac{dB}{dt} dt = f \oint_{\text{Cycle}} H dB$$

Le générateur fournit donc une puissance au matériau ferromagnétique, puissance nécessaire pour qu'il parcourt son cycle : on parle de **pertes par hystérésis**.

Le calcul précédent montre que ces pertes sont proportionnelles à la fréquence et à l'aire du cycle :

$$\text{Puissance volumique moyenne perdue par hystérésis : } p = f \oint_{\text{Cycle}} H dB$$

3. ETUDE DU TRANSFORMATEUR EN FER

Celui-ci sera, sauf avis contraire, alimenté en courant, sous la fréquence nominale de 50 Hz. Le secondaire comportera 40 spires.

3.1. Bilan d'énergie

Rappelons que du point de vue strictement énergétique, le transformateur réel présente des pertes :

- **les pertes cuivre** : pertes dans les enroulements primaire et secondaire.

On peut les mesurer en faisant un essai en court-circuit du transformateur : la puissance délivrée par le primaire se réduit alors aux pertes cuivre (car les courants sont forts).

- **les pertes fer** : pertes dans le matériau lui-même :

|| pertes par hystérésis
|| pertes par courants de Foucault dans le cadre ferromagnétique

On montre que ces pertes, pour une fréquence donnée, sont proportionnelles au carré de la tension primaire V_1 .

On peut les mesurer en faisant un essai « à vide » du transformateur : la puissance délivrée au primaire se réduit alors aux pertes Fer (car les courants sont faibles).

En résumé :

$$P_1 = P_2 + P_{Cu} + P_{Fer}$$

Toutes ces considérations font donc que le rendement énergétique d'un transformateur réel est inférieur à 1...

3.2. Étude à vide

A vide, le courant au secondaire est évidemment nul. Le courant au primaire se réduit alors au courant magnétisant I_0 et les pertes aux pertes fer (le courant dans le primaire étant faible, les pertes cuivre sont ici négligeables par rapport aux pertes fer).

Au primaire, en négligeant la chute de tension dans l'enroulement N_1 , on a $V_1 \approx -e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}$.

Il en résulte que :

- la loi des tensions est bien vérifiée.
- la loi $V_1 = f(I_1)$ est non linéaire. Le transfo n'est pas un dipôle linéaire.
- la puissance délivrée représente les pertes fer, proportionnelles à V_1^2 , et, à basse fréquence, à la fréquence (les pertes par courants de Foucault proportionnelles à la fréquence au carré, sont négligeables).

Vérifier expérimentalement les deux premières conséquences.

Pour étudier la puissance moyenne au primaire, on dispose d'un multiplieur et d'un filtre passe-bas :

- on envoie en V_a le signal V_{C1} réglé de sorte que $V_{C1} = 10 I_1$. On envoie en V_b et la masse la tension $V_G \approx V_1$ (chute de tension dans R négligeable). Le multiplieur sort alors la tension instantanée $V_m = V_1 I_1$ **numériquement** .

- V_m est envoyée à l'entrée du filtre passe-bas dont la sortie S_F est égale à la partie continue de V_m , c'est à dire sa valeur moyenne. **Numériquement** $S_F = \langle V_1 I_1 \rangle$.

Il suffit alors de mesure S_F à l'aide d'un voltmètre réglé en continu (DC).

Étudier les variations de P_1 vis à vis de V_1 et de la fréquence.

3.3. Étude en court-circuit

Le courant I_2 est ici le courant de court-circuit : il est donc élevé, et c'est au contraire le courant magnétisant qui est négligeable.

De même, c'est cette fois ci e_1 qui est négligeable au primaire devant la chute de tension dans les N_1 spires de l'enroulement. Il en résulte que :

- La loi des courants est bien vérifiée.
- La relation $V_1 = f(I_1)$ est linéaire : le transfo devient un dipôle linéaire.
- La puissance délivrée au primaire est dissipée dans les enroulements : elle mesure les pertes cuivre, proportionnelles à I_2^2 , donc à I_1^2 .

En pratique :

- La tension d'alimentation, et le courant I_1 doivent rester suffisamment peu élevés pour que le courant I_2 n'endommage pas les spires du secondaire.

- La mesure du courant de court-circuit est très difficile : placer un ampèremètre au secondaire revient en effet à le fermer sur une résistance d'environ 10Ω et non plus un court-circuit.

Pour la mesure de I_2 , on opérera alors comme suit : on place en parallèle aux bornes du secondaires un **voltmètre**, et une résistance de $0,5 \Omega$ (formée par 2 résistances de 1Ω en parallèle). La mesure de la tension permet alors d'accéder au courant...

Vérifier expérimentalement les relations associées au transformateur en court-circuit.

3.4. Étude en charge

Le secondaire est à présent fermé sur une boîte de résistances R_h placée en série avec un ampèremètre. Un voltmètre est placé aux bornes de l'ensemble. On peut alors mesurer la puissance P_2 disponible au secondaire.

Étudier, en fonction de la résistance R_h , les lois des tensions, des courants, et le rendement en puissance.