

Cycle d'hystérésis magnétique

par Michel JANNIN, François PAUTY
et Jacques BOUILLOT,
Université de Dijon.

I. PRINCIPE.

Le matériau soumis à l'étude constitue un circuit magnétique de forme torique. La section de ce tore, par un plan passant par l'axe de révolution est de forme rectangulaire.

La hauteur du tore est $h = 30$ mm, son diamètre intérieur est $d_i = 65$ mm, son diamètre extérieur est $d_e = 125$ mm.

Un courant I circule dans un circuit primaire I de $N_1 = 20$ spires. Le matériau est alors soumis à un champ magnétisant H (fig. 1).

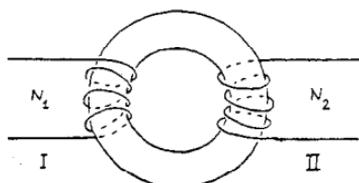


Fig. 1

La variation de flux qui a été créée lors de l'établissement du courant magnétisant est recueillie par un circuit secondaire II de $N_2 = 80$ spires.

Il est alors possible de déterminer l'induction B prise par le tore.

Le cycle d'hystérésis du matériau constituant le tore est défini par les variations de B en fonction de H (fig. 2).

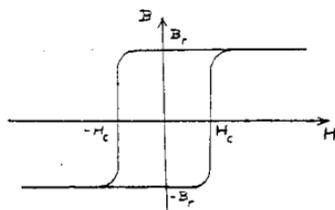


Fig. 2

On définit le champ coercitif H_c et l'induction rémanente B_r .

II. ETUDE DU CYCLE D'HYSTERESIS A L'OSCILLOSCOPE.

C'est une étude dynamique.

II.1. Schéma de principe du montage (fig. 3).

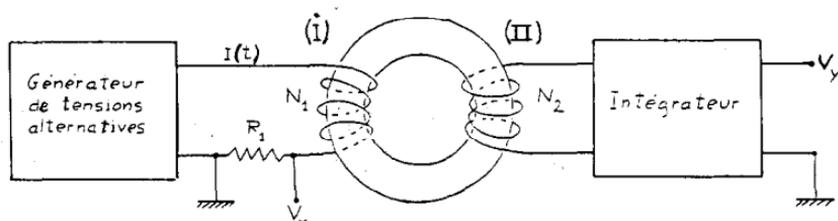


Fig. 3

II.2. Détermination des valeurs de H et B.

a) Mesure du courant magnétisant puis détermination du champ magnétisant.

On fait passer le courant magnétisant dans une résistance fixe $R_1 = 2 \Omega$. La tension V_X obtenue aux bornes de cette résistance est envoyée aux bornes X d'un oscilloscope.

Déterminons la relation qui lie H à V_X .

On a : $V_X = R_1 \times I$.

On suppose que le module du champ magnétisant H est uniforme dans le tore. Par raison de symétrie, ce champ magnétisant est constamment normal aux sections droites (de centre C) du tore, et on peut calculer la circulation sur le cercle que décrit le centre C. Le théorème d'Ampère donne :

$$H \times \pi \frac{d_i + d_e}{2} = N_1 I.$$

D'où la relation cherchée :

$$H = \frac{2 N_1}{(d_i + d_e) \pi R_1} V_X$$

$$H \text{ (A/m)} = 33,5 V_X \text{ (V)}.$$

b) Mesure de l'induction B prise par le tore.

Les variations du flux ϕ qui sont engendrées par les variations du courant magnétisant I induisent aux bornes du secondaire des tensions $e(t) = -\frac{d\phi}{dt}$.

Soit :

$$\phi = - \int e(t) dt.$$

Comme le circuit magnétique présente une grande perméabilité relative, il concentre parfaitement toutes les lignes d'induction. On peut donc exprimer facilement l'induction B en fonction du flux ϕ qui traverse les N_2 spires de l'enroulement secondaire.

La surface de la section du circuit magnétique par un plan passant par l'axe de révolution étant :

$$S = \frac{d_e - d_i}{2} \times h$$

on a :

$$\phi = N_2 S B$$

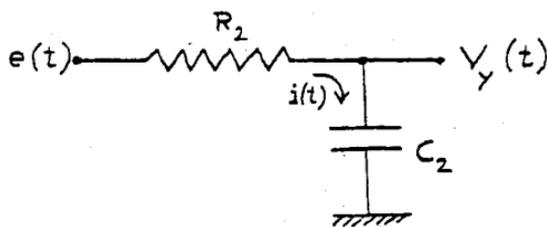
d'où :

$$B = - \frac{2}{N_2 (d_e - d_i) h} \int e(t) dt.$$

L'intégrale par rapport au temps de la tension $e(t)$ induite aux bornes du secondaire est bien proportionnelle à B .

Pour réaliser l'intégration de la tension $e(t)$, montrons que l'on peut utiliser un simple circuit résistance capacité série; précisons les conditions de son emploi.

Soit le circuit :



On a :

$$i(t) = \frac{e(t) - v_y(t)}{R_2} = C_2 \frac{dv_y(t)}{dt}.$$

On peut écrire :

$$v_y(t) = \frac{1}{R_2 C_2} \int e(t) dt$$

à condition que la tension $v_y(t)$ soit toujours négligeable par rapport à la tension $e(t)$.

Cette condition peut se réaliser car $e(t)$ est une tension alternative de période T qui correspond au temps mis pour décrire le cycle.

La valeur moyenne de $e(t)$ est nulle :

$$\overline{e(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T e(t) dt = 0.$$

La condition que l'on doit satisfaire peut s'écrire sous la forme :

$$v_y(t) = \frac{T}{R_2 C_2} \times \frac{1}{T} \int e(t) dt \ll e(t).$$

Cette inégalité doit être satisfaite quelle que soit la valeur de $\frac{1}{T} \int e(t) dt$, il faut donc choisir des valeurs de capacité C_2 et résistance R_2 très grandes de façon que la quantité $R_2 C_2$ soit très supérieure à T .

On a choisi :

$$\left\{ \begin{array}{l} T = 20 \cdot 10^{-3} \text{ s} \\ R_2 = 1,5 \times 10^5 \\ C_2 = 1,5 \times 10^{-6} \text{ F} \\ \text{soit } R_2 C_2 = 2,25 \times 10^{-1} \text{ s.} \end{array} \right.$$

La tension $v_y(t)$ est alors appliquée à l'entrée y de l'oscilloscope ; la déviation verticale du spot est donc bien proportionnelle à l'induction B prise par le tore.

La relation qui lie B à v_y est :

$$B = - \frac{2 R_2 C_2}{N_2 (d_e - d_i) h} v_y$$

$$B(T) = 3,12 v_y(V).$$

III. ETUDE EXPERIMENTALE DES CYCLES D'HYSTERESIS.

III.1. Essai avec un générateur de tensions sinusoïdales à 50 Hz.

a) On réalise le montage (fig. 4) :

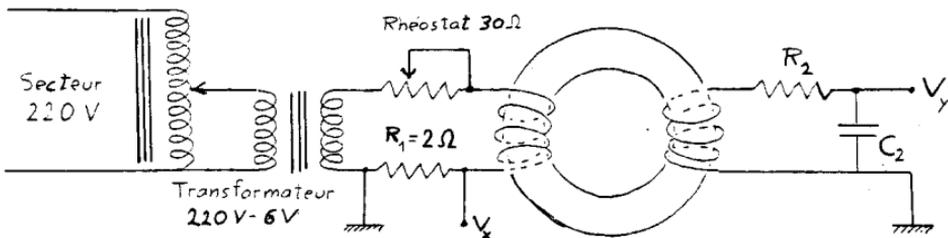


Fig. 4

En faisant croître l'amplitude de la tension sinusoïdale délivrée par le transformateur, on observe sur l'oscilloscope que le cycle se forme puis se sature.

On constate que ce cycle présente des distorsions importantes dans les parties qui correspondent au renversement de l'aimantation; de plus, on voit que lorsqu'on le sature plus ou moins la valeur du champ coercitif H_c varie fortement, par contre, l'induction rémanente B_r reste constante.

b) Analysons les raisons de ces anomalies :

1) ETUDE DE LA DISTORSION DU CYCLE.

Le signal d'attaque utilisé pour magnétiser le tore est une tension sinusoïdale fournie par un générateur de tension.

Pour connaître la loi de variation du champ magnétisant H , il suffit de connaître celle du courant I qui circule dans l'enroulement primaire. On a en effet montré que H était proportionnel à I .

L'oscillogramme de la tension V_x en fonction du temps montre que l'on a des anomalies très importantes de courant. Ces anomalies apparaissent au moment du renversement de l'aimantation (fig. 5).

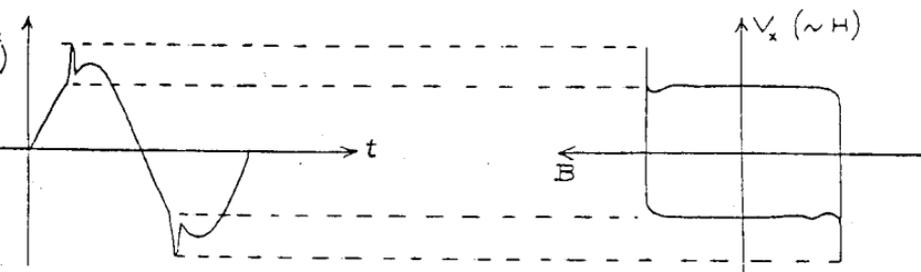


Fig. 5

Ce sont ces pics de courant qui induisent les distorsions importantes du cycle dans les régions qui correspondent aux renversements de l'aimantation.

Pour étudier un cycle d'hystérésis magnétiques, il faut donc que le champ magnétisant varie sans discontinuité avec une loi connue. On doit donc faire une attaque en courant du circuit de magnétisation.

On réalise pour cela un convertisseur tension-courant. Le courant de sortie de cet appareil ne dépend pas de la valeur de la charge qui est connectée à sa sortie. C'est un générateur de courant programmable par une tension (*).

(*) Les schémas électroniques peuvent être fournis à la demande.

Les cycles d'hystérésis obtenus avec une attaque sinusoïdale en courant ne présentent plus de distorsion, mais on observe toujours que l'amplitude mesurée pour le champ coercitif croît lorsqu'on sature plus fortement le matériau.

2) ETUDE DE LA VARIATION ANORMALE DE LA VALEUR MESURÉE DU CHAMP COERCITIF.

a) Analyse et solution du phénomène.

Le champ coercitif H_c est le champ nécessaire pour renverser l'aimantation. On remarque que l'amplitude de ce champ dépend de la vitesse à laquelle s'effectue le renversement de l'aimantation. Si on désire obtenir un renversement rapide, il faut l'effectuer avec un champ magnétisant croissant rapidement, on observera alors que le champ correspondant au renversement est d'amplitude élevée.

Ce qui fixe la valeur du champ coercitif pour un matériau donné, c'est le taux de variation du champ magnétisant $\delta H/\delta t$ dans le temps au moment où s'effectue le renversement de l'aimantation.

L'étude des cycles d'hystérésis ne doit donc pas être faite en fonction de la fréquence du champ magnétisant (comme on le fait souvent à tort), mais en fonction du taux de variation du champ magnétisant dans le temps, au moment du renversement de l'aimantation. Le signal d'attaque du circuit primaire du tore sera donc choisi de façon que le champ magnétisant ait en tout point du cycle un taux de variation constant dans le temps. Le courant d'excitation qui circule dans le circuit primaire du tore devra donc varier de façon triangulaire dans le temps.

Pour attaquer le convertisseur « tension-courant », on a construit un générateur (*) de signaux triangulaires symétriques dont la fréquence varie continûment de 50 Hz à 0,005 Hz. L'amplitude du signal de sortie varie de deux façons :

- à fréquence fixe à l'aide d'un réglage classique d'amplitude appelé A_{FF} ;
- à fréquence glissante de telle façon que l'on ait, quelle que soit l'amplitude du signal, un taux de variation constant dans le temps $\delta v/\delta t = Cte$; cette variation s'effectue à l'aide de la commande d'amplitude notée A_{FG} .

β) Vérification avec un champ magnétisant variant triangulairement à la fréquence de 50 Hz.

- Modification du montage III 1 a.

On remplace la source d'excitation par le convertisseur « tension - courant » piloté par le générateur de tension en triangle symétrique.

— Mesures.

L'amplitude de sortie délivrée par le générateur étant maximale, on règle la fréquence du signal triangulaire à 50 Hz.

On observe un cycle d'hystérésis sans distorsion et fortement saturé.

On fait alors décroître l'amplitude de l'excitation à l'aide du réglage A_{FF} opérant à fréquence fixe : on constate que le champ coercitif décroît.

Cela est normal puisque, au cours de cette opération effectuée à fréquence constante, le taux de variation du champ magnétisant reste bien constant tout au long du cycle mais change de valeur lorsqu'on fait varier l'état de saturation.

On fait donc décroître maintenant l'amplitude de l'excitation à l'ordre du réglage A_{FG} opérant à fréquence glissante. Le taux de variation du champ magnétisant est alors toujours constant quel que soit le point du cycle et quel que soit l'état de saturation. On constate effectivement que le champ coercitif demeure inchangé au cours de l'opération.

III.2. Etude des cycles d'hystérésis en fonction du taux de variation du champ magnétisant.

α) MODIFICATION DU MONTAGE POUR L'ÉTUDE DES CYCLES EN RÉGIME TRÈS LENT.

Examinons l'allure des cycles réalisés avec des taux de variation de champ magnétisant de plus en plus petits. On s'aperçoit que les tranches de saturation des cycles sont progressivement remplacées par des boucles de plus en plus importantes. Cela provient du fait que le circuit $R_2 C_2$ ne se comporte plus comme un intégrateur parfait, la période T du signal intégré devenant trop grande. On va donc utiliser un intégrateur électronique que nous avons réalisé (*). Sa fonction de transfert est :

$$v_s = \frac{1}{\tau} \int v_e(t) dt.$$

La constante de temps τ de cet intégrateur a été choisie égale au produit $R_2 C_2$.

Le montage du traceur de cycle est donc le suivant (fig. 6) :

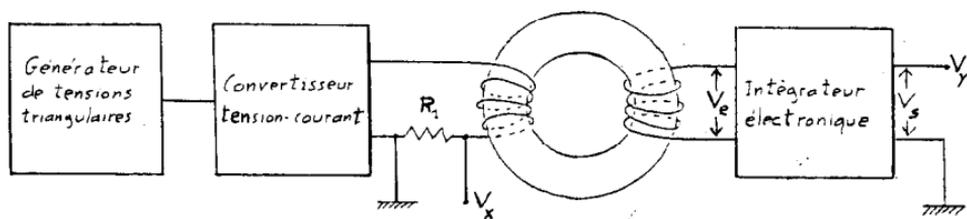


Fig. 6

Pour l'étude des cycles avec de très faibles taux de variation du champ magnétisant, on remplace l'oscilloscope par une table traçante x, y .

β) MESURES SUR UN MATÉRIAU DUR (Tôles de Rectimphy, 50 % Ni).

— Remarques.

1) Nous allons étudier le cycle d'hystérésis d'un matériau dur lorsque le champ magnétisant varie entre 6 350 A/m/s et 0,55 A/m/s.

Pour réaliser cette étude, nous nous imposons de toujours prendre la même excursion du champ magnétisant H .

Nous avons choisi la valeur crête $(\Delta H)_{\text{crête}} = 31,8$ A/m, car elle est suffisante pour que les cycles soient toujours saturés quels que soient les taux de variation du champ magnétisant que nous ayons employé.

Puisque la variation du champ magnétisant est linéaire dans le temps, il est facile de relier le taux de variation de ce champ dans le temps, soit $\delta H / \delta t$ à la fréquence N à laquelle le cycle est décrit :

$$\frac{\delta H}{\delta t} = 4 (\Delta H)_{\text{crête}} \times N.$$

L'étude d'un cycle d'hystérésis peut donc être faite en fonction de la fréquence N à laquelle il est mesuré, mais il faut :

- que le cycle soit toujours saturé,
- opérer avec un champ magnétisant variant linéairement dans le temps,
- que, quelle que soit la fréquence N de l'étude, les variations du champ magnétisant soient symétriques et d'amplitudes extrémales égales à $2(\Delta H)_{\text{crête}}$, valeur constante suffisamment grande pour que les cycles soient toujours saturés.

2) Pour toutes les fréquences de l'étude, on a constaté que l'induction rémanente B_r avait la même valeur $B_r = 0,374$ T.

Comme le matériau soumis à l'étude est un matériau dur, le cycle d'hystérésis a une allure très rectangulaire, on peut donc évaluer très facilement la perte d'énergie que l'on obtiendrait si 1 m³ de ce matériel décrivait un cycle saturé, puisque l'énergie perdue par unité de volume de matériau subissant un cycle est :

$$\Delta W = \int_{\text{cycle}} H dB \quad \Delta W = \text{aire du cycle (H, B)} = 4 H_c B_r$$

— Résultats.

1) Allure des cycles (fig. 7) :

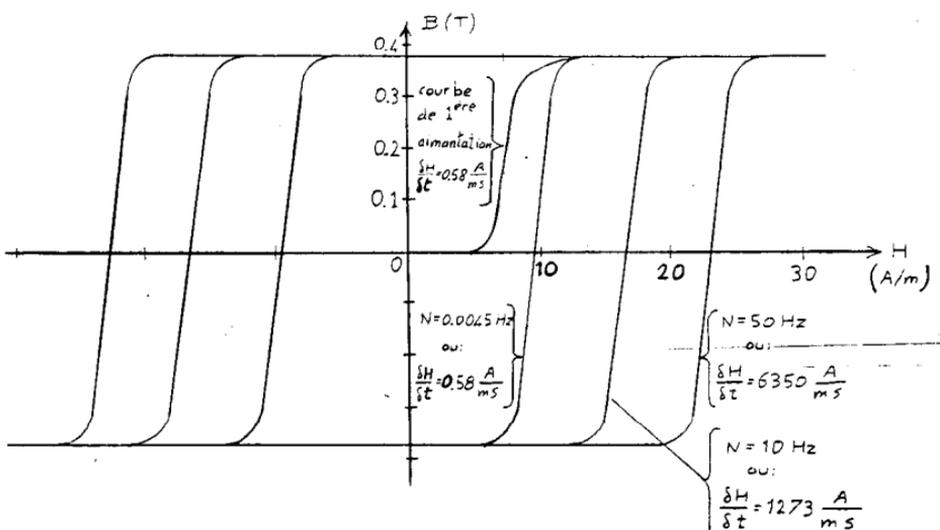


Fig. 7

On a reporté sur ce graphique la courbe de première aimantation du matériau, elle est mesurée pour $\delta H / \delta t = 0,58 \text{ A/m.s}$.

2) Courbes de variation du champ coercitif ou des pertes par hystérésis en fonction du taux de variation du champ magnétisant ou de la fréquence à laquelle les cycles sont décrits :

En traçant deux échelles différentes sur les axes d'abscisse et d'ordonnée, on peut représenter par la même courbe les variations du champ coercitif et des pertes par hystérésis en fonction soit de $\delta H / \delta t$, soit de N (fig. 8).

— Désaimantation d'un matériau dur.

Cette désaimantation est nécessaire lorsque l'on veut faire une courbe de première aimantation.

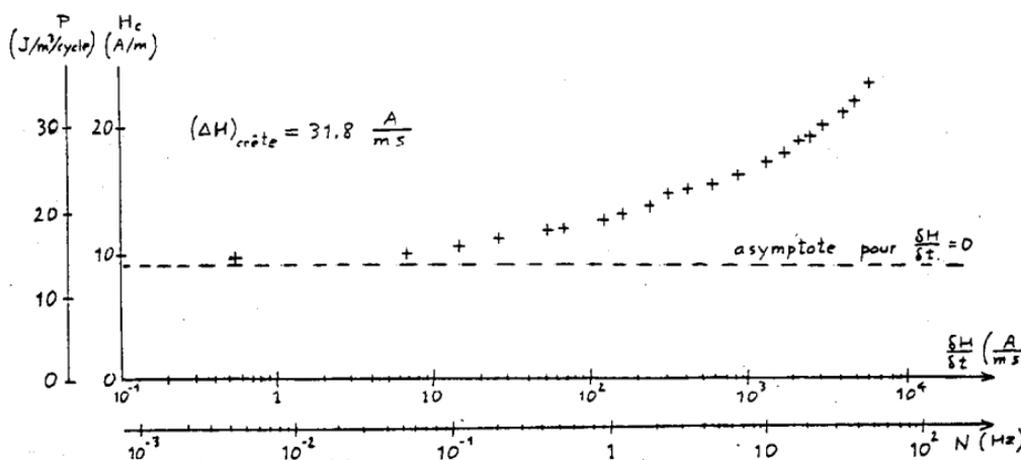


Fig. 8

Le phénomène d'hystérésis fait que l'aimantation d'un matériau est en général non nulle, lorsque l'on a annulé le champ magnétisant.

Pour désaimanter un matériau dur, il faut lui faire décrire des cycles d'hystérésis d'amplitude de plus en plus faibles, jusqu'à une amplitude nulle.

La désaimantation peut être contrôlée de façon expérimentale. Il faut qu'au cours de l'opération de désaimantation, les cycles d'amplitude régulièrement décroissante restent toujours centrés sur les axes que l'on a tracé sur le cycle saturé de départ.

On observe expérimentalement que le processus de désaimantation ne conduit pas toujours à la désaimantation du matériau.

Il faut souvent recommencer plusieurs fois l'opération de désaimantation avant d'observer la régression du cycle sur le centre du cycle saturé du départ.

On a constaté que la désaimantation est acquise très facilement lorsque la fréquence de l'excitation est voisine de 20 Hz, alors qu'à 50, il faut couramment effectuer trois ou quatre opérations pour obtenir la désaimantation.

— Courbe de première aimantation.

On doit en premier lieu désaimanter le tore.

On choisit ensuite un réglage de générateur de signaux triangulaires tel que l'amplitude maximale qu'il fournit soit suffisamment grande pour que le matériau puisse se saturer et tel que le taux de variation du champ magnétisant soit suffisamment

lent pour pouvoir exécuter un enregistrement graphique (on choisit un $(\Delta H)_{crete} = 31,8 \text{ A/m}$ et un taux $\delta H/\delta t = 0,58 \text{ A/m/s}$). Pendant ces réglages, on maintient la tension de sortie du générateur à une valeur nulle, au moyen d'une commande spéciale (zéro) qui, une fois relâchée, fait débiter le signal de sortie à partir de la valeur nulle.

La courbe de première aimantation se trace alors directement sur la table traçante.

III.3. Etude du cycle d'hystérésis en régime quasistatique.

— Préliminaires.

On a donc étudié le cycle d'hystérésis du matériau avec des taux de variation du champ magnétisant, de plus en plus faibles. On a constaté que le champ coercitif et les pertes par hystérésis diminuaient avec le taux de variation du champ exciteur.

On constate expérimentalement que la valeur du champ coercitif tend vers une valeur limite inférieure lorsque le taux de variation du champ magnétisant tend vers zéro. Graphiquement, on obtient : $H_c(\text{statique}) = 9,5 \text{ A/m}$.

Réalisons donc une étude statique du cycle d'hystérésis pour déterminer les valeurs limites du champ coercitif et des pertes par hystérésis.

— Montage expérimental (fig. 9) :

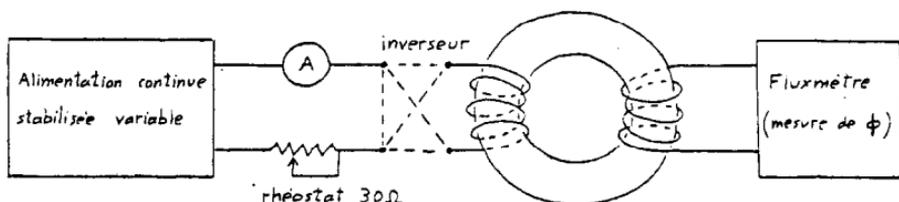


Fig. 9

— Détermination de H et B à partir des mesures du courant I et de la variation du flux ϕ .

On a déjà démontré les formules :

$$H = \frac{2 N_1}{\pi (d_e + d_i)} \times I \quad H (\text{A/m}) = 67 I (\text{A})$$

$$B = \frac{2}{N_2 (d_e - d_i) h} \times \phi \quad B (\text{T}) = 13,9 \phi (\text{Wb}).$$

— Tracé point par point de la courbe de première aimantation et du cycle d'hystérésis.

- *Courbe de première aimantation.*

Le matériau étant soigneusement désaimanté, on fait croître I de la valeur zéro jusqu'à ce que l'on obtienne la saturation du matériau, la valeur correspondante de I est alors I_{max} . Ayant noté les variations du flux, on trace alors la courbe $B = f(H)$, dite courbe de première aimantation.

- *Cycle d'hystérésis.*

Après avoir étudié la courbe de première aimantation, on fait décroître I de I_{max} à 0, puis par le jeu de l'inverseur, de 0 à $-I_{max}$. La mesure simultanée de I et de la variation du flux permet de tracer la première branche du cycle d'hystérésis. La deuxième branche est obtenue de façon analogue en faisant varier I de $-I_{max}$ à $+I_{max}$. On constate que la courbe obtenue n'est fermée que si les mesures effectuées au cours de deux branches le sont dans des conditions analogues.

On observe que la valeur obtenue pour B_r n'est que de 0,358 T. Elle est plus faible que celle (0,374 T) obtenue par la méthode dynamique avec l'intégration. Cela provient du fait que dans la méthode quasistatique, on doit mesurer des variations très lentes de flux et à cause des frottements, le fluxmètre ne peut pas dévier autant qu'il le devrait.

La valeur du champ coercitif que l'on a obtenue est : $H_c (statique) = 9,3$ A/m, ce qui est en bon accord avec la valeur extrapolée $H_c = 9,5$ A/m, à partir des résultats de mesure en régime dynamique.

IV. CONCLUSION.

Cet appareillage permet d'enregistrer des cycles avec des très faibles distorsions. Il est alors possible, par un examen attentif des graphes obtenus, de déceler la présence d'irrégularités pendant le renversement de l'aimantation. Ce phénomène est lié au mouvement non uniforme des domaines magnétiques, lorsque leurs parois sont bloquées au niveau des défauts du matériau. L'étude du cycle d'hystérésis en fonction du taux de variation du champ magnétisant explique clairement pourquoi on obtient des valeurs différentes pour le champ coercitif et les pertes par hystérésis lorsque l'on réalise seulement des mesures statiques et des mesures dynamiques à 50 Hz.
