

**Centrale – Supélec PSI – Extrait**

**I. Bobines à noyau ferromagnétique**

On considère un tore, de section  $S$ , réalisé dans un matériau ferromagnétique et dont la longueur du cercle moyen a pour valeur  $\ell$ . On admettra dans tout le problème que  $S \ll \ell^2$ . Sur ce tore on enroule régulièrement  $N$  spires jointives de fil de cuivre et on alimente cet enroulement par un générateur de tension continue de force électromotrice réglable, permettant de faire évoluer le courant  $I$  sur l'intervalle  $[-I_{max}, I_{max}]$  (cf. figure 1). On suppose par ailleurs qu'un dispositif de mesure approprié permet de mesurer la valeur du champ magnétique dans le matériau ferromagnétique.

**I.A -** En supposant que le champ magnétique est uniforme dans une section droite du tore, déterminer l'expression de l'excitation magnétique  $\vec{H}$  en fonction de  $\ell$ ,  $N$ ,  $I$  et d'un vecteur unitaire que l'on précisera. On justifiera en particulier avec soin la direction et le sens de  $\vec{H}$  dans le matériau magnétique.

**I.B -**

**I.B.1)** Le matériau ferromagnétique n'ayant jamais subi au préalable d'aimantation, quelle est l'allure de la courbe de première aimantation  $B = f(H)$  reliant les modules des champs  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$ , obtenue lorsque l'on fait croître  $I$  de manière monotone depuis la valeur 0 jusqu'à la valeur  $I_{max}$  ?

**I.B.2)** Quel phénomène met-on en évidence lorsque  $I_{max}$  prend des valeurs de plus en plus importantes ?

**I.B.3)** Après avoir effectué l'expérience de la question I.B.1, on fait décroître  $I$  de manière monotone de  $I_{max}$  jusqu'à  $-I_{max}$ , puis à nouveau croître de manière monotone de  $-I_{max}$  à  $I_{max}$ . Quelle est l'allure de la courbe  $B = f(H)$  que l'on obtient ? Pourquoi est-il important de faire varier  $I$  de manière monotone ?

**I.C -** On alimente maintenant le bobinage par une source de tension sinusoïdale de pulsation  $\omega$  et d'amplitude  $E_{max}$ . On négligera la chute de tension dans la résistance interne  $R_g$  du générateur. Montrer que le flux du champ magnétique  $\vec{B}$  dans le tore est nécessairement sinusoïdal, mais qu'il n'en est pas toujours de même pour le courant  $I$  qui circule dans cette bobine.

**I.D -** On place sur le tore un deuxième bobinage comportant  $n$  spires et on recueille la tension  $v$  aux bornes de ce bobinage, lorsque le premier bobinage est alimenté par une tension sinusoïdale. Proposer un montage simple permettant de visualiser au moyen d'un oscilloscope la variation du module du champ magnétique  $B$  en fonction du module de l'excitation magnétique  $H$ . Vous expliquerez les choix que vous avez faits en donnant des ordres de grandeur réalistes pour les différents composants choisis pour faire cette expérience en supposant que la fréquence utilisée est 50 Hz .

Figure 1

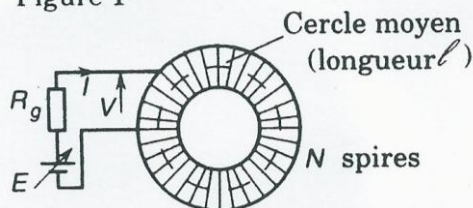


Figure 2

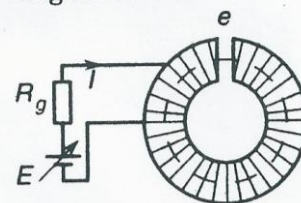
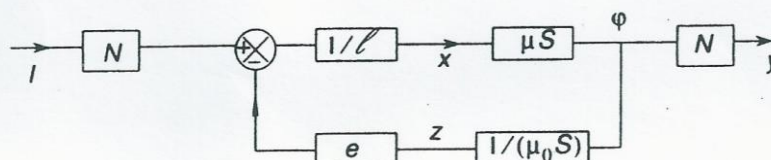


Figure 3



**I.E** - Quelles sont les origines des pertes énergétiques dans les milieux magnétiques en régime dynamique ? Comment varient-elles en fonction de la fréquence des signaux appliqués ?

**I.F** - Lorsqu'on veut travailler à fréquence élevée doit-on plutôt utiliser un matériau en ferrite ou en acier ? Quel est l'intérêt du feuilletage des tôles ? Comment doit-il être réalisé si on veut qu'il soit efficace ?

**I.G** -

**I.G.1)** Définir les notions de champ magnétique rémanent et de champ coercitif.

**I.G.2)** Le premier bobinage, ou bobinage primaire, étant alimenté comme indiqué au I.C, que représente la puissance absorbée par ce bobinage primaire, le circuit secondaire étant ouvert ? Pourquoi peut-on en général considérer que la puissance dissipée par effet Joule est faible dans cette expérience ?

**I.G.3)** Dans les conditions du I.C, le courant  $I$  qui circule dans le bobinage primaire peut être décomposé en série de Fourier. Montrer que la puissance  $P$  absorbée ne fait intervenir qu'un seul harmonique du courant.

**I.H** - On considère maintenant le tore précédent mais pour lequel on a effectué une coupure d'épaisseur  $e$  dans le matériau ferromagnétique (cf. figure 2). On supposera  $e \ll \ell$ . On réalise à nouveau un bobinage de  $N$  spires jointives régulièrement réparties comme précédemment. Cette bobine est à nouveau alimentée sous une tension continue  $E$  et il circule un courant  $I$  dans la bobine. On admettra que la coupure ne modifie pas les lignes de champ décrites en I.A, bien qu'une partie de celles-ci ne soit plus maintenant dans le milieu ferromagnétique.

**I.H.1)** Montrer que le module du champ magnétique  $\vec{B}$  est le même dans le milieu ferromagnétique et dans l'entrefer. Exprimer  $B$  en fonction de  $N$ ,  $I$ ,  $\ell$ ,  $e$ ,  $\mu_0$ , et  $\mu$  perméabilité magnétique absolue du matériau ferromagnétique.

**I.H.2)** On définit la perméabilité apparente  $\mu_a$  du tore coupé, comme celle d'un tore de longueur moyenne  $\ell$ , ne comportant pas d'entrefer, qui avec le même bobinage parcouru par le même courant, créerait le même champ magnétique. Calculer  $\mu_a/\mu_0$  en fonction de  $\mu/\mu_0$ ,  $\ell$  et  $e$ . Faire l'application numérique pour :  $\ell = 4,5\text{cm}$  ;  $e = 0,4\text{mm}$  ;  $\mu/\mu_0 = 2 \times 10^3$ . Que devient  $\mu_a/\mu_0$  si  $\mu/\mu_0 \rightarrow \infty$  (milieu magnétique parfait) ? Comparer l'inductance propre du tore avec entrefer et du tore sans entrefer de perméabilité  $\mu_a$  (tore équivalent).

**I.H.3)** Montrer que le système électromagnétique formé du tore avec entrefer peut être modélisé par le schéma bloc de la figure 3, où  $S$  est la section du tore et  $\varphi$  le flux à travers une spire. On précisera les grandeurs représentées par  $x$ ,  $v$  et  $z$ .

**I.H.4)** Calculer la fonction de transfert  $y/I$ . Quelle est sa signification ? Comment peut-on interpréter l'effet d'un entrefer dans un circuit magnétique, compte tenu de ce schéma bloc ?

### III. Mesure de courants forts

La mesure d'un courant fort  $i$  circulant dans un circuit  $C$ , sans perturber ce dernier, est facilitée par la création, dans un autre circuit isolé de  $C$ , d'un courant  $I$ , "image" de  $i$  mais beaucoup plus faible. On utilise pour cela un tore identique à celui étudié dans la partie I dans l'entrefer duquel on place une sonde à effet Hall

La perméabilité magnétique de la sonde est assimilable à  $\mu_0$  perméabilité du vide. Le courant  $i$  à étudier circule dans les  $n$  spires bobinées sur le tore ( $n$  peut se réduire à 1). Le courant "image"  $I$  circule dans un deuxième circuit comprenant  $N$  spires également bobinées sur le tore. La sonde, alimentée par un courant continu  $I_0$  permet, pour toute valeur de  $i$  d'asservir  $I$  à la valeur qui annule  $B$  dans l'entrefer. Les courants  $i$  et  $I$  sont ainsi liés.

**III.A** - Pour alimenter la sonde et pouvoir régler le courant  $I_0$ , on réalise un montage utilisant un amplificateur opérationnel supposé idéal (cf. figure 5). Exprimer le courant  $I_0$  en fonction de  $E$  et de  $R_1$ . La résistance ohmique de la sonde modifie-t-elle le courant  $I_0$ ? Comment se comporte le montage ainsi réalisé pour alimenter la sonde?

**III.B** - Montrer qu'un choix convenable du courant image  $I$  permet d'annuler le champ  $B$  dans l'entrefer, lorsqu'on fait circuler un courant  $i$  dans le circuit de mesure (on supposera négligeable le champ magnétique rémanent).

**III.B.1)** Exprimer le courant image  $I$  en fonction de  $i$ ,  $N$  et  $n$  lorsque  $B = 0$ .

**III.B.2)** Montrer qu'un choix convenable de l'orientation algébrique des deux bobinages permet d'obtenir deux intensités  $i$  et  $I$  de même signe.

**III.B.3)** Comment choisir  $n$  et  $N$  ?

**III.C** - L'annulation du champ  $B$  est observée à l'aide de la sonde à effet Hall et permet d'asservir le courant image  $I$  au courant à étudier  $i$ , de façon que, pour toute valeur du courant à étudier  $i$ , on puisse créer un courant image  $I$  tel que le champ  $B$  soit toujours nul dans l'entrefer.

Exprimer cette tension  $V_H$  lorsque circule, dans le bobinage de  $n$  spires, le courant à étudier  $i$  et, dans le bobinage de  $N$  spires, un courant  $I$ . Montrer que l'on peut écrire  $V_H = K\varepsilon$  avec  $\varepsilon = ni - NI$ . On précisera l'expression de  $K$ .

N.B. : La tension de Hall de la sonde est donnée par la relation  $V_H = \alpha I_0 B$ , où  $\alpha$  est une constante

