

# PSI\* 2014 - 2015

## TD N°10 - Ferromagnétisme - Transformateurs

### EXERCICE 1 : Choix d'un matériau

A l'aide du tableau suivant, préciser si les matériaux proposés peuvent être utilisés dans :

- un transformateur basse fréquence
- un transformateur haute fréquence
- un aimant permanent

Composition	$\mu_0 M_{\text{sat}}$ (T)	$B_r$ (T)	$H_c$ (A.m <sup>-1</sup> )	résistivité ( $\mu\Omega$ .cm)
Fer 3%Silicium	2	1	25	48
Acier	1,8	1,0	$4 \cdot 10^3$	50
Fer 50% Nickel	1,6	1	1	45
Samarium Cobalt	1,7	0,75	$5 \cdot 10^5$	55
Ferrite 1	0,35	0,1	18	$10^6$
Ferrite 2	0,6	0,4	$2,2 \cdot 10^5$	$10^7$
Ferrite 3	0,48	0,15	30	$10^8$

### EXERCICE 2 : Réfraction des lignes de champ

Une surface plane sépare un milieu magnétique linéaire, homogène et isotrope, de perméabilité relative  $\mu_r$  et l'air ( $\mu_{r,\text{air}} = 1$ ).

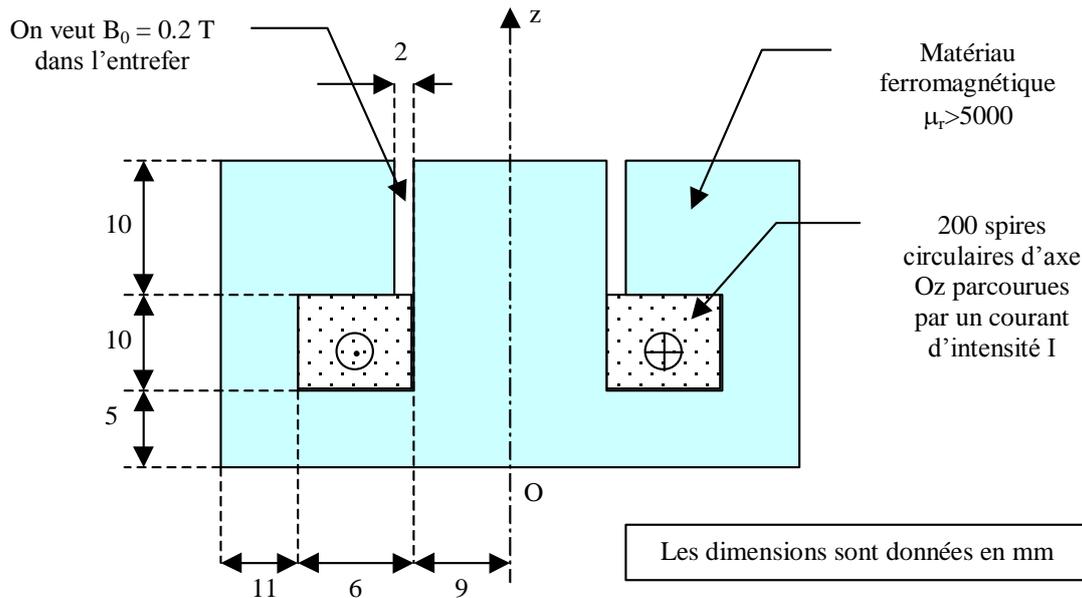
On indique que la composante normale de l'induction est continue ainsi que la composante tangentielle de l'excitation (respectivement grâce à M-T et M-A).

On considère une ligne de champ du champ magnétique. Déterminer la relation entre les angles  $\beta_{\text{ferro}}$  et  $\beta_{\text{air}}$  que fait cette ligne de champ avec la normale à la surface de séparation respectivement dans le milieu ferromagnétique et l'air. Conclure sur la valeur de l'angle  $\beta_{\text{ferro}}$  et sur la canalisation des lignes de champ.

### EXERCICE 3 : Electroaimant

On considère la structure schématisée page suivante : le système est de révolution autour de l'axe Oz ; les dimensions sont données en millimètre. Il existe 200 spires parcourues par un courant d'intensité I. Le vecteur induction magnétique dans l'entrefer est noté  $B_0$ .

1. En utilisant la géométrie du système, les propriétés connues des matériaux magnétiques sans ou avec entrefer, proposer une description qualitative des lignes de champ magnétique.
2. Préciser la structure, et l'ordre de grandeur du champ  $B_0$  dans l'entrefer annulaire d'épaisseur e de l'électroaimant.
3. Quelle valeur faut-il donner au courant I pour avoir  $B_0 = 0,2$  T ? Commenter cet ordre de grandeur.



#### EXERCICE 4 : Etude d'un circuit magnétique

Ce problème porte sur l'étude de transformateurs utilisés en régime permanent en électronique de puissance, tels que représenté à la figure 1, page 2. Le circuit est constitué de quatre tronçons (1, 2, 3 et 4) d'un matériau ferromagnétique ; ces tronçons sont séparés par quatre entrefers identiques, de longueur  $e$ . Les tronçons 1 et 3, de même section  $S_1$ , sont entourés par des bobinages, qualifiés de « primaire » pour le tronçon 1 et de « secondaire » pour le tronçon 2 ; ces tronçons sont parcourus par des courants d'intensités respectives  $i_p$  et  $i_s$ . La section commune des tronçons 2 et 4 est notée  $S_2$ . La caractéristique  $b(h)$  idéalisée dans le matériau magnétique est représentée figure 2. Elle est symétrique par rapport au point O, linéaire pour  $|h| \leq H_{sat}$  et affine pour  $|h| \geq H_{sat}$ . Le régime saturé commence dès que

$|h| \geq H_{sat}$ . On note  $h_e$  et  $b_e$  les grandeurs magnétiques usuelles au niveau des entrefers. On néglige les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Les autres hypothèses d'étude sont les suivantes :

- toutes les lignes de champ sont canalisées par le circuit magnétique ;
- le champ magnétique est uniforme séparément dans chacune des pièces ferromagnétiques et dans les entrefers ;
- pour le calcul de circulation du champ excitation magnétique  $H$ , on prend, pour chaque tronçon, la longueur de la ligne de champ moyenne.

□ 1 – La conservation du flux du champ magnétique entraîne d'une part l'égalité  $b_1 = b_e$ , d'autre part une relation entre  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $S_1$  et  $S_2$ . Donner cette dernière relation.

□ 2 – Dédurre du théorème d'Ampère la relation liant  $h_1|_1$ ,  $h_2|_2$ ,  $eh_e$  et  $\varepsilon = N_p i_p - N_s i_s$ . Dans la suite, la grandeur  $\varepsilon$  sera nommée *force magnétomotrice* du circuit.

□ 3 – Sachant que le tronçon 1 commence à se saturer pour  $b = B_{sat} = B_{sat}^{(1)}$ , donner l'expression et la valeur numérique de  $b = B_{sat}^{(2)}$  pour lesquels le tronçon 2 commencera à se saturer lui aussi. Que représente le rapport  $A = \frac{B_{sat}}{H_{sat}} = \frac{1,2}{600} = 2 \times 10^{-3} \text{ T.m.A}^{-1}$  ?

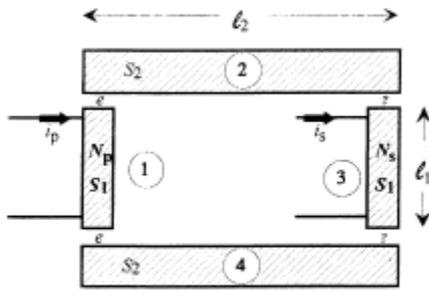


Fig. 1 : Circuit magnétique. Les sections 1 et 3, de section  $S_1$ , sont entourées de bobinages.

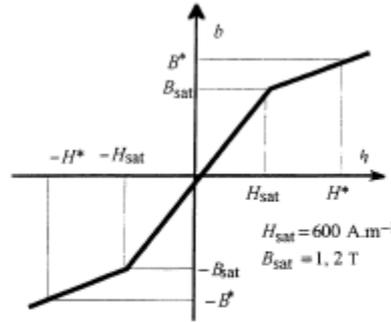


Fig. 2 : Caractéristique magnétique du matériau. Pour fixer les idées,  $H^* = 5300 \text{ A.m}^{-1}$  et  $B^* = 1,6 \text{ T}$ .

□ 4 – Donner, en fonction de  $A$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $e$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $\mu_0$  et  $\varphi = b_1 S_1$ , l'expression littérale de  $\varepsilon$  en régime non saturé ( $0 \leq b \leq B_{\text{sat}}^{(1)}$ ). Cette expression définit  $R$  par  $\varepsilon = R \varphi$ ;  $R$  est appelée *réductance équivalente* à l'ensemble du circuit magnétique lorsque celui-ci n'est pas saturé, Vérifier que  $R$  s'exprime en  $\text{H}^{-1}$  (inverse de henry) et calculer sa valeur numérique.

□ 5 – On suppose ici que  $B_{\text{sat}1} \leq b \leq B_{\text{sat}2}$ ; préciser l'état de saturation de chacune des parties. Lorsque  $|h| \geq H_{\text{sat}}$ , on pose  $b = Ch + D$ . Préciser les dimensions respectives de  $C$  et  $D$ . Donner l'expression littérale de  $\varepsilon$  en fonction de  $\varphi$ . Les valeurs numériques des constantes  $C$  et  $D$  se déduisent des données de la Fig. 2 et l'on trouve  $\varepsilon \approx 1,06 \times 10^6 \varphi - 4860$ .

□ 6 – On suppose maintenant que  $b \geq B_{\text{sat}2}$ . Donner l'expression littérale de  $\varepsilon(\varphi)$ . Numériquement, on trouve  $\varepsilon \approx (1,60 \times 10^6) \varphi - 8370$ .

Tracer sommairement cette caractéristique pour  $|\varepsilon| \leq 8 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ . Rassembler dans le même tableau les relations numériques  $\varepsilon(\varphi)$  et  $\varphi(\varepsilon)$  correspondant aux trois états de saturation du circuit magnétique. Préciser les valeurs numériques des coordonnées des points anguleux de cette caractéristique. On les notera  $\pm \varepsilon^{(1)}$ ,  $\pm \varphi^{(1)}$ ,  $\pm \varepsilon^{(2)}$  et  $\pm \varphi^{(2)}$ .

$l_1$	Longueur commune de la ligne de champ moyenne dans les tronçons 1 et 3.	$l_1 = 18 \text{ cm}$
$S_1$	Section commune des tronçons 1 et 3.	$S_1 = 44 \text{ cm}^2$
$b_1$	Champ magnétique commun aux sections 1 et 3.	Variable
$h_1$	Excitation magnétique commune aux sections 1 et 3.	Variable
$N_p$	Nombre de spires de l'enroulement primaire.	$N_p = 1000$
$i_p (i_s)$	Intensité du courant dans l'enroulement primaire (secondaire).	Variable
$l_2$	Longueur commune de la ligne de champ moyenne dans les tronçons 2 et 4.	$l_2 = 13 \text{ cm}$
$S_2$	Section commune des tronçons 2 et 4.	$S_2 = 54 \text{ cm}^2$
$b_2$	Champ magnétique commun aux sections 2 et 4.	Variable
$h_2$	Excitation magnétique commune aux sections 2 et 4.	Variable
$N_s$	Nombre de spires de l'enroulement secondaire.	$N_s = 700$
$e$	Longueur d'un entrefer.	$e = 0,1 \text{ mm}$
$b_e$	Champ magnétique dans les entrefers.	Variable
$h_e$	Excitation magnétique dans les entrefers.	Variable