

ELECTROTECHNIQUE

Électromagnétisme

Michel PIOU

Chapitre 3

Mise en œuvre d'un aimant permanent

08/02/2011

Extrait de la ressource en ligne *MagnElecPro* sur le site Internet iutenligne.net

TABLE DES MATIERES.

1. POURQUOI ET COMMENT ?.....	1
2. MISE EN OEUVRE D'UN AIMANT	2
2.1 Caractéristique des matériaux ferromagnétiques utilisés comme aimant	2
2.2 Mise en œuvre d'un aimant dans un circuit magnétique en fonctionnement statique.	3
2.3 Fonctionnement en régime variable. Droite de recul.	4
2.4 Association d'un aimant et d'un bobinage dans un circuit magnétique.	6
3. CE QUE J'AI RETENU DE CE CHAPITRE	7
4. EXERCICE	7
Chap 3. Exercice 1 : Etude d'un dispositif à aimant.	7
5. REPONSES DU CHAPITRE « MISE EN ŒUVRE D'UN AIMANT PERMANENT ».....	9

Copyright : droits et obligations des utilisateurs

Ce document est extrait de la ressource *MagnElecPro* qui est disponible en version numérique sur le site Internet *IUT en ligne*

Je ne renonce pas à ma qualité d'auteur et aux droits moraux qui s'y rapportent du fait de la publication de mon document.

Les utilisateurs sont autorisés à faire un usage non commercial, personnel ou collectif, de ce document et de la ressource *MagnElecPro*, notamment dans les activités d'enseignement, de formation ou de loisirs. Tout ou partie de cette ressource ne doit pas faire l'objet d'une vente - en tout état de cause, une copie ne peut pas être facturée à un montant supérieur à celui de son support.

Pour tout extrait de ce document, l'utilisateur doit maintenir de façon lisible le nom de l'auteur *Michel Piou*, la référence à *MagnElecPro* et au site *Internet IUT en ligne*.

Michel PIOU - Agrégé de génie électrique – IUT de Nantes - FRANCE

1. POURQUOI ET COMMENT ?

Les aimants permanents constituent une classe particulière de circuits magnétiques. Ils obéissent aux lois de la physique (en particulier la loi de conservation du flux et le théorème d'Ampère).

Mais contrairement aux circuits magnétiques dit « linéaires » pour lesquels on approxime la relation $B(H)$ par $B = \mu.H$ avec μ constant, les aimants utilisent l'existence de l'hystérésis dans les matériaux ferromagnétiques.

On ne peut donc pas leur appliquer la théorie des circuits magnétiques linéaires.

Beaucoup de progrès ont été faits ces dernières années dans les matériaux ferromagnétiques pour aimants, ce qui a permis un développement considérable de leur marché.

On trouve des aimants permanents dans les moteurs électriques synchrones ou les moteurs à courants continus (depuis le micromoteur de 0,8 mm de diamètre jusqu'à des moteurs de quelques centaines de kW). On en trouve aussi dans les fermetures de placards, dans les écouteurs de baladeurs et dans les bandes magnétiques d'enregistrement.

On pourrait continuer longtemps cette liste...

Prérequis :

La maîtrise des chapitres 1 et 2 est indispensable.

Objectifs :

Nous limiterons notre approche à deux cas particuliers :

- Choix d'un aimant pour un circuit magnétique série (sans bobinage).
- Superposition des états magnétique en présence d'un aimant et d'un bobinage.

Méthode de travail :

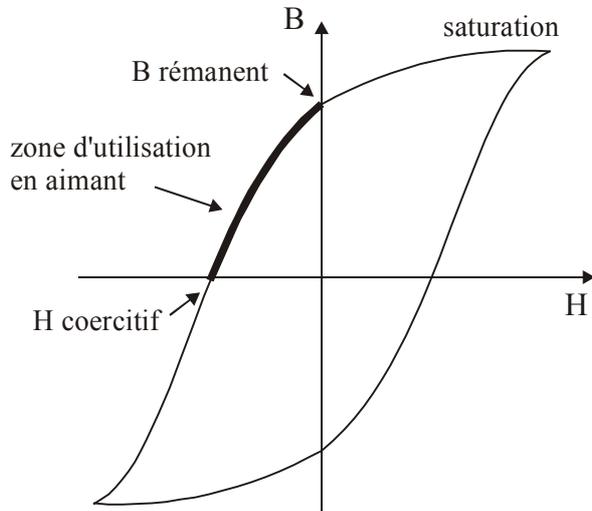
En fin de chapitre, le paragraphe intitulé " ce que j'ai retenu de ce chapitre " permettra de vérifier individuellement que les connaissances essentielles ont bien été acquises.

Travail en autonomie :

Pour permettre une étude du cours de façon autonome, les réponses aux questions du cours sont données en fin de document.

2. MISE EN OEUVRE D'UN AIMANT

2.1 Caractéristique des matériaux ferromagnétiques utilisés comme aimant

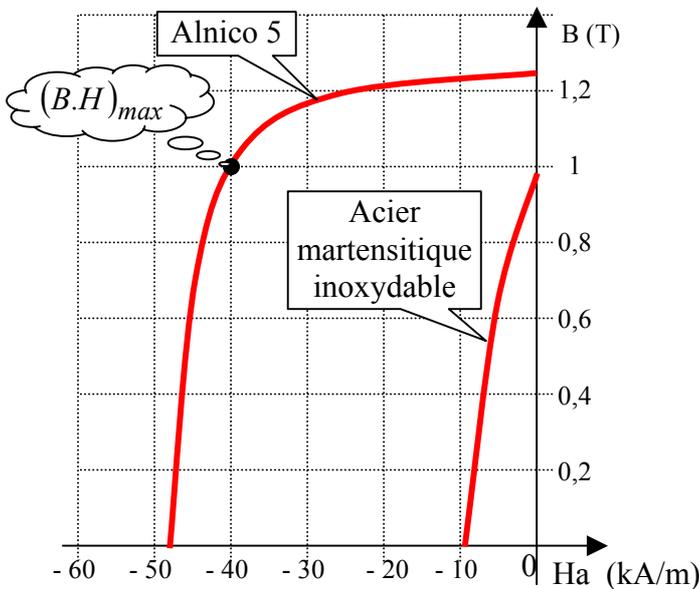


Il existe différents matériaux utilisés pour la fabrication des aimants. Ils varient par leurs performances et aussi par leur coût.

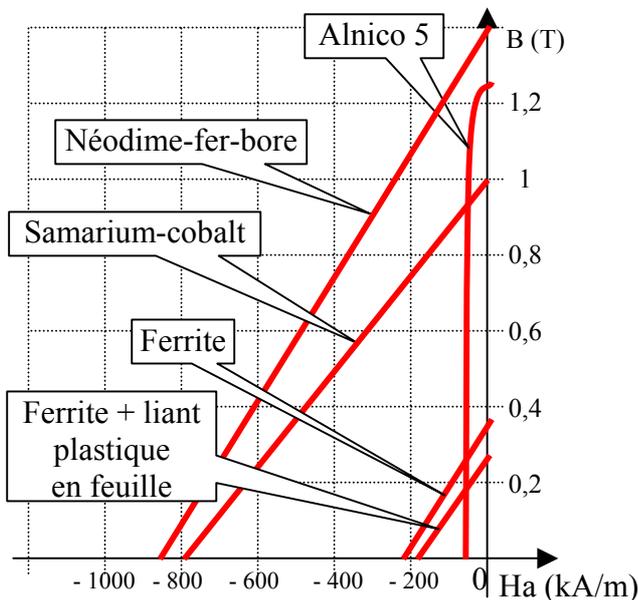
Tous utilisent une zone particulière du cycle d'hystérésis des matériaux ferromagnétiques (voir ci contre).

On utilise généralement des matériaux ayant une grande valeur de $B_{\text{rémanent}}$ et de $H_{\text{coercitif}}$.

En voici quelques exemples:



Les exemples ci-contre sont des caractéristiques de matériaux relativement anciens encore utilisés pour des aimants. Les matériaux plus récents (voir ci-après) présentent des champs coercitifs beaucoup plus importants.



Les exemples ci-contre sont des caractéristiques de matériaux modernes utilisés pour les aimants. On peut les comparer à l'alnico 5...

Leurs caractéristiques sont généralement linéaires.

Elles sont approximativement parallèles telles

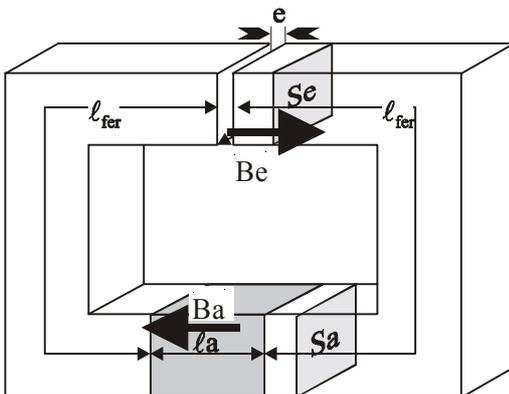
$$\text{que } \frac{\Delta B_a}{\Delta H_a} \approx \mu_0.$$

Les prix au kg varient dans un rapport 1 à 5 ou 1 à 10 entre les moins performants (ferrites) et les plus performants (néodyme-fer-bore et cobalt-terres rares).

2.2 Mise en œuvre d'un aimant dans un circuit magnétique en fonctionnement statique.

2.2.1 Critère d'Evershed.

Soit le circuit magnétique ci-dessous constitué d'un aimant de longueur ℓ_a et de section droite S_a , d'un circuit « fer » de longueur ℓ_{fer} et d'un entrefer de longueur e et de section droite S_e .



a) En utilisant la loi de conservation du flux et en supposant le circuit magnétique sans fuite, établir la relation entre $\|\vec{B}_a\|$ et $\|\vec{B}_e\|$.

b) Sachant que dans le « fer », l'aire de la section droite du circuit magnétique est du même ordre de grandeur que dans l'entrefer, et que la perméabilité magnétique du fer est 1000 ou 10000 fois plus grande que dans l'air, en déduire que $\|\vec{H}_{fer}\| \ll \|\vec{H}_{entrefer}\|$.

c) Etablir le théorème d'Ampère sur la fibre moyenne (en négligeant la circulation du champ d'excitation magnétique dans le « fer » devant celle dans l'entrefer):

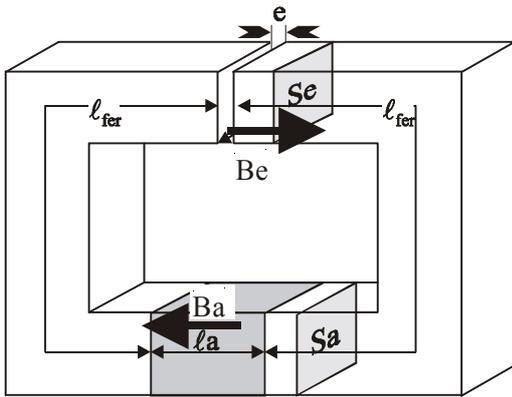
d) A partir des deux expressions précédentes, exprimer le volume de l'aimant: $\ell_a.S_a$. Montrer que, pour un entrefer donné et un champ d'induction dans celui-ci fixé, le volume de l'aimant est inversement proportionnel au produit $|B_a.H_a|$.

Pour minimiser le volume de l'aimant (et donc son coût), il faut choisir le produit $|B_a.H_a|$ le plus grand possible. (C'est le **critère d'Evershed**).

Les constructeurs de matériaux donnent le $|B_a.H_a|_{\max}$ (en j/m^3), appelé « énergie spécifique ».

(Réponse 1:)

2.2.2 Exemples de calcul d'un aimant en fonctionnement statique



- Exemple de calcul avec l'alnico 5:

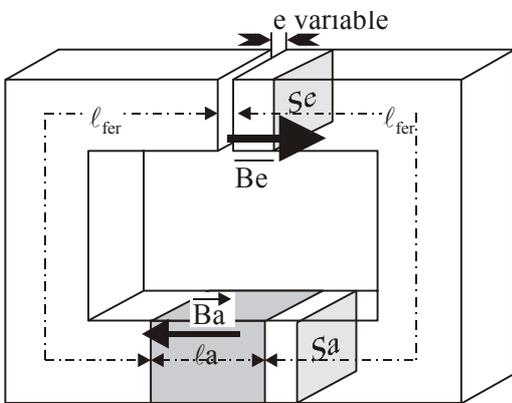
Sachant que $S_e = 4 \text{ cm}^2$ et $e = 2 \text{ mm}$. On veut obtenir un champ d'induction dans l'entrefer de 0,5 T en utilisant un aimant en alnico 5 à son $|B_a \cdot H_a|_{\text{max}}$ (voir le point marqué sur la caractéristique).

En utilisant la conservation du flux et le théorème d'Ampère, calculer l_a et S_a , ainsi que le volume de l'aimant.

- Reprendre le même calcul si $B_a = 1,2 \text{ T}$. Comparer les deux volumes.

- Reprendre le calcul de l'aimant précédent si on utilise du Samarium-cobalt à son $(B_a \cdot H_a)_{\text{max}}$. (Réponse 2:)

2.3 Fonctionnement en régime variable. Droite de recul.



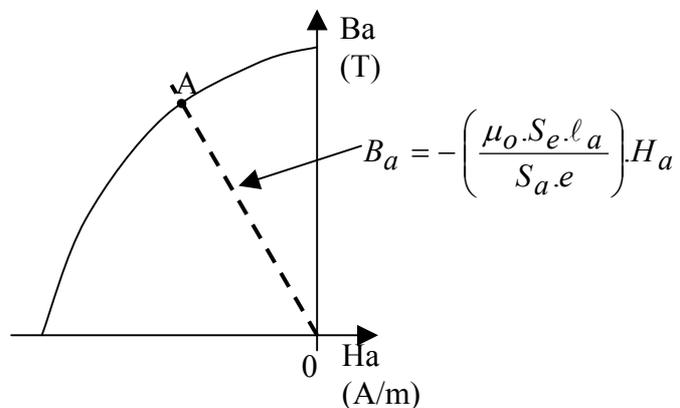
On suppose les dimensions de l'aimant constantes. La section droite « S_e » de l'entrefer est constante alors que son épaisseur « e » est variable.

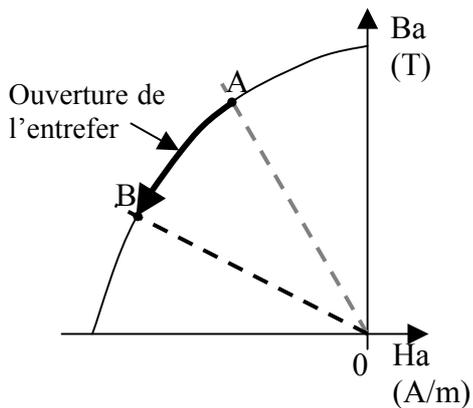
On peut remarquer que

$$\frac{B_a}{H_a} = \frac{B_e \cdot S_e}{S_a} \cdot \frac{-l_a}{H_e \cdot e} = \frac{-\mu_0 \cdot S_e \cdot l_a}{S_a \cdot e}$$

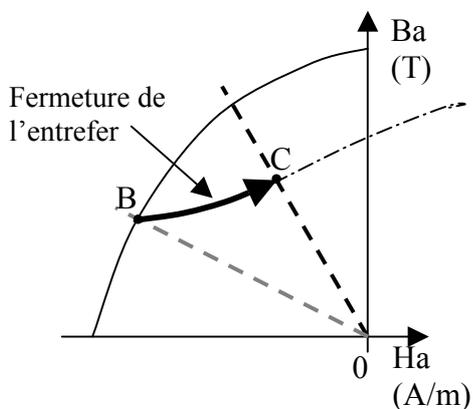
Pour une valeur de « e » donnée :
 $\Rightarrow B_a = -cste \cdot H_a$. Le point représentatif du fonctionnement se trouve sur une droite passant par l'origine et sur la caractéristique $B_a(H_a)$ du matériau.

Le point de fonctionnement est donc au point d'intersection « A » de la droite et de la courbe

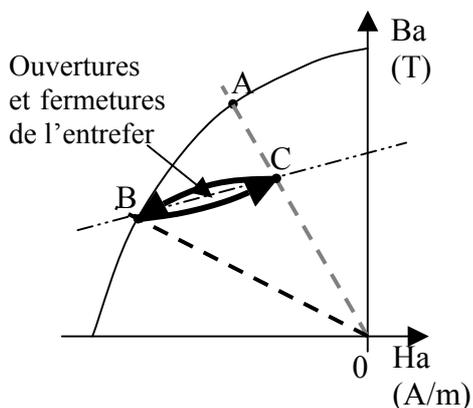




Si on ouvre l'entrefer (ouverture d'une porte fermée par un aimant, démontage d'un moteur à aimant...) l'entrefer: e augmente. Le coefficient directeur de la droite $B_a(H_a)$ devient moins négatif. La droite se rapproche de l'horizontal. Le point représentatif du fonctionnement passe du point « A » au point « B ».



Si on referme l'entrefer jusqu'à sa position initiale, l'aimant travaille sur un nouveau cycle d'hystérésis partant du point « B ». Lorsque l'entrefer a retrouvé sa valeur initiale, le point de fonctionnement est en « C ».



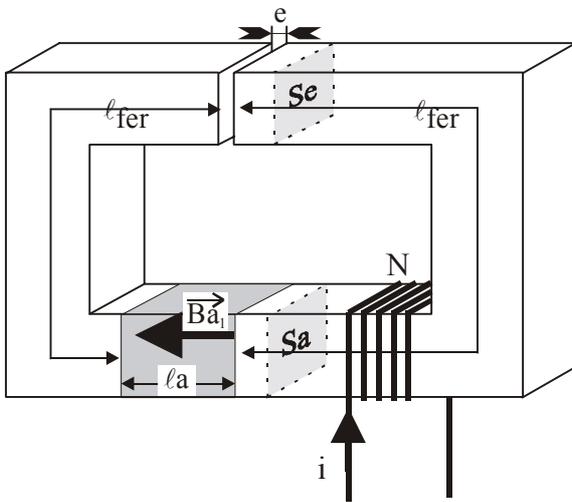
Plusieurs ouvertures et fermetures successives vont conduire le point de fonctionnement à se stabiliser sur un cycle voisin de B C. En général, ce cycle est sensiblement parallèle à la courbe initiale pour $H = 0$. On peut confondre ce cycle avec une droite dite « **droite de recul** ».

On remarque que par rapport à la situation au point A, le circuit magnétique s'est démagnétisé.

C'est en raison de ce phénomène qu'il est vivement déconseillé d'ouvrir certains moteurs à aimants permanents sous peine de devoir les faire remagnétiser par le constructeur.

Si on effectue le même genre de manœuvre avec un aimant dont la caractéristique dans la zone active est une droite, il n'y a pas de démagnétisation.

2.4 Association d'un aimant et d'un bobinage dans un circuit magnétique.



Soit le circuit magnétique ci-contre. Il comporte un aimant (longueur l_a , section S_a , champ d'induction supposé uniforme \vec{B}_a) ainsi qu'un bobinage de N spires parcouru par un courant continu « i ». Il présente un entrefer (longueur « e », section S_e , champ d'induction supposé uniforme \vec{B}_e).

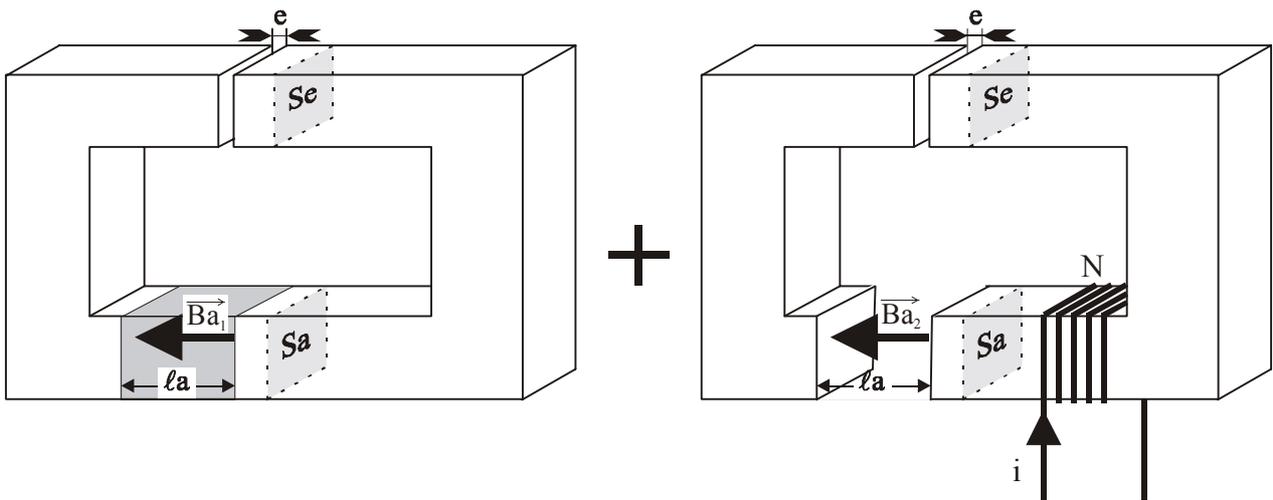
Ecrire le théorème d'Ampère en négligeant la circulation de \vec{H} dans le fer par rapport à sa circulation dans l'entrefer.

Ecrire l'équation de conservation du flux dans le circuit magnétique (supposé sans fuites).

Dans certains aimants modernes, on peut en première approximation considérer que $B_a = B_r + \mu_o \cdot H_a$.

Exprimer H_e dans l'entrefer en fonction de $N \cdot i$, du champ rémanent B_r de l'aimant et des caractéristiques géométriques du circuit magnétique.

Montrer que H_e est la somme des champs obtenus dans les deux circuits suivants:



(Réponse 3:)

Si l_a est grand, $N \cdot i$ influence peu l'état magnétique du circuit.

3. CE QUE J'AI RETENU DE CE CHAPITRE

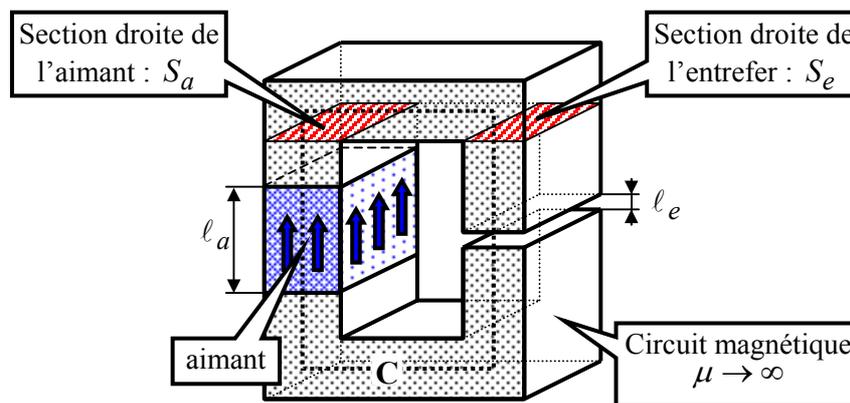
- Qu'est-ce que le critère d'Evershed ? Quel est l'intérêt de répondre à ce critère ?
- Qu'est-ce que la démagnétisation d'un aimant ? Qu'est-ce que la « droite de recul » ?
- Que peut-on dire de l'association d'un aimant et d'un bobinage lorsque la caractéristique de l'aimant est $B_a = B_r + \mu_o \cdot H_a$?

4. EXERCICE

Chap 3. Exercice 1 : Etude d'un dispositif à aimant.

Extrait du sujet d'agrégation génie électrique 1997

Le circuit magnétique de la figure représente, schématiquement, un inducteur de machine. Le champ dans l'entrefer est réalisé à l'aide d'un aimant. Les armatures du circuit magnétique sont supposées infiniment perméables.



Les dimensions S_a , S_e , l_a et l_e représentent respectivement la section droite de l'aimant, la section droite de l'entrefer, la longueur de l'aimant, l'épaisseur de l'entrefer. Le sens de l'aimantation \vec{B}_a dans l'aimant est matérialisé par des flèches.

On adoptera comme sens positif du champ le sens de l'aimantation. Tous les champs magnétiques sont colinéaires au contour C , les grandeurs vectorielles, \vec{V} , sont donc assimilées à leur module, V .

- A l'aide du théorème d'Ampère appliqué au contour C , donnez une expression du champ H_a dans l'aimant en fonction, uniquement, du champ H_e dans l'entrefer et des dimensions du dispositif
- Expliquez, simplement à partir de l'expression précédente, pourquoi le champ H_a est de nature démagnétisante pour l'aimant. Quelle est l'influence de l'entrefer sur la valeur de ce champ?
- A l'aide de la loi de conservation du flux, donnez une expression de l'induction B_a dans l'aimant en fonction du champ H_e dans l'entrefer et des dimensions du dispositif

d) Dédurre des questions précédentes l'expression de l'induction B_a en fonction du champ H_a . Représentez cette caractéristique, lieu des points de fonctionnement de l'aimant, dans un plan $B_a(\mu_o.H_a)$

e) Le matériau utilisé pour l'aimant peut être caractérisé de la façon suivante:

$$B_a = \mu_o.H_a + M(H_a)$$

où M représente l'aimantation (homogène à une induction) du matériau. Pour la plupart des matériaux, cette aimantation est, dans une très large mesure, indépendante du champ H_a . Nous la supposons rigoureusement constante.

Représentez cette caractéristique sur le plan tracé à la question précédente. Matérialisez le point de fonctionnement de l'aimant.

f) Donnez une expression de l'induction, B_e , dans l'entrefer en fonction de M et des dimensions du dispositif.

g) On définit deux grandeurs adimensionnelles, le taux de concentration, τ , et l'entrefer relatif, ε , caractérisant les proportions du circuit magnétique:

$$\tau = \frac{S_a}{S_e}, \quad \varepsilon = \frac{\ell_e}{\ell_a}$$

Exprimez B_e en fonction de M et des deux grandeurs adimensionnelles ε et τ . Pourquoi la grandeur τ est-elle appelée "taux de concentration"? Expliquez quelle est l'influence de l'épaisseur d'entrefer, e , sur le niveau de champ obtenu dans l'entrefer.

h) De même que précédemment, donnez une expression du champ $\mu_o.H_a$ en fonction de M et des dimensions réelles, puis en fonction des paramètres adimensionnels.

i) Que représente la quantité $w_m = \frac{\mu_o.H_e^2}{2}$? A l'aide des résultats obtenus aux questions **a)** et **c)**, exprimez w_m en fonction de B_a et H_a et des volumes V_a de l'aimant et V_e de l'entrefer.

j) Quelle est la condition sur le point de fonctionnement de l'aimant permettant de minimiser le volume d'aimant pour une valeur de w_m donnée? Quel est l'intérêt de ce critère, connu sous le nom de critère d'Evershed?

k) Compte tenu de la caractéristique définie à la question **e)**., que vaut, en fonction de M , l'induction dans un aimant travaillant au critère d'Evershed?

l) Quelles sont les grandes familles de matériaux utilisés pour la réalisation d'aimants permanents? Précisez (succinctement) leurs principales caractéristiques.

5. REPONSES DU CHAPITRE « MISE EN ŒUVRE D'UN AIMANT PERMANENT ».

Réponse 1:

D'après le Théorème d'Ampère appliqué à la fibre moyenne, et en négligeant la circulation de H dans le « fer » par rapport à la circulation dans l'aimant (indice « a ») et dans l'entrefer (indice « e »), on obtient: $H_a \cdot \ell_a + H_e \cdot e = 0$ car la fibre moyenne n'entoure aucun courant.

La loi de conservation du flux permet d'écrire: $B_a \cdot S_a = B_e \cdot S_e$.

$$\text{On en déduit: } \ell_a \cdot S_a = \left(\frac{B_e \cdot S_e}{B_a} \right) \cdot \left(-\frac{H_e \cdot e}{H_a} \right) = -\frac{B_e \cdot H_e \cdot S_e \cdot e}{B_a \cdot H_a} \text{ avec } B_a \cdot H_a < 0.$$

$B_e \cdot H_e$ représente le double de l'énergie magnétique stockée dans l'entrefer.

$S_e \cdot e$ représente le volume de l'entrefer.

$\ell_a \cdot S_a$ représente le volume de l'aimant.

Pour un entrefer donné et un état magnétique dans celui-ci donné, on minimise le volume $\ell_a \cdot S_a$ de l'aimant si on maximise le produit $|B_a \cdot H_a|$. C'est le critère d'Evershed. [Retour](#)

Réponse 2:

Calcul de l'aimant avec de l'alnico 5 au $|B_a \cdot H_a|_{\max} \Rightarrow B_a = 1 \text{ T} ; H_a = -40 \text{ kA/m}$.

$$\left. \begin{aligned} \ell_a &= -\frac{H_e \cdot e}{H_a} = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{\mu_0 \cdot 40 \cdot 10^3} = 19,9 \text{ mm} \\ S_a &= \frac{B_e \cdot S_e}{B_a} = \frac{0,5 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}{1} = 2 \text{ cm}^2 \end{aligned} \right\} \text{volume de l'aimant} = \ell_a \cdot S_a = 3,98 \text{ cm}^3$$

- Calcul de l'aimant avec de l'alnico 5 à $B_a = 1,2 \text{ T}$ et $H_a = -20 \text{ kA/m}$

$$\ell_a = -\frac{H_e \cdot e}{H_a} = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{\mu_0 \cdot 20 \cdot 10^3} = 3,98 \text{ cm} ; S_a = \frac{B_e \cdot S_e}{B_a} = \frac{0,5 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}{1,2} = 1,67 \text{ cm}^2$$

$$\Rightarrow \text{volume de l'aimant} = \ell_a \cdot S_a = 6,63 \text{ cm}^3$$

On remarque que le volume (et donc la masse) a augmenté par rapport au cas précédent. Mais la section est diminuée.

- Calcul de l'aimant avec du cobalt-terre rare (nuance courante) au $|B_a \cdot H_a|_{\max}$

$$B_a = \frac{1}{2}T \ ; \ H_a = -\frac{800}{2} \text{ kA/m} .$$

$$\ell_a = -\frac{H_e \cdot e}{H_a} = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{\mu_0 \cdot 400 \cdot 10^3} = 1,99 \text{ mm} \ ; \ S_a = \frac{B_e \cdot S_e}{B_a} = \frac{0,5 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}{0,5} = 4 \text{ cm}^2$$

$$\Rightarrow \text{volume de l'aimant} = \ell_a \cdot S_a = 0,796 \text{ cm}^3$$

On remarque que le volume (et la masse) est plus réduit qu'avec l'alnico. L'encombrement est très différent et le prix aussi...

[Retour](#)

Réponse 3:

D'après le Théorème d'Ampère appliqué à la fibre moyenne, et en négligeant la circulation de H dans le « fer » par rapport à la circulation dans l'aimant (indice « a ») et dans l'entrefer (indice « e »), on obtient: $H_a \cdot \ell_a + H_e \cdot e = N \cdot i$ car la fibre moyenne entoure N fois le courant « i ».

$$\left. \begin{array}{l} H_a \cdot \ell_a + H_e \cdot e = N \cdot i \\ H_a = \frac{B_a - B_r}{\mu_0} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{B_a - B_r}{\mu_0} \cdot \ell_a + H_e \cdot e = N \cdot i$$

La loi de conservation du flux permet d'écrire: $B_a \cdot S_a = B_e \cdot S_e$.

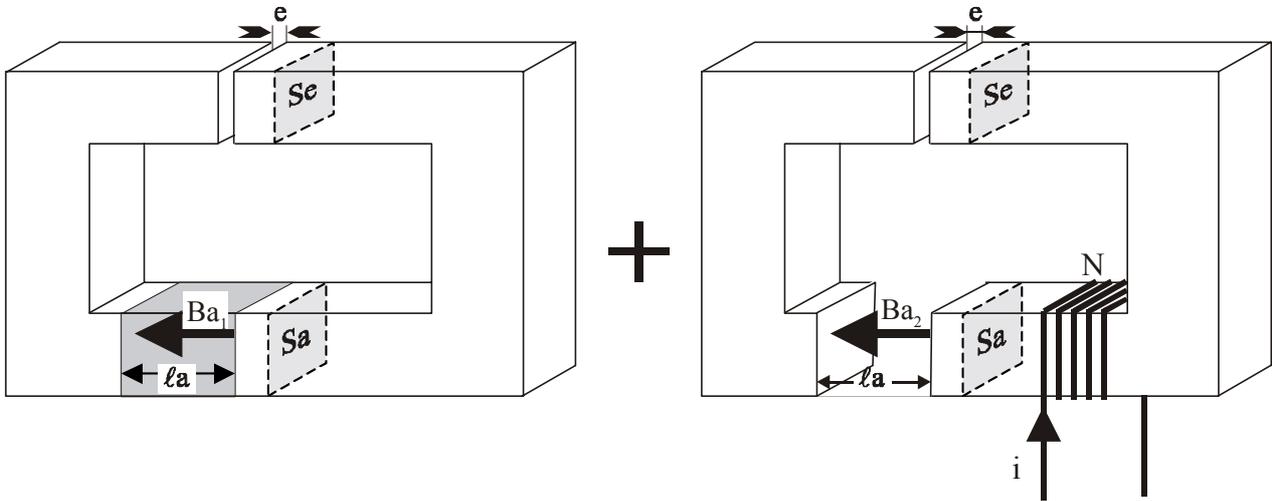
$$\left. \begin{array}{l} \frac{B_a - B_r}{\mu_0} \cdot \ell_a + H_e \cdot e = N \cdot i \\ B_a = \frac{B_e \cdot S_e}{S_a} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\left(\frac{B_e \cdot S_e}{S_a} \right) - B_r}{\mu_0} \cdot \ell_a + H_e \cdot e = N \cdot i = \left(\frac{H_e \cdot S_e}{S_a} - \frac{B_r}{\mu_0} \right) \cdot \ell_a + H_e \cdot e$$

$$\Rightarrow H_e = \frac{N \cdot i + \frac{B_r \cdot \ell_a}{\mu_0}}{\frac{S_e \cdot \ell_a}{S_a} + e} = \frac{N \cdot i}{\underbrace{\frac{S_e \cdot \ell_a}{S_a}}_{H_{e2}} + e} + \frac{B_r \cdot \ell_a}{\underbrace{\mu_0 \cdot \left(\frac{S_e \cdot \ell_a}{S_a} + e \right)}_{H_{e1}}}$$

- $H_{e1} = \frac{B_r \cdot \ell_a}{\mu_0 \cdot \left(\frac{S_e \cdot \ell_a}{S_a} + e \right)}$ est le champ d'excitation magnétique obtenu dans l'entrefer lorsque $i = 0$.

- $H_{e2} = \frac{N \cdot i}{\frac{S_e \cdot l_a}{S_a} + e}$ est le champ d'excitation magnétique obtenu dans l'entrefer lorsque l'aimant est remplacé par un entrefer.

D'où le résultat:



[Retour](#)