جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Machines électriques

CHAPITRE 1:
circuit magnétique

1. Production d'un champ magnétique

Si on considère un conducteur cylindrique droit dans lequel circule un courant I (figure 2.1). Ce courant crée un champ magnétique. L'intensité de ce champ est donnée par la loi D'Ampère :

$$\int H dl = I$$

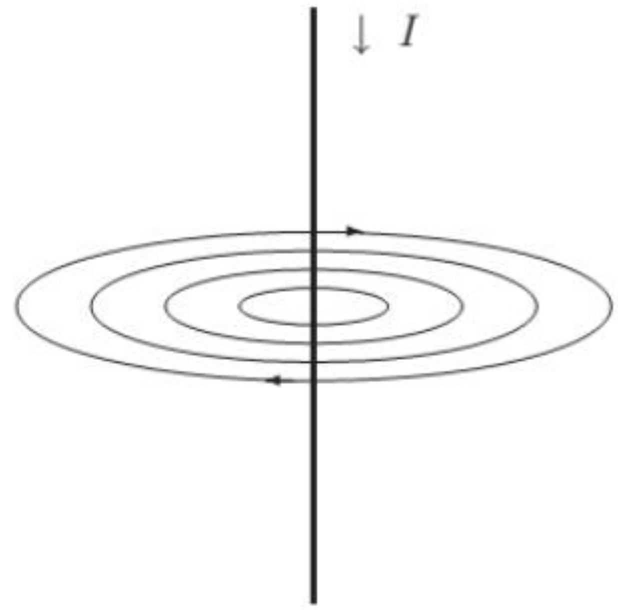


Fig. 2.1 Champ magnétique crée par un courant circulant dans un fil

2. Flux magnétique

On prend l'exemple d'une bobine dans laquelle circule un courant I. Le champ magnétique crée se répand dans l'espace libre autour de la bobine, ou de façon analogue aux courants électriques, que le champ "coule" dans le milieu qui entoure la bobine. La bobine crée alors une force magnétomotrice qui fait circuler un flux magnétique dans le milieu.

C'est semblable au même phénomène que les circuits électriques : une force électromotrice déplace des électrons qui circulent dans le milieu.

La force produite est reliée au courant qui circule et au nombre de tours dans la bobine :

$$F = NI$$

Où F est la force, N est le nombre de tours, et I le courant. L'unité de cette force est A.t (Ampère-tour).

La densité de flux magnétique B dans un milieu donnée est :

$$B = \mu H$$

Où B est la densité de flux (en Wb/m² ou Tesla), H est l'intensité du champ magnétique (en A/m) et υ est la perméabilité magnétique du milieu (en Wb/m ou H/m).

La perméabilité du vide est $\upsilon o = 4\pi \,.\, 10^{-7}$ H/m. La perméabilité de l'air est presque la même que celle du vide.

Le flux magnétique circulant dans une surface S est défini comme :

$$\phi \int_{S} B.ds$$

3. Induction magnétique B

Considérons un volume élémentaire dV de matière aimantée par un champ excitateur B_{ext}
On peut définir dV par le produit dx.dS où dx est la longueur du cylindre et dS la surface de sa section droite de telle sorte que dx >> dS. Il peut être considéré comme un solénoïde de longueur dx ayant dN spires parcourues par le courant I.

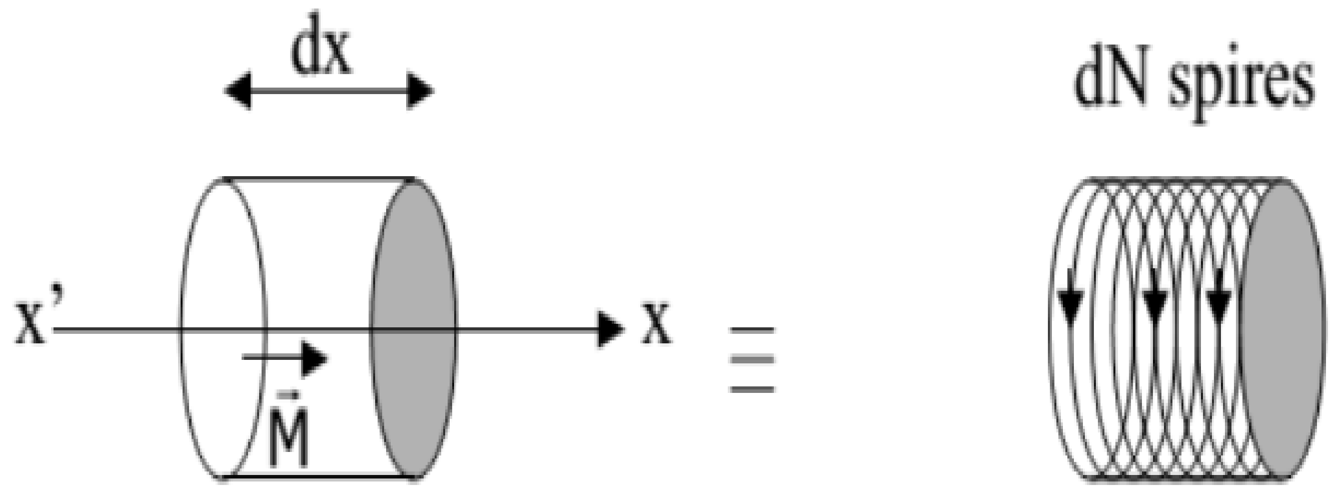


Fig 2.3 Cylindre uniformément aimanté le long de son axe   Solénoïde parcouru par un courant I

4. Champ magnétique H

Contrairement à l'induction, le champ magnétique continue à vérifier dans la matière le théorème d'Ampère au sens des courants libres, c'est-à-dire qu'il ignore les courants d'aimantation ;

$$\vec{H} = \frac{\overrightarrow{B_{ext}}}{\mu_0}$$

L'induction magnétique totale s'écrit donc : $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \bar{M})$

6.1 Caractéristique B(H) d'un matériau magnétique

On a vu que la relation entre la densité de flux et le champ magnétique est $\mathrm{B} = \mu \mathrm{H}.$. Dans le vide (ou l'air), cette caractéristique prend la forme d'une relation linéaire. Le vide est un milieu linéaire,

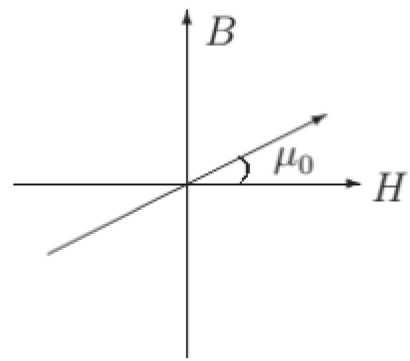


Fig. 2.6 Relation B(H) du vide.

Pour un matériau magnétique, la relation B(H) est :

Où υ_r est la perméabilité relative du matériau. Pour la plupart des matériaux, la perméabilité n'est pas constante, et la relation B(H) est non-linéaire.

On peut classifier les matériaux magnétiques en deux groupes importants :

- matériaux non-magnétiques : μ_r est environ 1. Exemple : air, verre, cuivre, aluminium.
- matériaux ferromagnétiques : μ_r est très élevé (100 à 100000). Exemple : fer, acier, cobalt, alliages, etc...

La caractéristique de magnétisation AC d'un matériau magnétique donne une courbe du type hystérésis.

- $B_{sat} = 1.5T$ (fer)
- $B_{sat} = 0.3T$ (ferrite)

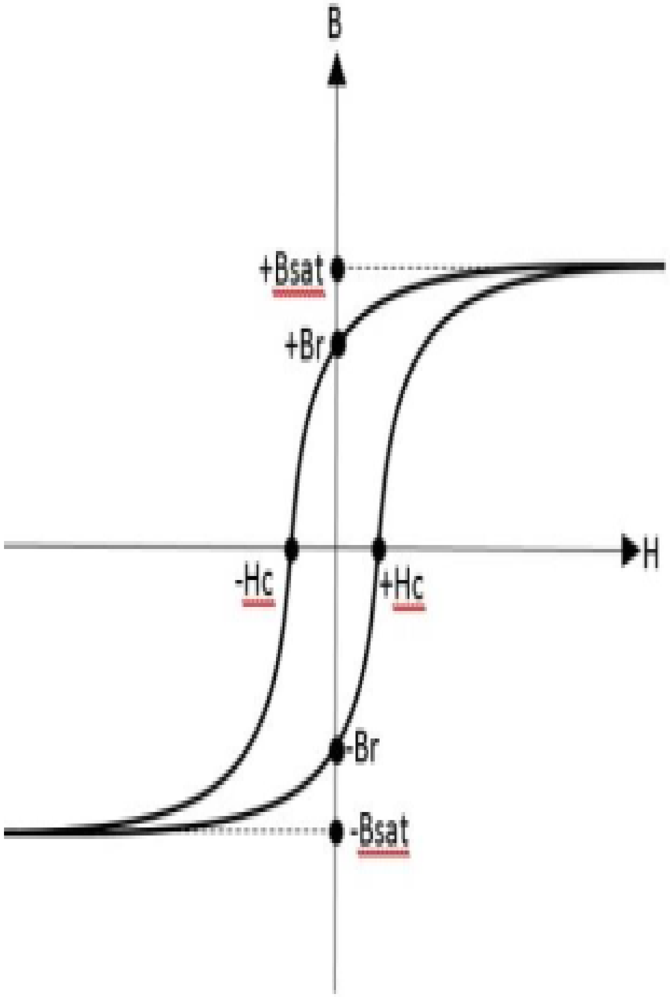


Fig. 2.7 Courbe hystérésis typique

Tension induite dans un circuit, induction électromagnétique

Chaque fois qu'il existe un mouvement relatif entre un champ magnétique et un conducteur, une tension est induite entre les extrémités u conducteur. La grandeur de cette f.em est proportionnelle à la vitesse de variation de couplage inductif

Couplage inductif : association d'un champ magnétique et un conducteur

Loi de Faraday de l'induction et de Lenz :

$$\mathrm{e} = \frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{dt}} \ ; \ \lambda : \text{couplage inductif}$$

Dans les circuits bobinés : $\lambda = \mathrm{N}\Phi$

$$e = \frac{d(N\Phi)}{dt} = N\frac{d\Phi}{dt}$$

Si : $\Phi = \ Cte \ \ \Rightarrow e = 0$

En réalité : $e = -N\frac{d\Phi}{dt}$ $(Loi\ de\ Lenz)$

Loi de Lenz : Le sens de la f.e.m induite est tel qu'elle tend à s'opposer à la cause qui la produite.

F.e.m d'auto-induction

$$e = N\frac{d\Phi}{dt}$$

$$Ni = Hl \Rightarrow H = \frac{Ni}{l}$$

$$B = \mu H, \Phi = BS$$

$$e = \frac{N^2\mu S}{l}\frac{di}{dt} = \frac{N^2}{l/_{\mu S}}\frac{di}{dt} = \frac{N^2}{\Re}\frac{di}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt}$$

$e = L \cdot \frac{di}{dt}$: F.e.m d'auto-induction.

Avec :L : Coefficient d'auto-induction ou inductance et $\Re = \frac{l}{\mu S}$: la réluctance magnétique.

6.2 Pertes magnétiques

Il y a deux grandes sources de pertes dans les matériaux magnétiques :

- Pertes par hystérésis
- Pertes par courants de Foucault

6.3 Pertes par hystérésis

Sous excitation cyclique (sinusoÄ³dale, par exemple), le matériau magnétique fait un cycle d'hystérésis et crée ainsi des pertes d'énergie dans le noyau sous forme de chaleur. Les pertes par hystérésis sont directement proportionnelles à la surface du cycle d'hystérésis et à la fréquence d'opération. Une formule empirique permet de calculer les pertes (par m^3) :

$$P_{hys} = K\,B^2_{sat}\,f$$

Où K est une constante qui dépend du matériau, B_{sat} est la valeur maximale de la densité de flux, et f est la fréquence de fonctionnement.

Pertes par courants de Foucault

Le champ magnétique alternatif induit dans le noyau par des forces électromagnétiques crée un courant induit dans le matériau. Ces courants induits créent des pertes RI^2 (puisque les matériaux magnétiques ont une résistivité non-nulle). Ces pertes sont dissipées sous forme de chaleur.

7. Circuits magnétiques

Un circuit magnétique est semblable à un circuit électrique. C'est un parcours fermé qui est réalisé avec un matériau magnétique de haute perméabilité. Cependant, on va faire quelques hypothèses pour l'analyse de ces circuits :

- On suppose que B(H) est linéaire.
- Pas de saturation.
- Pas de hystérésis.

Donc, comme équivalence aux circuits électriques :

Circuit électrique	Circuit magnétique
Tension V	Force magnétique $\mathcal{F}=NI$
Résistance R	Réluctance $\mathcal{R}$
Courant I	Flux φ

7.1 Réluctance en série

La réluctance en série se comporte de la mème façon que des résistances en série. C'est-à-dire

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \ldots$$

7.3 Réluctance en parallèle

La réluctance en parallèle se comporte de la même façon que des résistances en parallèle. C'est-à-dire :

$$\mathcal{R}_{eq} = \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}\right)^{-1}$$

La réluctance du circuit est :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A}$$

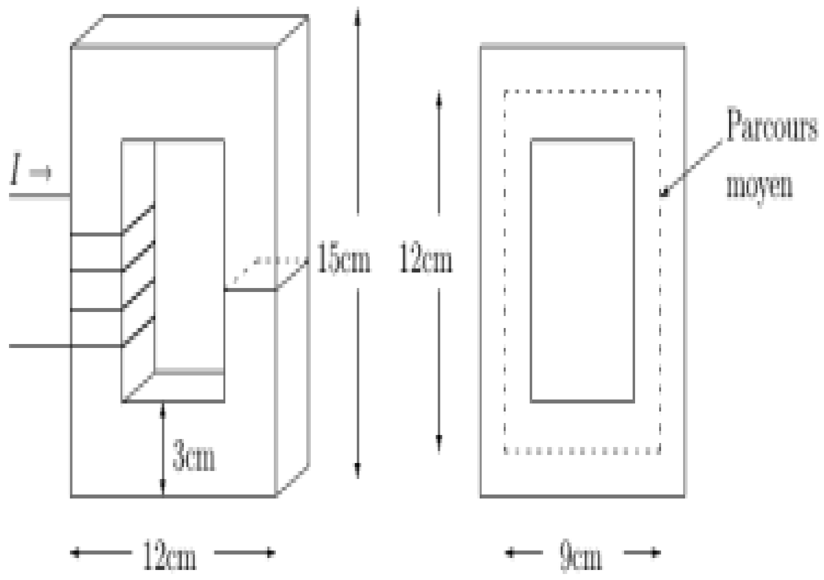
8. Inductance d'une bobine

On considère une bobine de N tours dans laquelle circule un courant I. La bobine se trouve dans un milieu magnétiquement linéaire (comme l'air). Le flux magnétique produit par la bobine est ϕ. Le flux produit par la bobine traverse la bobine. Le flux magnétique total couplé à la bobine est $\Lambda = N\varphi$. L'inductance de la bobine est définie par :

$$L = \frac{N\varphi}{I} = \frac{N^2}{R}$$

Exemple 1

Soit le circuit magnétique suivant. Le courant I est 1.2A, la perméabilité relative du matériau est $\mu_r = 3000$, le nombre de tours N est 100 et une profondeur de 4cm.



La longueur moyenne du circuit est :

$$l = 2 \cdot (12 + 9) = 0.42\text{m}$$

La section du circuit est :

$$A = (3 \cdot 4)\text{cm}^2 = 0:0012\text{m}^2$$

La réluctance du circuit est :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.42}{3000(4\pi \times 10^{-7})0.0012} = 92840\ At/Wb$$

Le flux magnétique est :

$$\varphi = \frac{NI}{\mathrm{R}} = \frac{120}{92840} = 1.29 \times 10^{-3} Wb$$

La densité de flux est :

$$B = \frac{\varphi}{A} = \frac{1.29 \times 10^{-3}}{0.0012} 1.0875\ \text{T}$$