Chapitre 2 : Les Circuits Magnétiques

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 : $\int Hdl = I$

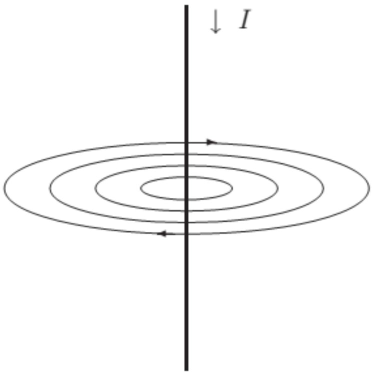


Fig. 2.1 Champ magnétique crée par un courant circulant dans un fil

Dans le cas d'un conducteur droit, l'intensité du champ magnétique est :

$$H(r) = \frac{I}{2r\Pi}(\frac{A}{m})$$

La nature du champ magnétique dépend de la nature du courant I. Si le courant I est un courant alternatif sinusoïdal, le champ magnétique sera sinusoïdal aussi. Si le courant est continu, le champ magnétique le sera aussi.

Le champ magnétique crée par un fil long et droit n'est pas uniforme et son intensité varie selon $1=r^2$. Afin de créer un champ uniforme, on utilise une bobine pour concentrer les lignes de champs en un même endroit.

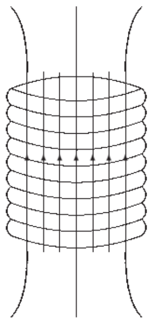


Fig. 2.2 Le champ magnétique dans une bobine

A l'intérieur de la bobine, les champs magnétiques s'additionnent pour créer un champ plus intense et plus uniforme.

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 υo = 4π . 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.

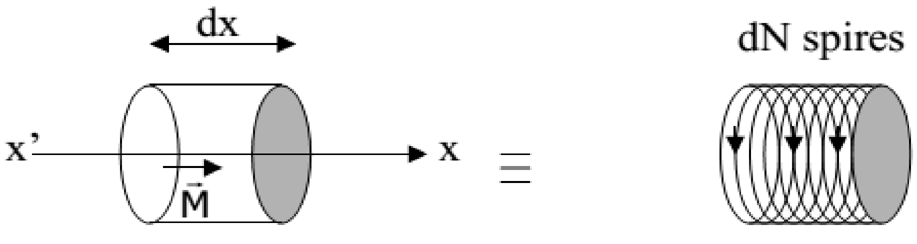


Fig 2.3 Cylindre uniformément aimanté le long de son axe — Solénoïde parcouru par un courant I

L'induction magnétique créée par le solénoïde d'ampériens locaux s'écrit à l'intérieur de son volume:

$$\overrightarrow{B_l} = \mu_0 \frac{dN}{dx} I\overline{u_x}$$

$$d\overline{m} = dN.I.dS\overline{u_x}$$

Par ailleur le moment magnétique de ce solénoïde élémentaire s'écrit ;

Le milieu présente donc une aimantation : $\overline{M} = \frac{d\overline{m}}{dV} = \frac{dN.I.dS\overline{u_x}}{dS.dx} = \frac{dN}{dx} I\overline{u_x}$

On obtient donc : $\overrightarrow{B_l} = \mu_0 \overline{M}$

Cette induction est la réponse du milieu à l'excitation et est colinéaire et proportionnelle à l'aimantation qu'a induit B_{ext}

L'induction magnétique totale est la superposition des deux inductions : $\vec{B} = \overrightarrow{B_{ext}} + \overrightarrow{B_l}$

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 : $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \overline{M})$

5. Courants d'aimantation

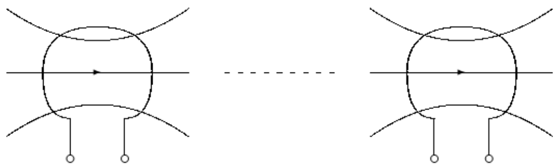
Ces courants microscopiques induits par le champ excitateur sont « fictifs » dans la mesure où ils ne sont pas observables puisqu'internes aux atomes et aux molécules.

Ils sont réels dans la mesure où ils créent l'induction magnétique B_l.

6. Matériaux magnétiques

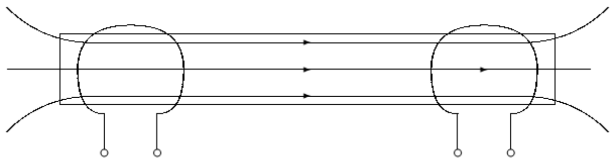
Un matériau magnétique est un matériau de haute perméabilité magnétique (μ_r >>). Le rôle est de canaliser efficacement les lignes de champ magnétique. Ceci permet de réduire les fuites.

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



Emission Réception

Fig.2.4 Sans matériau magnétique



Emission Réception

Fig .2.5 Avec un matériau magnétique

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 $B = \mu H$. Dans le vide (ou l'air), cette caractéristique prend la forme d'une relation linéaire. Le vide est un milieu linéaire, homogène (la qualité est uniforme) et isotropique (les propriétés sont les mêmes dans toutes les directions). La relation B(H) du vide est donnée dans la figure suivante.

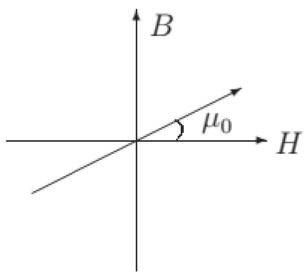


Fig. 2.6 Relation B(H) du vide.

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

$$B = \mu r \mu_0 H$$

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)

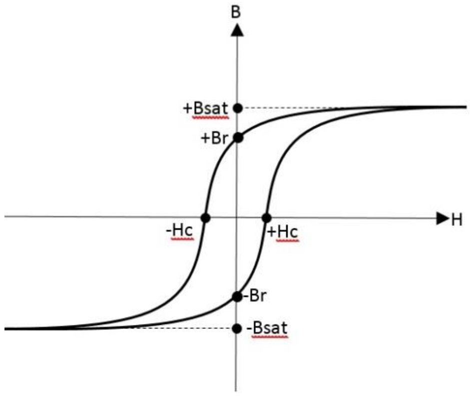


Fig. 2.7 Courbe hystérésis typique

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 (sinusoÃ³dale, 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 $\mathbb{F}$=NI
Résistance R	Réluctance $\mathbb{R}$
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

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

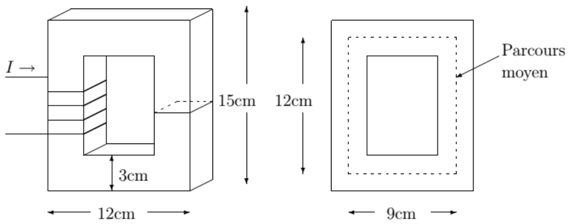
7.3 Réluctance en parallèle

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

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

Exemple 1

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



La longueur moyenne du circuit est :

$$l = 2 . (12 + 9) = 0.42m$$

La section du circuit est :

$$A = (3 . 4)cm^2 = 0:0012m^2$$

La réluctance du circuit est :

$$\mathbb{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.42}{3000(4\pi\times10^{-7})0.0012} = 92840\ At/Wb$$

Le flux magnétique est :

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

La densité de flux est :

$$B = \frac{\varphi}{A} = \frac{1.29\times10^{-3}}{0.0012} 1.0875\ \mathrm{T}$$

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 Λ = Nφ. L'inductance de la bobine est définie par :

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

Dans le cas d'une inductance µa air (où le milieu magnétique est de l'air), la valeur de l'inductance est fonction du nombre de tours et de la perméabilité du milieu. Elle est aussi indépendante de la fréquence et du courant. Par contre, la réluctance est difficile à calculer parce que le flux suit un parcours pas bien définit.

Dans le cas d'une bobine sur un matériau magnétique, le flux est très concentré dans le matériau magnétique. Le flux crée par la bobine circule donc en totalité dans le noyau. Le flux total couplé µa la bobine est égal à :

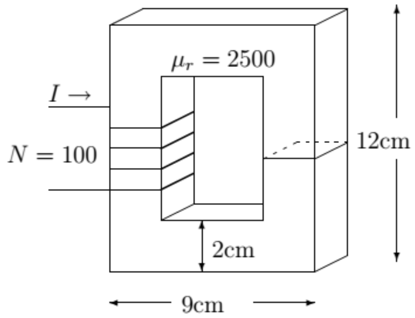
$$L = \frac{\Lambda}{I} = \frac{N\varphi}{I} = \frac{N^2}{R}$$

comme dans le cas d'une bobine à air. Par contre, la réluctance n'est pas constante ; elle dépend du courant I parce que la perméabilité du matériau n'est pas linéaire.

Par contre, on peut approximer la valeur de l'inductance en supposant que la relation B(H) est linéaire.

Exemple 2

Le circuit a une profondeur de 2cm. On suppose que le matériau magnétique est linéaire.



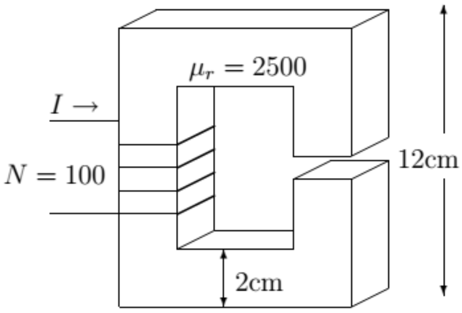
La réluctance du circuit est :

$$R = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.34}{(2500)(4\pi \times 10^{-7})(0.0004)} = 270563\ At/Wb$$

L'inductance est :

$$L = \frac{N^2}{R} = \frac{100^2}{270563} = 37mH$$

On ajoute un entrefer de 1 mm.



La réluctance du noyau est la somme des réluctances (celle du noyau de fer et celle de l'entrefer).

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_{Fe} + \mathcal{R}_e$$

O a :

$$\mathcal{R}_e = \frac{l_e}{\mu 0 \mathrm{A}} = \frac{0.001}{(4\pi \times 10^{-7})(0.0004)} = 1.989 \times 10^6 At/Wb$$

L'inductance est :

$$L = \frac{N^2}{R_{Fe} + R_e} = \frac{100^2}{270563 + 1.989 \times 10^6} = 4.42\ mH$$