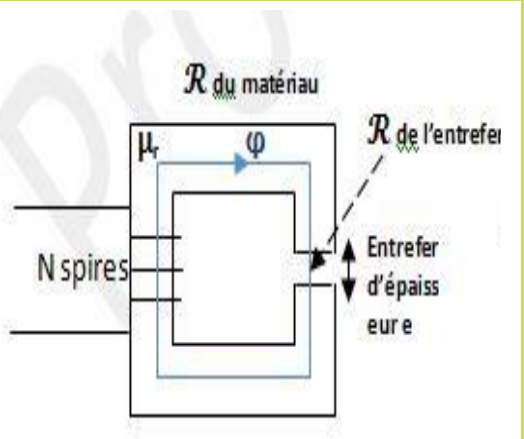
CHAPITRE 1



Année universitaire 2024/2025

Les Circuits Magnétiques

(Résumé du cours)

Electrotechnique Fondamentale 2

2eme année License tronc commun ST

Filière Electrotechnique

Prof. Megherbi Ahmed chaouki

Chargé de Cours

Département de Génie électrique

Université Mohammed Khider Biskra

Contenu du chapitre 1

Ce chapitre couvre les points suivants :

- **Définitions des flux magnétique, champs magnétique, induction magnétique, La force magnétomotrice**
- **Théorème d'Ampère**
- **Réluctance d'une portion de circuit magnétique**
- **Analogie entre circuits électriques et circuits magnétiques**
- **Cycle d'hystérésis**
- **Pertes dans un circuit magnétique**

Chapitre IV Les Circuits Magnétiques

IV.1. Généralités

IV.1.1. Définition

Les machines et les transformateurs électriques sont construit à la base de circuit magnétique qui est constitués de matériaux ferromagnétiques tels que le fer : ainsi, un circuit magnétique est un volume où se referment les lignes de force d'un champ magnétique, comme le montre la figure 4.1; en d'autres termes, les lignes de force magnétique sont canalisées à travers un circuit magnétique.

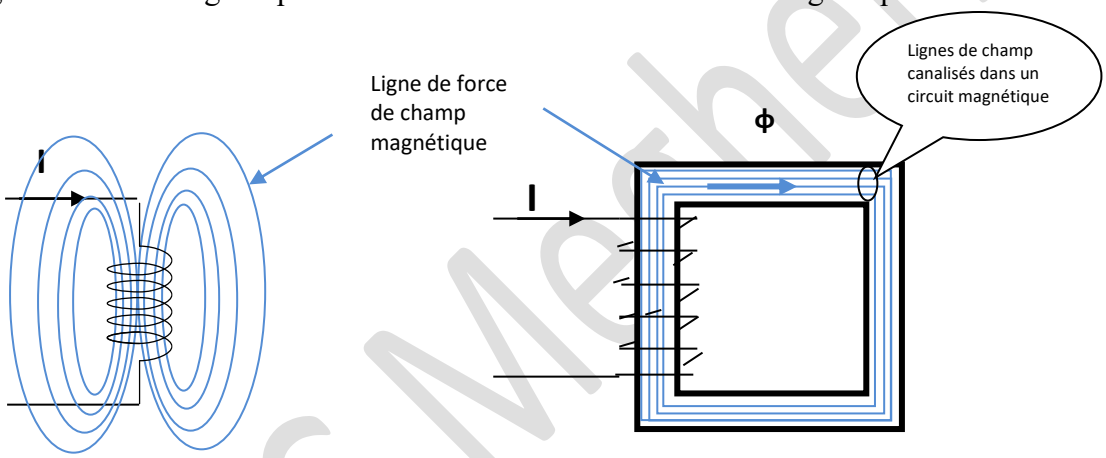
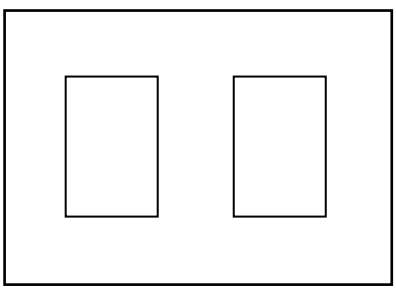


Fig. 4.1 Canalisation des lignes de force de champs magnétiques dans un circuit magnétique

Exemple

Un circuit magnétique d'un transformateur

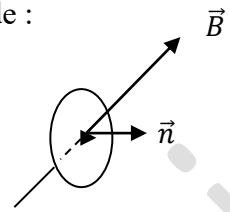


Il est important de d'indiquer que le champ magnétique peut être créé à l'aide d'aimants permanents ou d'une bobine parcourue par un courant électrique.

Prof AC.Megherbi

IV.1.2. Flux magnétique φ

Le flux magnétique traversant une surface S est déterminé par le calcul de :



$$\varphi = \iint \vec{B}.\overrightarrow{dS}$$

Où $\vec{B}.\overrightarrow{dS}$ est un produit scalaire, $\overrightarrow{dS} = dS\,\vec{n}$
($\vec{n}$ vecteur normal à la surface S)

Le produit scalaire des vecteurs B et S est égal au flux magnétique φ à travers une spire orientée de surface S.

$$\varphi = \|\vec{B}\|\,\|\vec{S}\|\,\cos(\overrightarrow{B},\vec{S}\,)$$

Dans le cas où le champ est uniforme sur la section S :

$$\boldsymbol{\varphi = B\,.\,S}$$

Le flux s'exprime en weber Wb

IV.1.2.1. Conservation de flux magnétique

Un tube de champ est constitué des lignes d'induction traversant deux contours fermés (C_1) et (C_2) respectivement de surface S_1 et S_2 comme illustré dans la figure 4.2.

Le flux magnétique a la propriété de se conserver. Il est le même sur chacune des sections d'un tube de champ.

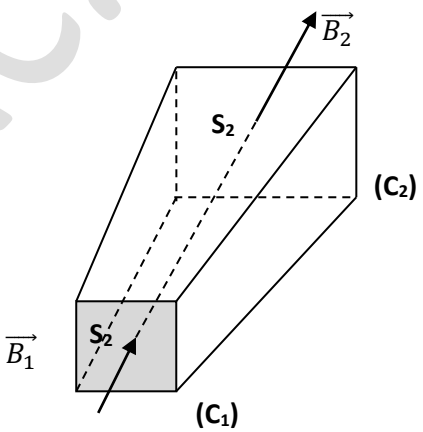


Fig.4.2 Conservation de flux dans un tube de champ

Deux sections S_1 et S_2 délimitées par les contours C_1 , C_2 donc selon le principe de la conservation de flux on : $\varphi_1 = \varphi_2$

$$\boldsymbol{B_1S_1 = B_2S_2.}$$

Prof AC.Megherbi

IV.1.3. Champ magnétique (ou excitation magnétique) et induction magnétique

Quand un champ magnétique traverse une surface S d'un matériau ferromagnétique caractérisé par une perméabilité magnétiques relative notée μr , une induction magnétique B se forme, dont la valeur est :

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H$$

B est une densité de flux magnétique (ou induction) en tesla T.

μ : La perméabilité magnétique du matériau

μ_r : dépend du matériau du circuit magnétiques : c'est la perméabilité relative magnétique du matériau

μ_0 : c'est une constante qui vaut : $\mu_0 = 4\ \pi\ 10^{-7}$

Remarque : l'air, le vide, le cuivre l'aluminium et d'autres matériaux ont une perméabilité relative égale à l'unité : $\mu_{r\ air} = 1$, c'est à dire que ces matériaux ne canalisent pas les lignes de champs magnétique

Exemple : μ_r = 1000 pour du fer

IV.2. La force magnétomotrice

La force magnétomotrice notée *F,* ne dépend que du nombre de spires et du courant I, elle s'exprime en ampère tours est la cause de la circulation du flux magnétique

$$\boldsymbol{F = NI}$$

IV.3. Théorème d'Ampère généralisé

L'excitation magnétique H à travers un contour fermé (C) est la somme algébrique des intensités des courants qui l'entourent.

$$\oint_C \vec{H}\,\overrightarrow{dl} = \sum N\,I$$

Cette somme algébrique des courants est la force magnétomotrice

$$\boldsymbol{F = NI = H\,l}$$

IV.4. Réluctance d'une portion de circuit magnétique

Considérant une partie de circuit magnétique de longueur l et de section droite S, comme il est illustré dans la figure suivante :

Prof AC.Megherbi

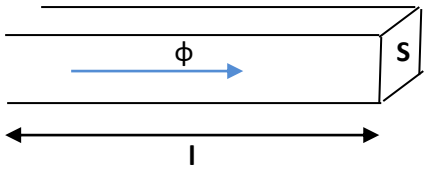


Fig.4.3. Portion d'un circuit magnétique

D'après le théorème d'ampère on peut écrire :

$$F = Hl$$

Or :

$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r}$ Le circuit magnétique est considéré non saturé et $B = \frac{\varphi}{S}$

On obtient donc : $F = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} \varphi = \mathcal{R} \varphi$

La relation $F = \mathcal{R} \varphi$, constitue la loi de Hopkinson.

Donc la reluctance d'une partie de circuit magnétique de longueur l, est donnée par la relation :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S}$$

On constate que :

- la réluctance dépend des dimensions géométriques de la portion du circuit magnétique de longueur l et de section S et de la caractéristique magnétique du matériau $\mu = \mu_0 \mu_r$

-plus la perméabilité μ_r est grande, la reluctance est de faible valeur ainsi le circuit magnétique canalisera tout le flux magnétique.

IV.5. Analogie entre circuits électriques et magnétiques

D'après la formule d'Hopkinson, **une analogie** peut être faite avec un circuit électrique linéaire : À tout circuit magnétique, on peut l'étudier avec une représentation (circuit équivalent) électrique qui permettant ainsi d'analyser le circuit magnétique en utilisant des relations électriques.

On se retrouve donc généralement comme le montre la figure 4.4 dans un cas semblable (par analogie) à celui d'un générateur de tension qui fournit de l'énergie à une résistance, en faisant circulant un courant électrique I.

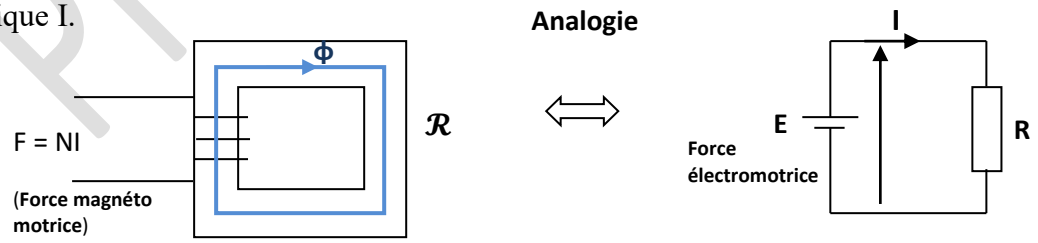


Fig.4.4 Analogie Circuit magnétique et circuit électrique

Prof AC.Megherbi

Le tableau ci-dessous montre l'analogie entre les grandeurs d'un circuit électrique et d'un circuit magnétique :

Grandeurs magnétiques	Grandeurs électriques
Le flux magnétique φ en [Wb]	Le courant électrique I en [A]
La réluctance $\mathcal{R}$	La résistance R
La force magnétomotrice F	La force électromotrice E
(loi d'Hopkinson) La ddp magnétique F = $\mathcal{R}\,\varphi$	(Loi d'Ohm) La ddp électrique E = R I
Les mailles magnétiques $\sum F.m.m$	Les Mailles électriques $\sum U_i$
Nœud magnétique $\sum \varphi$	Nœud électrique $\sum I$

Remarques

Il fallait bien noter qu'il s'agit d'une analogie des équations, avec des différences physiques fondamentales :

- Il existe un isolant électrique mais ne l'ai pas dans le cas magnétique (inexistence d'un isolant magnétique).
- La conductivité est généralement constante alors qu'elle n'est pas le cas pour la perméabilité magnétique μ_r.

IV.6. L'analogie des circuits magnétique par schéma électrique équivalent

En se basant sur le tableau d'analogie des grandeurs électriques et magnétiques

IV.6.1. Circuit à une maille : (association deux réluctances en série)

Considérant le circuit magnétique suivant : c'est un circuit à une maille en présence d'entrefer.

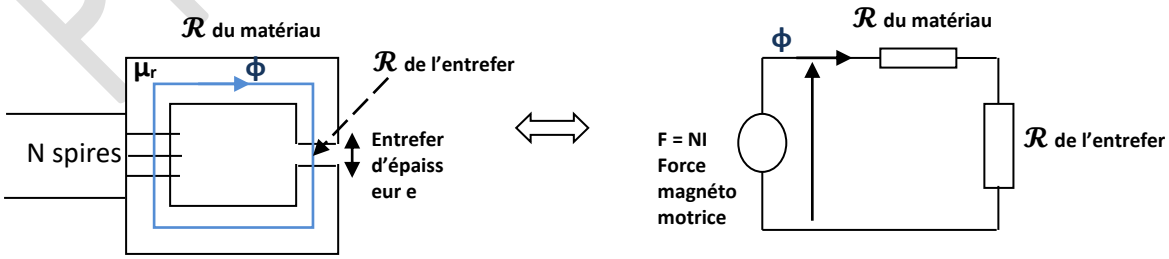


Fig.4.5. Circuit magnétique à une maille (présence

Les reluctances sont parcourues par le même flux φ.
La reluctance totale du circuit magnétique est donc : $\mathcal{R} = \mathcal{R}_{entrefer} + \mathcal{R}_{materiau}$

IV.6.2. Circuit à deux mailles : (association parallèle des réluctances)

Si on considère le circuit magnétique de la figure 4.6:

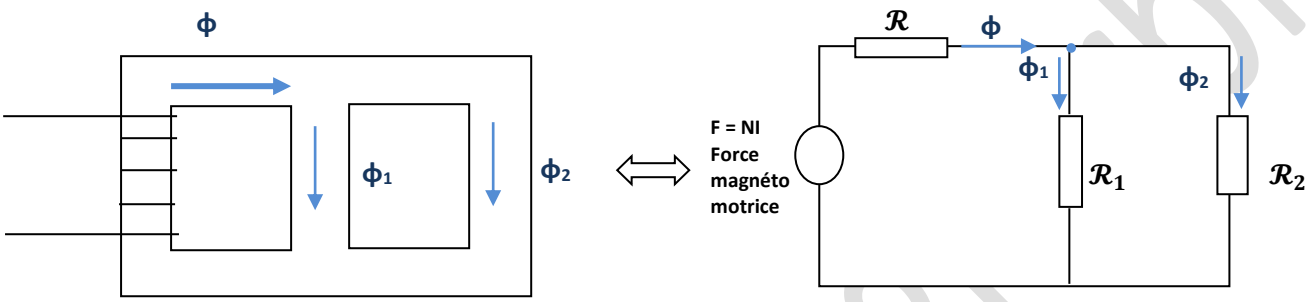


Fig.4.6. Circuit magnétique à deux mailles (nœud)

Les réluctances $\mathcal{R}_1$ et $\mathcal{R}_2$ sont montées en parallèles la reluctance équivalente de l'association $\mathcal{R}_1$ et $\mathcal{R}_2$ se calcule de la même manière que la résistance électrique.

IV.7. Courbe de la 1ere aimantation

Dans les matériaux ferromagnétiques, l'induction magnétique B dépend de l'intensité de l'excitation magnétique H et du passé magnétique du matériau.

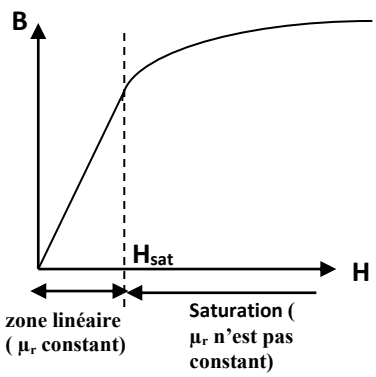


Fig.4.7. Courbe de la 1ere aimantation

Dès que l'intensité H de l'excitation magnétique dépasse Hsat (intensité de saturation), l'induction magnétique B ne varie pas avec la variation de l'excitation H : on dit que le matériau est saturé.

Prof AC.Megherbi

IV.8. Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique

Lorsqu'un matériau magnétique a été soumis plusieurs fois à un champ magnétique sinusoïdale, sa courbe d'aimantation se stabilise en un cycle d'hystérésis comme il est illustré dans la figure 4.
Quand un matériau magnétique est plongé dans un champ magnétique sinusoïdal, sa courbe d'aimantation se stabilise en un cycle d'hystérésis, comme montré dans la figure 4.

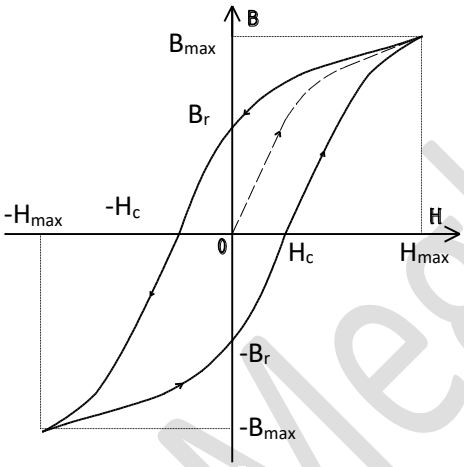


Fig .4.8. Cycle d'hystérésis

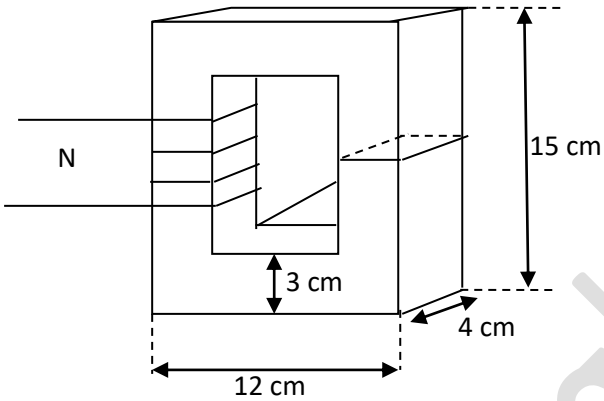
Cette courbe B =f(H) est appelée le cycle d'hystérésis, Le phénomène d'hystérésis cause le chauffage des tôles des circuits magnétiques exposées à des champs variables. Ainsi le champ magnétique dans un matériau ferromagnétique évolue selon une excitation magnétique alternative oscillant entre –Hmax et Hmax.

Br : Induction rémanente, c'est-à-dire le champ magnétique qui reste dans le matériau lorsqu'on élimine son excitation : H = 0 A/m.
Hc : est l'excitation coercitive, c'est-à-dire l'excitation nécessaire pour supprimer le champ magnétique rémanent dans le matériau ferromagnétique.

Prof AC.Megherbi

IV.9. Exercice d'application

On considère le circuit magnétique de la figure 4 Le courant I = 1.2 A, la perméabilité relative du matériau est de μ_r = 3000, le nombre de spire de la bobine est *N = 100,* la profondeur du circuit magnétique est de 4 cm



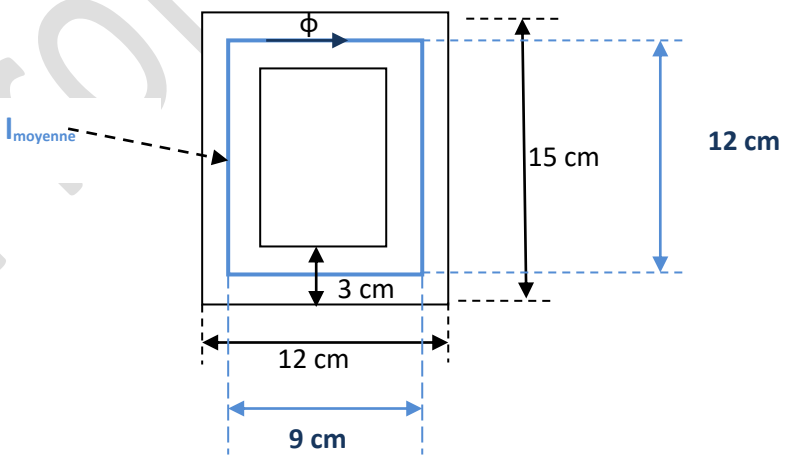
Calculer :

1- la longueur moyenne du circuit magnétique ?
2- La section du circuit magnétique ?
3- La reluctance du circuit magnétique ?
4- Le flux magnétique ?
5- La densité de flux magnétique (l'induction magnétique) ?

Solution :

1- La longueur moyenne du circuit magnétique

Il faut bien préciser que la longueur moyenne l est la longueur au milieu du circuit magnétique que parcouru par flux magnétique comme il est illustré dans la figure ci-dessous :



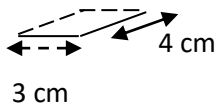
Prof AC.Megherbi

La longueur moyenne n'est autre qu'un périmètre d'un rectangle de longueur de 12 cm et de largeur de 9 cm d'où on a :

$l_{moyenne} = (12 + 9) * 2 = 42\ cm = \mathbf{0.42\ m}$

2- La section S du circuit magnétique :

La profondeur étant de 4 cm



$S = (4 \times 3) = \mathbf{12\ cm^2 = 0.0012\ m^2}$

3- La reluctance du circuit magnétique :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu_0\ \mu_r S} = \frac{0.42}{(4\ \pi\ 10^{-7})\ \times 3000 \times 0.0012} = 92840\ H^{-1}$$

4- Le flux magnétique :

$$\varphi = \frac{F}{\mathcal{R}} = \frac{NI}{\mathcal{R}} = \frac{100 \times 1.2}{92840} = 1.29\ 10^{-3}\ Wb$$

5- La densité de flux magnétique (l'induction magnétique)

$$B = \frac{\varphi}{S} = \frac{1.29\ 10^{-3}}{0.0012} = 1.075\ T$$

IV.10. Pertes dans un circuit magnétique

Ils sont appelés pertes fer à savoir :

1- Les Pertes par hystérésis

Ce genre de pertes est associé au cycle d'hystérésis du matériau. Le trajet du cycle B(H) révèle une perte d'énergie en dissipant de la chaleur qui entraîne un réchauffement de la matière. Les pertes par hystérésis dependent de la fréquence et de la composition du matériau.

Prof AC.Megherbi

2- Les Pertes par courants de Foucault

En raison de variation du champ magnétique dans la matière engendrant par induction des courants induits circulant dans le noyau, ils sont également connus sous le nom de courants de Foucault. Cette circulation de ces courants conduit donc à un réchauffement par effet Joule. Ces pertes engendrées sont proportionnelles au carré de la fréquence.

Pour limiter ces pertes, on est amené à réduire le parcours des courants induits, c'est pourquoi on emploie des circuits magnétiques à tôles feuilletés séparées par un isolant.

Prof AC.Megherbi