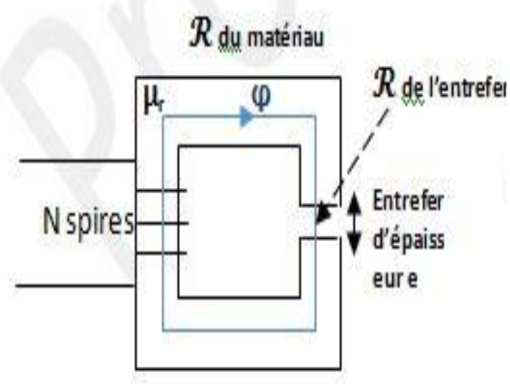
CHAPITRE 1



Année universitaire 2023/2024

Les Circuits Magnétiques

(Résumé du cours)

Electrotechnique Fondamentale 2

2ème 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 I Circuits Magnétiques

I.1. Généralités

I.1.1.Définition

Les systèmes électrotechniques (machines et transformateurs…etc) sont à la base des circuits magnétiques qui sont considéré comme étant un volume de matériau dit ferromagnétique et en particulier par du fer qui canalise les lignes du champ magnétique comme il est illustrer dans la figure 1.1,

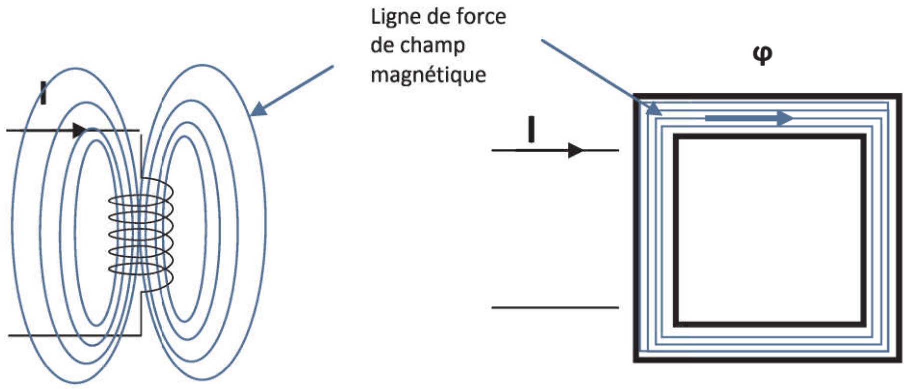
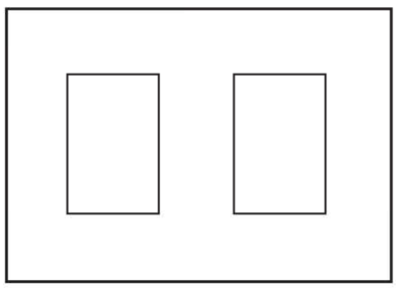


Fig 1.1 canalisation des lignes de force de champs magnétiques dans un circuit magnétique

Exemple

Un circuit magnétique d'un transformateur

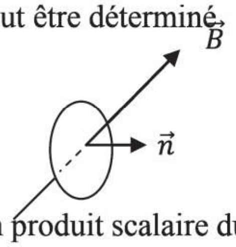


Il est bien à noter qu'on peut obtenir un champ magnétique en utilisant des aimants permanents ou à l'aide d'une bobine parcouru par un courant électrique.

I.1.2. Le flux magnétique φ

L'expression de flux magnétique traversant une surface quelconque S peut être déterminé par :

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



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

Le flux magnétique φ traversant une surface orientée d'une spire est un produit scalaire du vecteurs B et du vecteur n normal) la surface Sv ainsi :

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

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

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

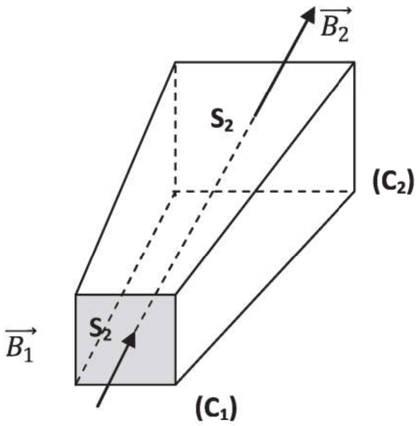
Le flux s'exprime en weber Wb

I.1.2.1. Conservation de flux magnétique

l'ensemble des lignes de champ magnétique caractérisé par l'induction B qui s'appuit sur deux contours fermés (C_1) et (C_2) comme il est montré dans la figure 1.2 est appelé tube de champ ou d'induction

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

Fig.1.2 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 : $\varphi_1 = \varphi_2$

$$B_1S_1 = B_2S_2.$$

I.1.3. Relation entre champ magnétique (ou excitation magnétique) et induction magnétique

L'ensemble des lignes de force de champ magnétique dans un volume de matériau ferromagnétique non saturé caractérisé par une perméabilité magnétique relative μ_r et une induction magnétique B dont sa valeur peut est déterminée par l'expression suivante:

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

H ; étant l'excitation magnétique en At/m.
B : induction magnétique ou densité de flux magnétique en tesla T.
μ : est dite perméabilité magnétique absolue du matériau $\mu = \mu_0 \mu_r$
μ_r : la perméabilité relative magnétique du matériau
μ_0 : La perméabilité du vide $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$

Remarque : $\mu_{r\,\mathrm{air}} = 1$

Exemple : $\mu_r = 1000$ pour du fer

I.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

$$\boldsymbol{F = NI}$$

I.3. Théorème d'Ampère généralisé

La circulation du vecteur H (excitation magnétique) le long d'un contour fermé et orienté (C)est appelé contour d'ampère est égale à la somme algébrique des courants traversant la surface délimité par le contour C :

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

Cette somme algébrique des courants est la force magnétomotrice

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

I.4. Réluctance d'un circuit magnétique

Si on considère une partie de circuit magnétique de section droite S et de longueur l, (figure 1.3) :

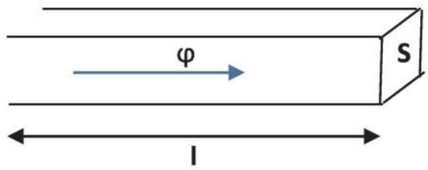


Fig.1.3. Portion d'un circuit magnétique

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

$$F = Hl$$

Or :

$H = \frac{B}{\mu_0 \, \mu_r}$ Le cas ou le circuit magnétique est non saturé et $B = \frac{\varphi}{S}$

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

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

Donc la reluctance d'une portion de circuit magnétique est définie par la relation :

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

-Ceci montre que la réluctance a un dépendance des caractéristiques relative au matériau magnétique et des dimensions géométriques de la portion du circuit magnétique.

- La réluctance du circuit magnétique est de valeur petite (équivaut à une perméabilité relative du matériau importante (μ_r grand) : ainsi le circuit magnétique est à grande perméabilité et canalisera le flux magnétique.

I.5. Analogie entre circuits magnétiques et circuits électriques

Selon la relation d'Hopkinson on peut établir une analogie avec les circuits électriques:
Ainsi on peut établir des relations analogues rencontrées dans un circuit électrique pour un circuit magnétique tel que la loi d'ohm.
On peut considérer par analogie un circuit électrique de base contenant une résistance alimentée par une source de tension E générant un courant électrique I dans ce circuit (fig 1.4).

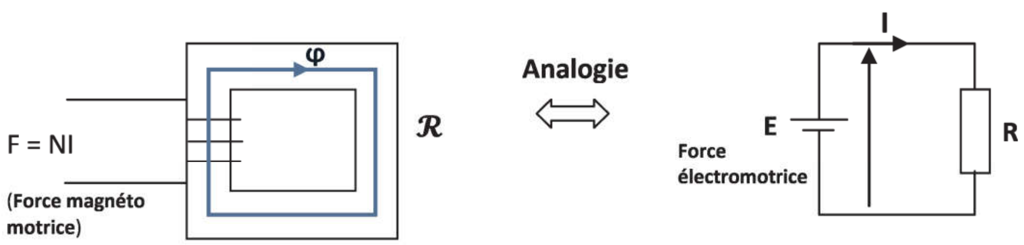


Fig.1.4 Analogie Circuit magnétique et circuit électrique

Le tableau ci-dessous montre l'analogie entre les grandeurs des circuits magnétiques et électriques:

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 = $\mathcal{R}\,\varphi$	(Loi d'Ohm) La ddp électrique = **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 dune 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.

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

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

I.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.

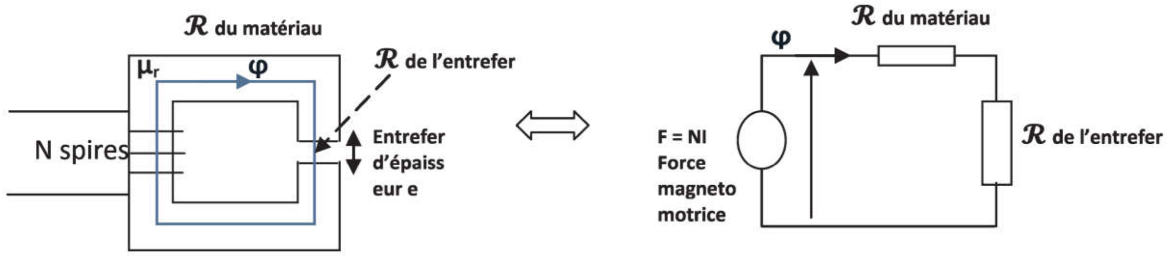


Fig.1.5. Circuit magnétique à une maille (présence d'entrefer)

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 parallèles des réluctances)

Considérant le circuit magnétique avec son circuit électrique analogue dans la figure (1.6) :

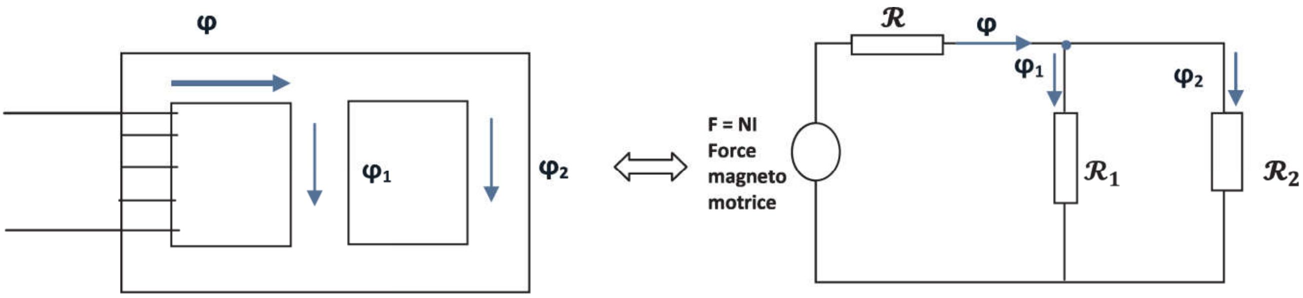


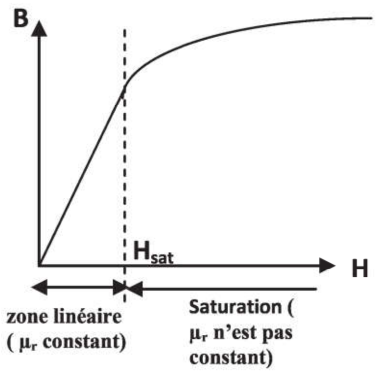
Fig.1.6. Circuit magnétique à deux mailles (nœud

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.

I.7. Courbe de la 1^{ere} 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.1.7. Courbe de la 1^{ere} aimantation



C'est à partir d'une valeur de l'excitation magnétique Hsat (intensité de saturation),que l'induction magnétique B ne croît plus on dit que le matériau est saturé.

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

La soumission d'un matériau ferromagnétique à un champ magnétique sinusoïdale conduit à une courbe B-H stabilisant en un cycle dite **cycle d'hystérésis** comme il est illustré dans la figure 4.8.

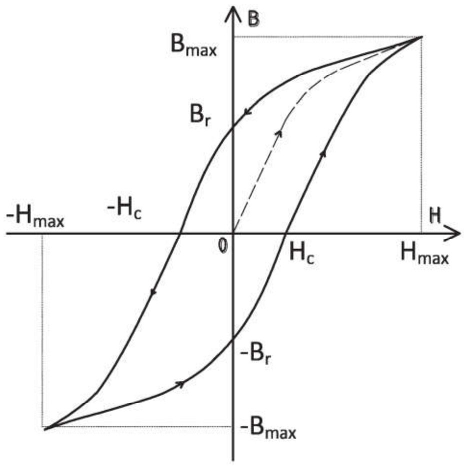


Fig .4.8. Cycle d'hystérésis

Cette courbe représente le cycle d'hystérésis. On constate bien que la courbe b=f(H) pour H croissante ne se superpose pas avec celle pour H décroissante.

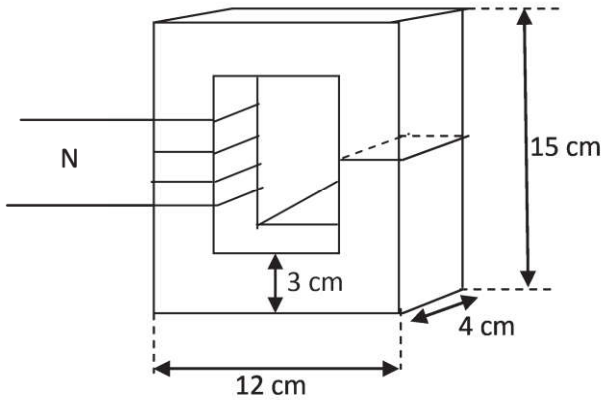
Le phénomène d'hystérésis conduit à un échauffement des tôles des circuits magnétiques: se sont les pertes d'hystérésis.

Pour une excitation magnétique alternative variant entre $-H_{max}$ et H_{max}, On peut tracer l'évolution du l'induction B dans un matériau ferromagnétique. Sur cette courbe on peut distinguer :

- B_r : appelé induction rémanente, c'est à dire le flux magnétique qui persiste dans le matériau lorsque l'excitation magnétique H est nulle (H=0 At/m).
- H_c : appelé excitation magnétique coercitive c'est l'excitation nécessaires pour annuler l'induction rémanente dans le matériau ferromagnétique.

I.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 $\mu_r = 3000$, le nombre de spire de la bobine est $N = 100$, la profondeur du circuit magnétique est de 4 cm



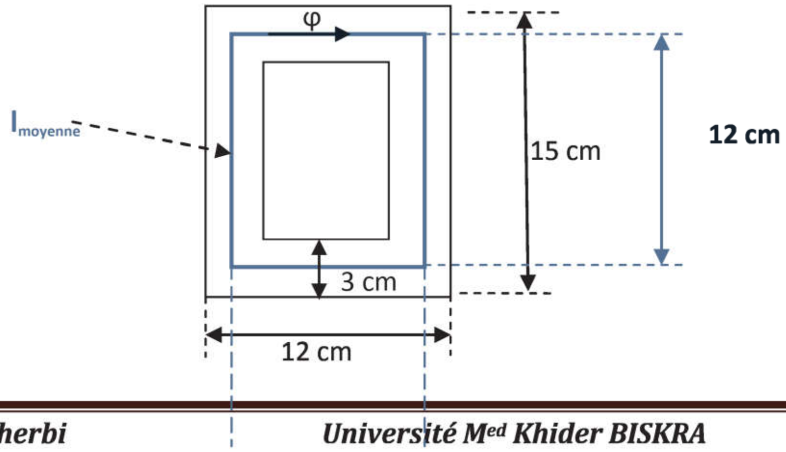
Calculer :

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 :

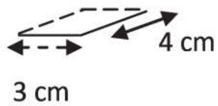


La longueur moyenne n'est autre qu'un périmètre d'un rectangle de longueur de 12 cm et de largeur de 9 cm d'où on a :

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

2- La section S du circuit magnétique :

La profondeur étant de 4 cm



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

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)

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

I.10. Pertes dans un circuit magnétique

Ils sont appelés pertes fer à savoir :

1- Les Pertes par hystérésis

Le parcours du cycle B(H) engendre une perte d'énergie qui ce traduit par un échauffement du matériau. Les pertes par hystérésis dépendent de la fréquence et sont liées à la nature du matériau.

2- Les Pertes par courants de Foucault

Une variation d'un champ magnétique dans la masse d'un matériau ferromagnétique génère par induction des courants appelés courants de Foucault qui se rebouclent sur eux-mêmes. Ce phénomène se traduit par un échauffement par effet joule dans ce matériau. Ces pertes sont proportionnelles au carré de la fréquence et de au carré l'induction et aussi de l'épaisseur de la tôle d'un circuit magnétique.

Pour limiter Les pertes relatives au courant de Foucault, on doit réduire le parcours des courants induits, c'est pour cette raison que l'on utilise des circuits magnétiques feuilletés isolés (tôles).