

Milieux ferro ou ferrimagnétiques

Ce chapitre permet de comprendre un aspect du fonctionnement des machines tournantes et des transformateurs.

1 Définitions

Corps ferromagnétiques : corps cristallins pouvant être aimantés (Fe, Gd, Fe₃C). L'aimantation peut être grande et reste permanente en l'absence de champ extérieur.

Corps ferrimagnétiques : cristaux (les ferrites) dont les propriétés magnétiques se situent entre celles des antiferromagnétiques (qui ne peuvent être aimantés) et les ferromagnétiques.

Excitation ou champ magnétique \vec{H} (A.m⁻¹): le champ magnétique \vec{H} est créé dans le vide par toute charge électrique en mouvement ou par un aimant permanent. *Le champ magnétique \vec{H} ne dépend que de la source.*

Induction magnétique \vec{B} (en Tesla, T): en présence de matière, le champ \vec{H} induit dans cette matière une **polarisation magnétique** \vec{J} (une orientation et une agitation des molécules ou des atomes de la matière) dont les effets s'ajoutent à ceux de \vec{H} et on est conduit à définir un nouveau vecteur, l'**induction magnétique** $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{J} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$.

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$$

L'induction magnétique \vec{B} dépend de la source et du point de mesure.

Perméabilité du vide : $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H.m⁻¹.

Perméabilité relative (par rapport au vide) : μ_r (sans dimension - μ_r peut varier en fonction de paramètre telle que la température.).

Perméabilité : $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ (H.m⁻¹).

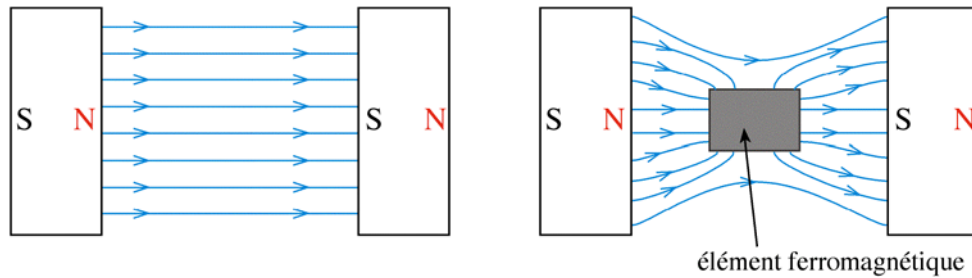
Bien que les vrais termes sont ceux utilisés ci-dessus, on rencontre souvent les appellations suivantes:

- \vec{B} , champ magnétique, champ d'induction magnétique, densité de flux magnétique, intensité de l'induction magnétique.
- $|\vec{B}| = B$, intensité de l'induction magnétique.
- $|\vec{H}| = H$, intensité du champ magnétique.

2 Expérimentations

2.1 Lignes de champs

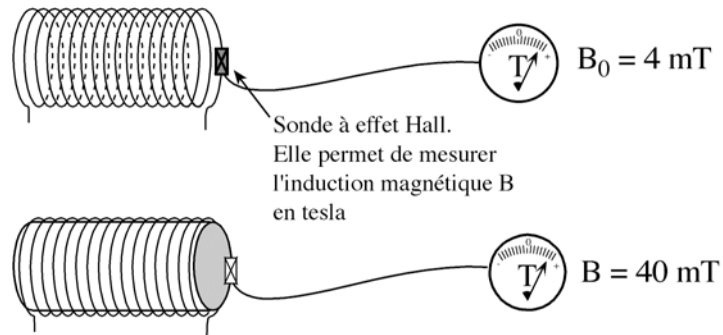
Un champ magnétique uniforme est créé à l'aide de deux aimants. En présence d'un élément ferromagnétique les lignes de champ se concentrent pour passer à travers le milieu ferromagnétique.



Explication : sous l'effet de B , le corps ferromagnétique subit une aimantation et crée un champ magnétique qui s'ajoute au premier. Le champ total est donc plus intense autour du corps ferromagnétique.

2.2 Mesure de l'induction magnétique

Une bobine est parcourue par un courant de 1 A.
 Sans noyau ferromagnétique, l'intensité de l'induction magnétique est de 4 mT, avec le noyau ferromagnétique elle est de 40 mT.



Pour le mêmes raisons qu'au §2.1, B est 10x plus intense avec le noyau.

Remarque : H est le même pour les deux mesures.

On peut déterminer une valeur approchée de la perméabilité relative du noyau ferromagnétique.

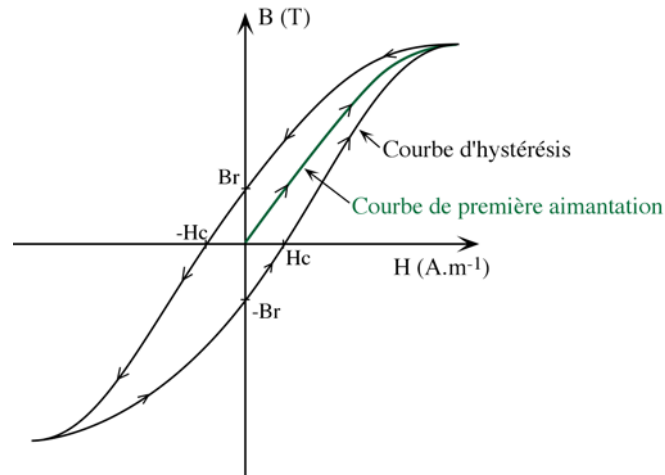
$$H = \frac{B_0}{\mu_0} \text{ et } B = \mu_0 \mu_r H = \mu_r B_0 \Rightarrow \mu_r = \frac{B}{B_0} = \frac{40}{4} = 10$$

3 Courbe de première aimantation, cycle d'hystérésis

Ces courbes montrent comment un corps ferromagnétique réagit à l'excitation magnétique H .

Courbe de première aimantation : courbe $B = f(H)$ lorsque le corps ferromagnétique ne possède aucune aimantation.

Cycle d'hystérésis : courbe $B = f(H)$ lorsque le corps ferromagnétique possède une déjà une aimantation.



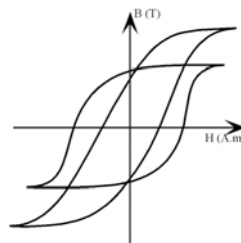
- **Zone linéaire** : dans cette zone, $B = \mu \cdot H$ avec μ constante. C'est cette zone qui est généralement exploitée pour les transformateurs et les machines tournantes.
- **Saturation du milieu ferromagnétique** : lorsque H devient trop grand, B ne varie presque plus. Le matériau magnétique est dit saturé. On a toujours $B = \mu \cdot H$, mais μ n'est plus constant.
- **Champ rémanent Br** : champ qui subsiste lorsque $H = 0$ ($i_1 = 0$).
- **Excitation coercitive Hc** : excitation H nécessaire pour annuler le champ rémanent Br .
- **Hystérésis** : c'est le dédoublement de la caractéristique $B(H)$ du matériau magnétique. *Donc B dépend non seulement de H , mais aussi de l'aimantation antérieure.* Les substances ferromagnétiques sont douées de mémoire.

Remarque : hystérésis = retard en grec - retard à la désaimantation.

• Matériaux durs :

matériaux (ex. : acier) qui présentent une forte aimantation rémanente et difficile à annuler (Hc est grand). Ils sont utilisés pour faire des aimants permanents.

Le cycle est large.



Exemple d'alliages utilisés pour les aimants.

Ferrite (oxyde de fer)

Saturation à $\approx 0,6$ T

$Br \approx 0,4$ T

$Hc \approx 200$ kA/m

Samarium-Cobalt (Sm-Co)

saturation à ≈ 1 T

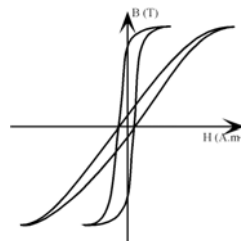
$Br = 0,8$ T

$Hc = 500$ kA/m

• Matériaux doux :

matériaux (ex. : fer) qui possèdent une aimantation rémanente facile à annuler (Hc est petit). Ils sont utilisés pour les moteurs et les tôles des circuits magnétiques des transformateurs.

le cycle est étroit.



Exemple d'alliages utilisés pour les tôles des transformateurs

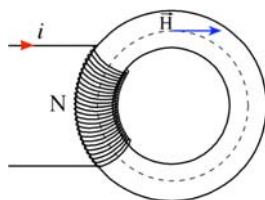
FeSi 3,5% de Si	FeSi à grains orientés
Saturation à 2 T	saturation à 3 T
Br ≈ 0	Br = 1,4 T
Hc ≈ 0	Hc = 8 A/m
μr = 7000 à 50 Hz	μr > 40 000 à 50 Hz

4 Circuit magnétique avec et sans entrefer

Un circuit magnétique est la partie ferromagnétique guidant le flux magnétique d'un système électrique (exemples : le noyau d'un transformateur ou le corps d'un moteur).

De nombreux circuits magnétiques, entrant dans la constitution des machines électriques, comportent obligatoirement un entrefer. Exemple des moteurs dont le circuit magnétique est composé du stator (partie fixe) et du rotor (partie mobile). L'entrefer est indispensable pour permettre la rotation du rotor.

4.1 Tore sans entrefer

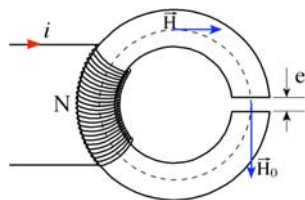


D'après le théorème d'Ampère

$$H.L = N.I$$

- L : longueur moyenne des lignes de champ (m)
- N : nombre de spires de la bobine
- I : courant dans la bobine (A)
- H : excitation magnétique (A/m)

4.2 Tore avec un entrefer



D'après le théorème d'Ampère pour N et I constants ;

dans la matière : $H.(L - e) = N.I$

dans l'entrefer : $H_0.e = N.I$

- L : longueur moyenne des lignes de champ (m)
- e : longueur de l'entrefer (m)
- N : nombre de spires de la bobine
- I : courant dans la bobine (A)
- H : excitation magnétique dans la matière (A/m)
- H₀ : excitation magnétique dans l'entrefer (A/m)

Si $e \ll L$, les lignes de champs traversent l'entrefer sans trop de perte.

$$\Rightarrow B_{mat} = B_{air} \Rightarrow \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu_0 \cdot H_0 \Rightarrow \mu_r \cdot H = H_0$$

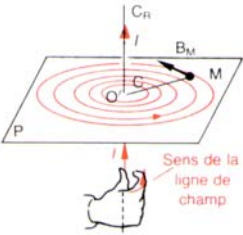
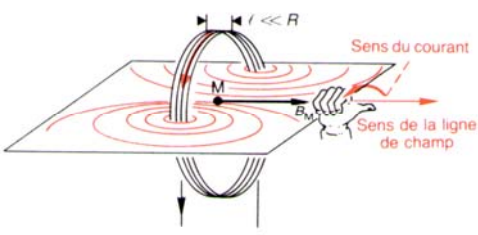
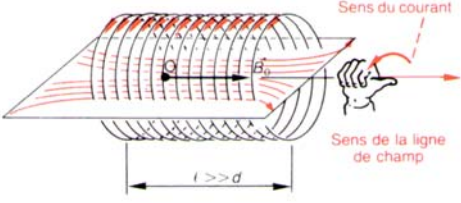
$\mu_r \approx 1000$ pour du fer. H_0 est 1000 fois plus important que H.

Donc si l'on a besoin d'une excitation donnée dans l'entrefer, on peut calculer le courant qui sera nécessaire. Celui-ci sera d'autant plus faible que μ_r sera grand.

$$\frac{H_0 \cdot (L - e)}{\mu_r} + H_0 \cdot e = N.I$$

5 Quelques rappels d'électromagnétisme

Tableau 1 Dans ce tableau, I est une grandeur positive (le courant circule dans le sens choisi pour orienter le conducteur).

	<p>Source de champ magnétique Spectre magnétique</p>	<p>Champ magnétique</p> <p>Unités $\left\{ \begin{array}{l} I : \text{ampères} \\ \text{longueurs} : \text{mètres} \\ B : \text{teslas} \end{array} \right.$</p>
<p>Conducteur rectiligne</p>		<p>Lignes de champ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ce sont des cercles de centre O. • Orientation : elle est donnée par la <i>règle de la main droite</i> suivante : si le pouce est placé suivant le conducteur, dans le sens de circulation du courant I, les autres doigts indiquent le sens des lignes de champ. <p>Champ magnétique en un point M tel que $OM = r$</p> $B_M = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{2 \cdot 10^{-7} I}{r}$
<p>Bobine plate ou conducteur circulaire</p>	 <p>Bobine plate $\left\{ \begin{array}{l} \text{Rayon } R, \\ N \text{ spires,} \\ \text{Longueur } l \ll R. \end{array} \right.$</p>	<p>Lignes de champ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vers le centré de la bobine, ce sont sensiblement des droites. • Dans le voisinage des conducteurs, ce sont des cercles centrés sur le conducteur. • Ce sont des lignes de plus en plus incurvées en allant du centre de la bobine vers les conducteurs. • Orientation : elle est donnée par la <i>règle de la main droite</i> suivante : le pouce donne le sens des lignes de champ quand les autres doigts sont placés dans le sens de circulation du courant I. <p>Champ magnétique au centre O de la bobine plate</p> <ul style="list-style-type: none"> • pour une spire : $B_O = \frac{\mu_0 I}{2R} = \frac{2\pi \cdot 10^{-7} I}{R}$, • pour N spires : $B'_O = NB_O$.
<p>Bobine longue ou solénoïde</p>	 <p>Diamètre : d Longueur : $l \gg d$ N spires $n = \frac{N}{l}$ = nombre de spires par mètre.</p>	<p>Lignes de champ</p> <ul style="list-style-type: none"> • A l'intérieur de la bobine, ce sont des <i>droites parallèles</i> à l'axe de la bobine (<i>champ uniforme</i>). • A l'extérieur ce sont des courbes qui relient les deux faces de la bobine. Le spectre obtenu est analogue à celui d'un barreau aimanté droit. • Orientation. Leur sens est obtenu en appliquant la <i>règle de la main droite</i> donnée pour une bobine plate. <p>Champ magnétique au centre O de la bobine longue</p> $B_O = \mu_0 \frac{NI}{l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{NI}{l}$ $B_O = 4 \pi \cdot 10^{-7} nI.$

Extrait de *Physique appliquée Ires STI – R. Mérat, R. Moreau - éd. Nathan 1993*