

# 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, Fe<sub>3</sub>C). 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<sup>-1</sup>): 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<sup>-1</sup>.

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

**Perméabilité** :  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$  (H.m<sup>-1</sup>).

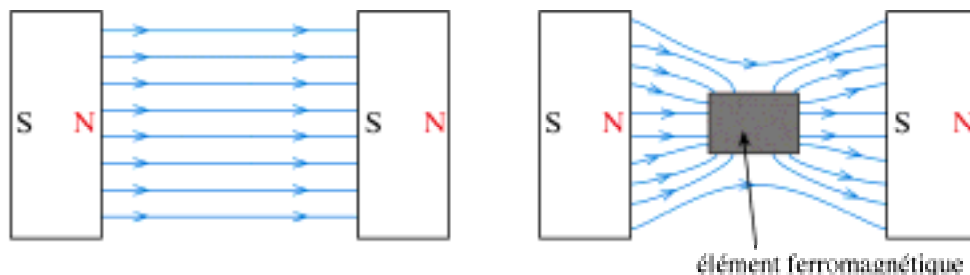
Bien que les vrais termes sont ceux utilisés ci-dessus, on rencontre souvent les appellations suivantes:

- $\vec{B}$ , 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.



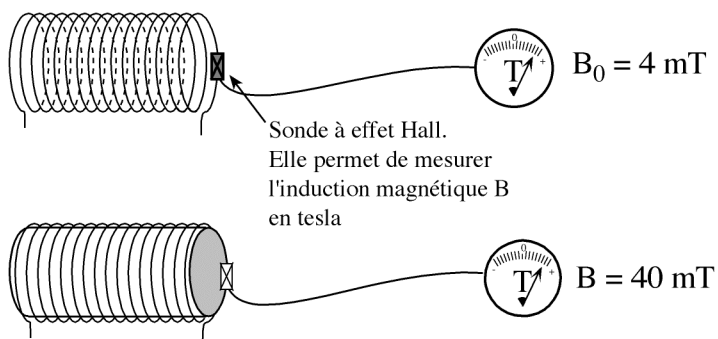
**Explication** : sous l'effet de  $B$ , le corps ferromagnétique subit une aimantation et crée un champ magnétique qui s'ajoute au premier. Le champ total est donc plus intense autour du corps ferromagnétique.

### 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 les 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.

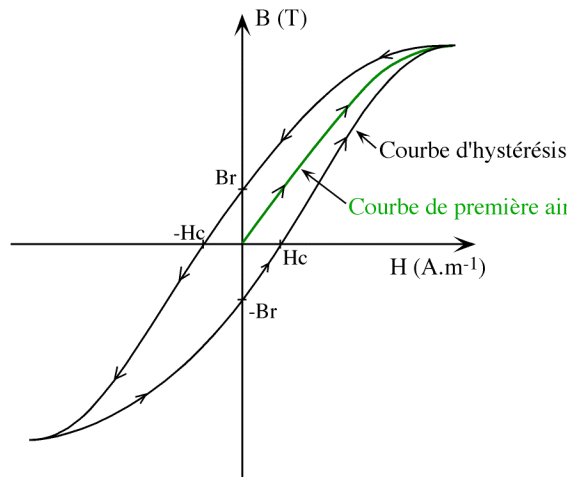
$$H = \frac{B_0}{\mu_0} \text{ et } B = \mu_0 \mu_r H = \mu_r B_0 \Rightarrow \mu_r = \frac{B}{B_0} = \frac{40}{4} = 10$$

### 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.

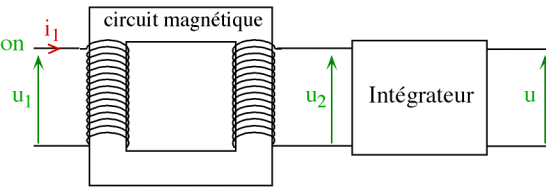


**Principe de l'expérimentation**

La tension  $u_1$  crée un flux magnétique canalisé par le circuit magnétique qui traverse donc le secondaire du transformateur.

**Formules pour information**

$$H = \frac{N_1 \cdot i_1}{L} \quad u_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad u_2 = -N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad \phi = B \cdot S \quad u_2 = -N_2 \cdot S \cdot \frac{dB}{dt} \quad B = \frac{-1}{N_2 \cdot S} \int u_2 \cdot dt$$



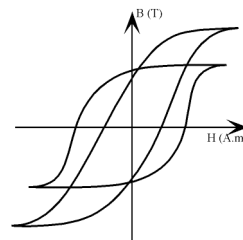
En mesurant  $i_1$ , nous pouvons connaître H, en mesurant u, nous pouvons connaître B.

- **Zone linéaire** : dans cette zone,  $B = \mu \cdot H$  avec  $\mu$  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  $\mu$  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.



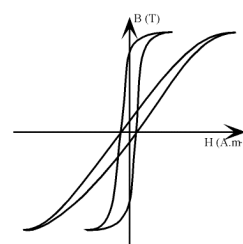
Le cycle est large.

Exemple d'alliages utilisés pour les aimants.

Ferrite (oxyde de fer)	Samarium-Cobalt (Sm-Co)
Saturation à $\approx 0,6$ T	saturation à $\approx 1$ T
$Br \approx 0,4$ T	$Br = 0,8$ T
$Hc \approx 200$ kA/m	$Hc = 500$ 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.

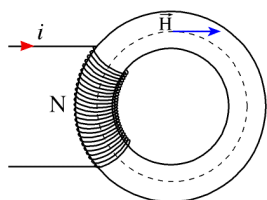
Exemple d'alliages utilisés pour les tôles des transformateurs

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

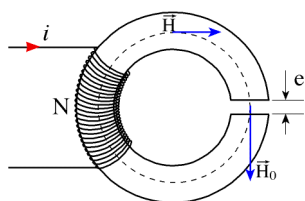


D'après le théorème d'Ampère

$$H.L = N.I$$

- 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)
- H<sub>0</sub> : excitation magnétique dans l'entrefer (A/m)

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

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

μr ≈ 1000 pour du fer. H<sub>0</sub> 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 μr sera grand.

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