

Les fiches techniques

2

Les matériaux Les matériaux magnétiques



2 Matériaux magnétiques

2.1 Principes d'électromagnétisme

2.1.1 Propriétés magnétiques du courant électrique

Un courant électrique qui circule dans un conducteur, crée un champ magnétique au voisinage de ce conducteur.

La polarité des faces d'une bobine dépend du sens du courant qui parcourt la bobine, et du sens de l'enroulement de ses spires.

Face nord : face en regard de laquelle il faut se placer pour voir le courant tourner dans le sens anti-horaire. Un tire-bouchon placé parallèlement à l'axe de la bobine et tournant dans le sens du courant se déplace dans le sens des lignes de force.

2.1.2 Champ d'induction dans l'air

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{\ell} \wedge \vec{u}}{r^2}$$

$d\vec{B}$: variation du champ magnétique (tesla, T) ;

I : courant parcourant le conducteur (A) ;

μ_0 : perméabilité du vide = $4\pi \cdot 10^{-7}$;

$d\vec{\ell}$: différentielle de la longueur du conducteur (m) ;

$r = |\vec{OM}|$ (m) ; $\vec{u} = \vec{OM} / |\vec{OM}|$;

\wedge : symbole du produit vectoriel.

2.1.3 Champ d'induction au centre d'une bobine longue

$$B = \frac{4 \cdot \pi \cdot N \cdot I \cdot \mu_r}{10^7 \cdot \ell}$$

B en teslas ; N : nombre de spires ;

I : intensité en ampère ; NI : nombre d'ampères-tours ;

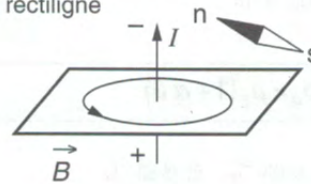
ℓ : longueur de la bobine en mètre ;

$N/\ell = N_1$: nombre de spires par mètre.

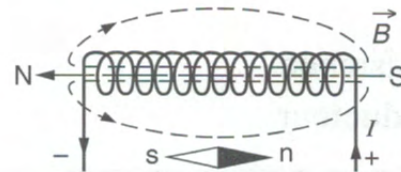
Le tesla est le champ d'induction au centre d'une bobine électrique infiniment longue baignée dans un milieu de perméabilité unité (air) et portant 1 ampère-tour par mètre.

FORMES DE LIGNES DE FORCE SUIVANT LE CONDUCTEUR

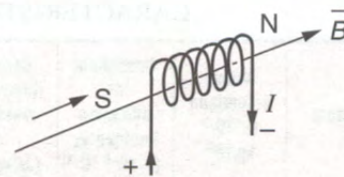
Conducteur rectiligne



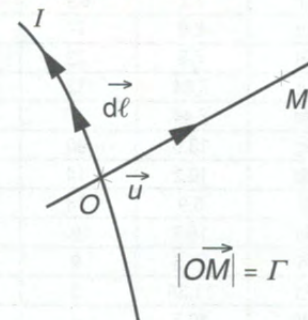
Bobine longue (solénoïde)



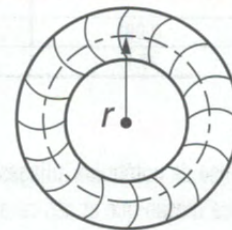
FACE D'UNE BOBINE



CHAMP D'INDUCTION DANS L'AIR



CHAMP D'INDUCTION DANS UN TORE



$$B_{\text{moyen}} = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$

2.14 Perméabilité magnétique

■ Champ magnétique dans un matériau quelconque

La densité de flux magnétique dans un matériau quelconque est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique :

$$B = \mu H$$

B : densité de flux magnétique (T) ;

H : intensité du champ magnétique (A/m) ;

μ : perméabilité du matériau.

■ Perméabilité d'un matériau quelconque

La perméabilité relative d'une substance indique combien de fois, (à égalité d'ampère tours par mètre) l'induction est plus grande dans ce corps que dans l'air.

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

μ : perméabilité absolue d'un matériau (air $\mu = 1$) ;

μ_r : perméabilité relative de ce matériau par rapport au vide (μ_0).

2.15 Aimantation du fer

Un barreau de fer doux s'aimante quand on le place dans une bobine traversée par un courant. La présence d'un noyau de fer augmente le flux.

■ Courbe d'aimantation du fer

- partie Oa : le fer n'est pas saturé ;

- partie ab : coude de saturation ;

- partie bc : saturation ;

H : intensité du champ magnétique ($\mu = \frac{B}{H}$).

■ Introduction dans un champ alternatif

Hystérésis : retard à la désaimantation.

Cycle d'hystérésis : $B = f(H)$.

Trait rouge : cycle d'un matériau à saturation peu élevée, faible perméabilité.

Trait noir : cycle d'un matériau à saturation élevée, grande perméabilité (acier doux).

- Oa et Oc : induction rémanente du noyau (le métal reste aimanté après la disparition du courant) ;

- Od et Ob : champ coercitif. ($Od = H_c$ et $Ob = -H_c$.)

2.16 Flux d'induction magnétique

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B.S.\cos \alpha$$

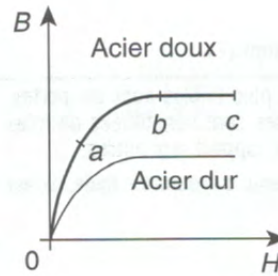
Φ : flux du champ magnétique (weber) ;

\vec{B} : induction (tesla) ; $B = |\vec{B}|$;

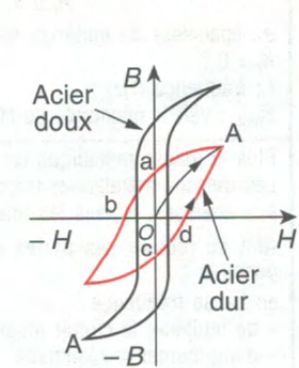
\vec{S} : surface (m^2) ; $S = |\vec{S}|$; α : angle ($\vec{n} \cdot \vec{B}$).

PERMÉABILITÉ RELATIVE DES MATÉRIAUX			
	air	fer	nickel
μ_r	1	2 500	250 000

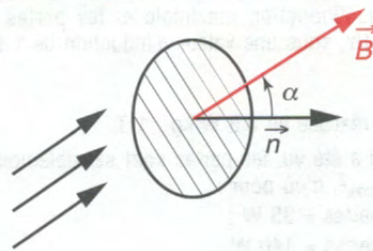
COURBE D'AIMANTATION DU FER



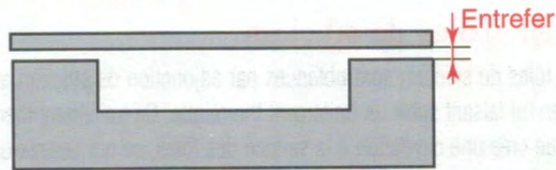
CYCLE D'HYSTÉRÉSIS



FLUX D'INDUCTION MAGNÉTIQUE



FER ET ENTREFER



Énergie emmagasinée :

$$W = \frac{1}{2} B \cdot H = \frac{1}{2} \mu H^2$$

B : densité de flux magnétique (T) ;

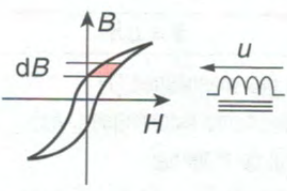
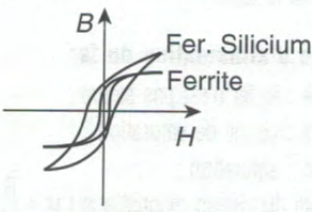
H : intensité du champ magnétique (A/m) ;

μ : perméabilité du matériau.

Nota : Le maximum d'énergie reste stocké dans l'entrefer.

2.17

PERTES DANS LES MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

Pertes par courant de Foucault	Pertes par hystérésis
<p>La variation de flux d'induction donne naissance dans toute la masse métallique à une force électromotrice induite qui donne naissance à des courants.</p> $P_f = K_f (e \cdot f \cdot B_{\max})^2 ;$ <p>e : épaisseur du matériau (m) ; $K_f = 0,2$; f : fréquence (Hz) ; B_{\max} : valeur maximale de l'induction (T).</p>	<p>Elles sont dues à l'énergie mise en jeu pour parcourir le cycle d'hystérésis.</p> 
<p>Plus la masse métallique est fine, plus faibles sont les pertes. Les masses métalliques importantes sont constituées de tôles peu épaisses, isolées les unes par rapport aux autres.</p> <p>Afin de réduire ces pertes à niveau d'induction fixée, il est possible :</p> <p>en basse fréquence :</p> <ul style="list-style-type: none"> - de feuilletter le circuit magnétique ; - d'augmenter la résistivité : fer silicium ; <p>en haute fréquence :</p> <ul style="list-style-type: none"> - d'utiliser des ferrites (matériaux à haute résistivité). 	<p>Pour une augmentation de dB de l'induction magnétique :</p> $dW = i \cdot u \cdot dt = i \cdot n \cdot \frac{d(BS)}{dt} dt$ <p>dW : $H \cdot l \cdot S dB = H \cdot V dB$ V : volume du matériau magnétique</p> <p>d'où pour un cycle complet :</p> $W = V \cdot \int_{\text{cycle}} H dB = V_x \text{ Aire du cycle}$ $P_h = f_x V_x A.$
<p>Paramètres technologiques des tôles magnétiques :</p> <p>Les constructeurs fournissent généralement, afin de caractériser leur tôle, l'induction maximale et les pertes par kilogramme à 50 Hz, sous une valeur d'induction de 1 tesla.</p> <p>EXEMPLE :</p> <p>Self de 10 kg réalisée en 3,5 W/kg : 1 T.</p> <p>D'après ce qui a été vu, les pertes sont sensiblement proportionnelles à B_{\max}^2, d'où pour :</p> <p>$B_{\max} = 1 \text{ T}$: pertes = 35 W ; $B_{\max} = 2 \text{ T}$: pertes = 140 W.</p> <p>L'induction double, les pertes quadruplent.</p>	<p>Le seul paramètre sur lequel nous pouvons jouer est A, mais il est propre aux matériaux utilisés. Il est à noter que la surface des cycles des matériaux ferrite est beaucoup plus faible que pour les matériaux fer-silicium :</p> 

2.2 Tôles pour transformateur

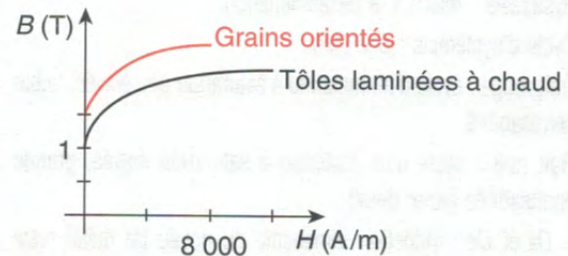
2.21 Tôles de silicium

Les tôles de silicium sont obtenues par adjonction de silicium au fer en lui faisant subir un traitement thermique. Ce traitement thermique crée une oxydation à la surface des tôles, ce qui permet de les isoler les unes des autres et de diminuer les pertes par courants de Foucault.

2.22 Tôles de silicium à grains orientés

Pour diminuer les pertes, on oriente les cristaux constituant la tôle par un laminage à froid. Un procédé de recuit final permet de créer une couche à base de silicate de magnésium qui isolera les tôles. Le silicium est limité à 4 % car il rend les tôles cassantes. Les tôles peuvent être :

- laminées à chaud (cristaux non orientés) : pertes 1 à 3,6 W/kg pour $B = 1 \text{ T}$ à $f = 50 \text{ Hz}$;



- à cristaux orientés : pertes 0,5 W/kg pour $B = 1 \text{ T}$ à $f = 50 \text{ Hz}$. L'intérêt d'orienter les cristaux est de réduire les pertes et d'avoir une saturation plus lente afin d'utiliser des inductions plus élevées. La surface du cycle d'hystérésis est plus faible. Le circuit magnétique est feuilleté, les tôles sont de faible épaisseur (0,35 mm d'épaisseur généralement) et isolées électriquement par un vernis.

2.23 Alliage au nickel

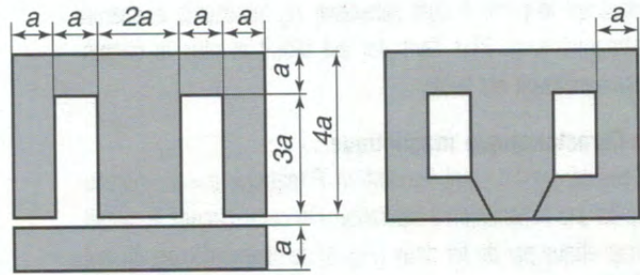
Ce sont des alliages différenciés par les traitements thermiques et les orientations de cristaux. Ils sont très sensibles aux chocs mécaniques qui leur font perdre leur propriétés magnétiques.

2.24 Découpe des tôles

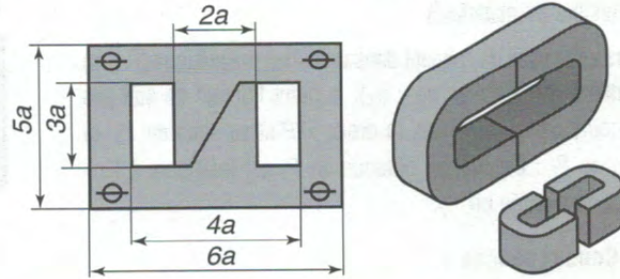
Pour former un circuit magnétique, les tôles sont découpées :
 - soit en forme de E et I ;
 - soit suivant une découpe du type cuirassée qui permet un montage « semi-encasté ».

Les tôles en alliages de nickel (au métal, anhyser) sont utilisées pour la réalisation des circuits magnétiques en C. Après enroulement sur un gabarit rectangulaire de façon à former un anneau, le circuit est imprégné sous vide avec un plastique thermodurcissable. Il est ensuite scié avec beaucoup de soin en son milieu, ce qui donne deux C. Les deux moitiés sont numérotées de façon à les remonter dans le bon sens. Elles sont maintenues serrées par un collier.

TÔLES TYPE EI (DIN 41302) TÔLES TYPE CUIRASSÉ



TÔLE TYPE ENCLIQUETABLE CIRCUIT DU TYPE C



2.25

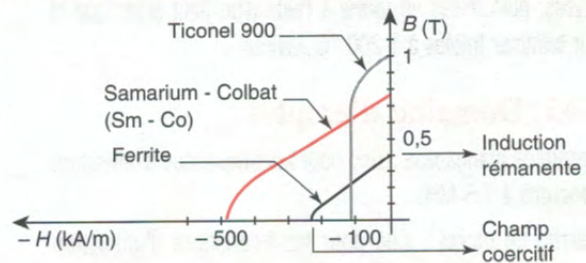
DESCRIPTIF DES ALLIAGES CONSTITUTIFS DES TÔLES

Composition	Alliage	Épaisseur de bande (e) (mm)	Induction à saturation (T)	Induction rémanente (T)	Champ coercitif (A/m)	Perméabilité maximale en continu	Perméabilité maximale à 50 Hz	Pertes totales à 50 Hz (W/kg)	Masse spécifique (g/cm ³)	Résistivité (μΩ.cm)	Utilisation
Fe Si 3,5 % Si	Fer-silicium	0,1 à 0,35	2			7 500	7 000	B = 1T 1	7,6	48	Transformateurs d'alimentation bobines de forte valeur
Fe Si 1 % Si	Fer-silicium	0,5 à 0,3	1,9			4 500	4 000	B = 1T 3,6	7,8	48	Transformateurs d'alimentation bobines de forte valeur
Fe Si grains orientés	Fer-silicium	0,05	3	1,4	8	40 000	> 40 000	B = 1T 0,2	7,65	48	Transformateurs d'impulsions < 1MHz
Fe Si grains orientés	Fer-silicium	0,035	3	1,4	8	40 000	> 40 000	B = 1T 0,7	7,65	48	Transformateurs d'alimentation
Ni 36 Fe 64	Anhyser	0,5	1,3	0,6	56	6 000	6 000	B = 1T 1,1	8,1	75	Transformateurs et filtres basse fréquence

2.3 Aimants permanents

Ils sont constitués d'alliages de fer, nickel, cobalt, aluminium dont le cycle d'hystérésis présente un champ coercitif et une induction rémanente élevés. Ils sont obtenus par fusion à 1 600 °C sous un champ magnétique puissant qui oriente les molécules. Ils peuvent aussi être constitués d'agglomérés de poudre d'oxyde de fer : ferrites. Le samarium-cobalt est utilisé dans les moteurs à courant continu sans balai.

CARACTÉRISTIQUES DES AIMANTS PERMANENTS



REMARQUE :

Pour un aimant permanent, le point figuratif de l'état de l'aimant est le point P dont l'abscisse H_0 représente le champ démagnétisant. Plus l'entrefer est réduit et plus le champ démagnétisant est faible.

■ Caractéristique magnétique :

Considérons un point figuratif en P (entrefer $e = e_1$) obtenu après une aimantation à saturation. On court-circuite le circuit magnétique par du fer doux (Fig. a), le champ démagnétisant devient nul $P \rightarrow P'$, le déplacement se fait sur une droite appelée droite de recul. (La pente dépend de la perméabilité réversible du matériau.)

Lors de la pose de l'aimant dans un milieu magnétique (Fig. b) (entrefer $e = e_2$ avec $e_2 < e_1$), le point figuratif ne suit pas la courbe $B = f(H)$ mais la droite $P'P$ et se situe en P_1 au lieu de P_2 : L'induction obtenue en P_1 est inférieure à l'induction désirée en P_2 .

■ Conséquences :

Il est souvent nécessaire de procéder à l'aimantation de l'aimant après la mise en place des pièces polaires pour obtenir le point figuratif P_2 .

Les aimants permanents ont généralement une courbe de démagnétisation $B = f(H)$ linéaire (confondue avec la droite de recul) afin d'obtenir l'induction maximale pour un entrefer donné.

2.4 Ferrites**2.41 Composition**

Ce sont des matériaux céramiques, durs, cassants, de formule générale $Me Fe_2O$ où Me représente plusieurs métaux bivalents comme le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le nickel (Ni), le cobalt (Co), le cuivre (Cu), le fer (Fe) ou le magnésium (Mg).

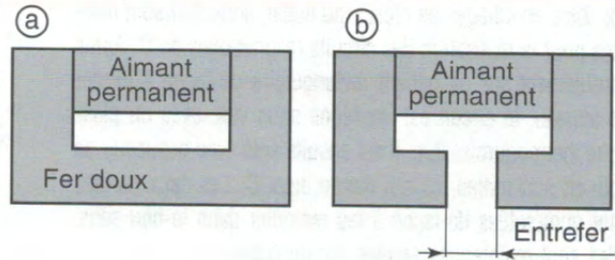
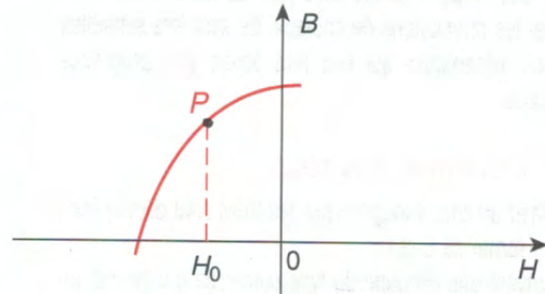
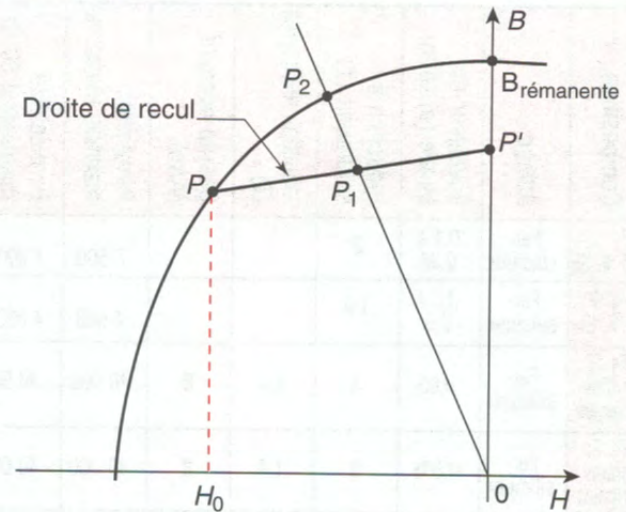
2.42 Procédés d'obtention

Les ferrites sont un mélange de poudres d'oxydes et de carbonates. Ces poudres sont pré-frittées à 1 000 °C et ensuite broyées, puis mises en forme à l'aide d'un liant organique et pour terminer frittées à 1 200 °C environ.

2.43 Domaine d'emploi

– Ferrite de manganèse : zinc pour les fréquences d'utilisation inférieures à 1,5 MHz.

– Ferrite de nickel : zinc pour les fréquences d'utilisation $0,5 \text{ MHz} < f < 200 \text{ MHz}$.

AIMANT PERMANENT – POINT FIGURATIF**CARACTÉRISTIQUE MAGNÉTIQUE – DROITE DE RECU****CARACTÉRISTIQUES DES FERRITES**

Haute résistivité : 10^2 à $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$.

Ces valeurs favorisent la limitation des pertes par courants de Foucault.

De par leur forte résistivité (10^7 à 10^{13} fois plus élevée que le fer), les circuits magnétiques sont massifs.

Haute perméabilité : 5 à 10^4 .

Induction de saturation :

Ordre de grandeur : 0,4 T à 0,5 T.