

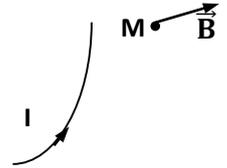
Chapitre 3

Matériaux magnétiques

1. Phénomènes magnétiques

1.1. Induction B et excitation H

Dans le vide, l'induction \vec{B} est créée par un circuit électrique parcouru par un courant I . En un point donné M de l'espace,



On a toujours une relation du type :

$$|\vec{B}| = B_M = \mu_0 \times kI ; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ est la perméabilité du vide}$$

Le produit « kI » caractérise l'action en M du circuit électrique parcouru par le courant I .

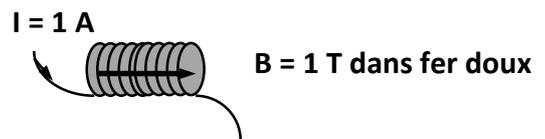
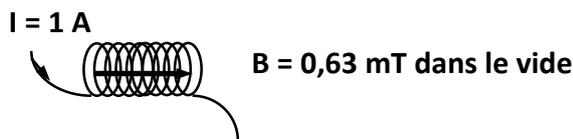
On dit que le milieu magnétique caractérisé par μ_0 , est excité par le circuit électrique « kI » et on définit ainsi le vecteur excitation magnétique \vec{H} qui vérifie la relation :

$$\vec{B} = \mu_0 \times \vec{H} \quad \text{---> } B \text{ en Tesla et } H \text{ en A/m}$$

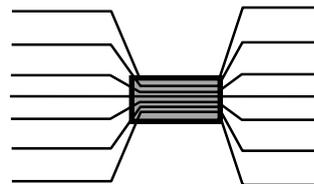
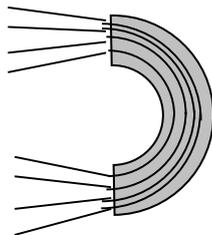
1.2. Substance ferromagnétique

Certaines substances dites **ferromagnétiques**, très souvent à base de fer, ont une perméabilité très élevée : $B = \mu H$ avec perméabilité relative $\mu_r = \mu/\mu_0 \approx 10^3$ à 10^5 .

Exemple : solénoïde de 500 spires/m

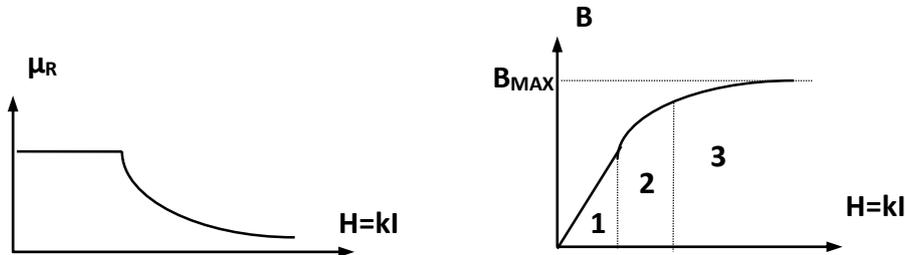


➤ Ces matériaux canalisent les lignes de champs.



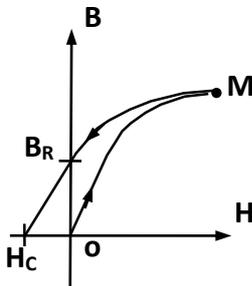
- Ils perdent leurs propriétés magnétiques au-dessus de la température de Curie : (70 °C pour le fer).
- Leur perméabilité relative diminue fortement quand H augmente - **saturation** - et dépend des états magnétiques antérieurs - **hystérésis magnétique**.

1.3. Saturation du circuit magnétique



Les machines électriques fonctionnent dans la zone utile «2» (légèrement saturée). En zone saturée «3», le courant I créant B est trop élevé (échauffement de la machine). En zone linéaire «1», le champ B est trop faible.

1.4. Hystérésis du circuit magnétique



L'induction B présente dans un matériau ferromagnétique dépend des états magnétiques antérieurs :

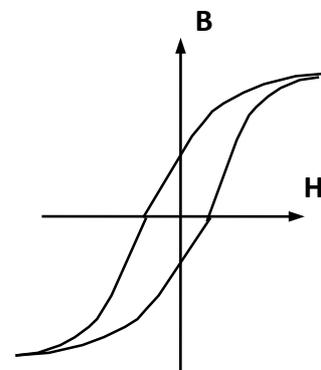
- ✓ Après une première aimantation «OM», le circuit magnétique reste aimanté : **induction rémanente B_R** .
- ✓ Il faut lui appliquer une excitation H_C négative pour annuler à nouveau B : $H_C =$ **excitation coercitive**

Cycle d'hystérésis - Pertes par hystérésis

Si on applique à un matériau magnétique une excitation H alternative, on obtient dans le plan BH un **cycle d'hystérésis**.

La surface du cycle rend compte de la difficulté à ré-aimanter le circuit magnétique. Cela se traduit par des pertes proportionnelles à la fréquence f de l'excitation H :

$$\text{Pertes par hystérésis : } P_h = k_1 f B_{max}^2$$



Remarques :

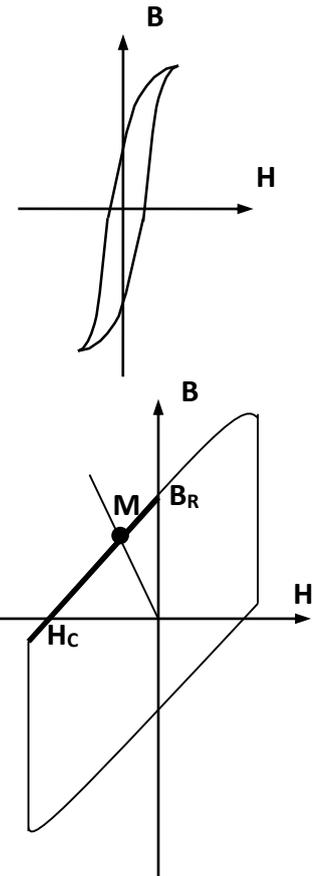
✓ k_1 dépend du matériau et est proportionnel à la surface du cycle : pour diminuer les pertes, il faut diminuer la surface du cycle ---> **utilisation de matériaux doux.**

Exemple : acier au silicium.

✓ Dans les aimants permanents, on recherche des valeurs importantes de B_R et H_C : il faut donc augmenter la surface du cycle ---> **utilisation de matériaux durs.**

Les aimants n'étant pas soumis à une excitation H variable, le point de fonctionnement **M** est fixe (la caractéristique utile est en trait fort).

Le point **M** ne se déplace pas suivant le cycle d'hystérésis, et bien que la surface de ce dernier soit importante, *les pertes par hystérésis sont nulles.*



1.5. Courants induits - Pertes par courants de Foucault

Le circuit magnétique de la plupart des machines électriques « voit » une induction B **variable** (alternative). Les matériaux utilisés, très souvent métalliques (essentiellement du fer), sont aussi conducteurs de l'électricité.

Ainsi, d'après **la loi de Faraday**, des courants induits i_F , appelés **courants de Foucault**, prennent naissance et génèrent dans le matériau des pertes par effet joule $r \cdot i_F^2$:

Pertes par courants de Foucault :

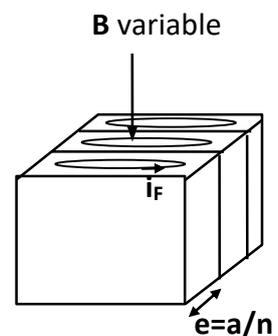
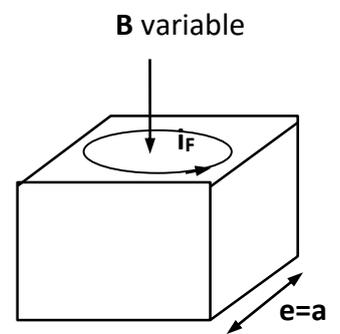
$$P_F = k_2 \times \frac{(e \cdot f \cdot B_{max})^2}{\rho}$$

Remarques :

Pour réduire les pertes par courants de Foucault, on peut :

- diminuer l'épaisseur e en utilisant un assemblage de tôles de faible épaisseur (35/100 ou 50/100) isolées entre elles :

- circuit magnétique feuilleté



➤ utiliser des matériaux magnétiques à résistivité plus élevée :

- **tôles d'acier au silicium**
- **ferrites** (à fréquence élevée)

1.6. Pertes magnétiques ou pertes fer

Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault prennent naissance à l'intérieur du matériau. Elles sont très souvent cumulées et prénommées « **pertes magnétiques ou pertes fer** » :

$$P_{FER} = C_{FER} \times \left(\frac{f}{f_0}\right)^k \times \left(\frac{B}{B_0}\right)^2 \times M$$

C_{FER} : Coefficient de pertes fer en W/kg (donnée constructeur)

M : masse du circuit $f_0 = 50 \text{ Hz}$ $B_0 = 1 \text{ T}$ $1,5 < k < 2$

2. Matériaux magnétiques doux

Matériaux à cycle d'hystérésis étroit pour minimiser les pertes par hystérésis, ils sont en général feuilletés et à base de fer (le fer pur a une résistivité trop importante). On distingue essentiellement:

- ✓ les aciers électriques (au silicium) --> basses fréquences : $f = 50 \text{ Hz}$
- ✓ les alliages fer nickel ou cobalt --> moyennes fréquences : $f < 100 \text{ kHz}$
- ✓ les ferrites (oxydes de fer) --> hautes fréquences : $f < 1000 \text{ kHz}$

2.1. Aciers électriques

Ils sont essentiellement utilisés, dans les machines électriques travaillant aux fréquences industrielles (transformateurs et machines tournantes).

Ils sont constitués de tôles en acier allié à du silicium (1 à 5 %), ce qui a l'avantage d'augmenter la résistivité mais l'inconvénient de rendre les tôles cassantes.

On distingue :

- ✓ **les tôles classiques à grains non orientés** $C_{FER} \approx 5 \text{ W/kg}$

Elles sont obtenues par un laminage à chaud suivi d'un décapage chimique, d'un dernier laminage à froid et d'un traitement thermique.

Elles sont essentiellement utilisées dans les machines tournantes et les transformateurs de faible puissance ($< 100 \text{ kW}$).

✓ **les tôles à grains orientés** $C_{FER} \approx 1 \text{ W/kg}$

Le procédé de fabrication est plus complexe et comporte un laminage à chaud suivi de plusieurs laminages à froid et traitements thermiques intermédiaires.

Des propriétés magnétiques optimales sont obtenues, mais uniquement dans le sens du laminage : forte perméabilité, induction à saturation importante, très faibles pertes fer.

Elles sont essentiellement utilisées dans les transformateurs de forte puissance ($> 1 \text{ MW}$).

2.2. Alliages Fe/Ni ou Fe/Co

Le nickel et surtout le cobalt sont des métaux onéreux et sont alliés au fer dans des proportions importantes (30 à 80 %) ce qui rend ces alliages beaucoup plus chers que les aciers électriques.

Ils sont essentiellement utilisés en moyenne fréquence ($< 100 \text{ kHz}$) et généralement dans des domaines où la puissance mise en jeu est plutôt faible :

- ✓ Électrotechnique miniaturisée (appareils de mesure, tachymètres, certains relais...)
- ✓ Téléphonie
- ✓ Dispositifs de sécurité (disjoncteurs différentiels, blindage magnétique)

2.3. Ferrites douces

Elles sont très utilisées en électronique de puissance et plus particulièrement dans les alimentations à découpage où la fréquence de fonctionnement est élevée ($> 100 \text{ kHz}$).

Ce sont des céramiques ferromagnétiques à base d'oxydes de fer ($X\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ -- X = Mn ou Ni, Zn).

Elles sont fabriquées sous atmosphère inerte : Après mélange et broyage des composants, les poudres sont assemblées par frittage à haute température ($\approx 1200 \text{ °C}$). On obtient ainsi un matériau de grande résistivité, massif, mais malheureusement très cassant.

Tableau 1 : Guide de choix des matériaux doux

Forme de l'induction	Objectifs de choix	Matériau						Données économiques	utilisations
		Exemples	B _{max} (T)	Champ coercitif H _c (A/m)	μR pour B=1 T	Résistivité (Ω.m x 10 ⁻⁸)	Pertes (W/kg)	Production t/an Prix en F/kg	
constante	Rechercher une induction B maximale avec un champ H le plus faible possible, d'où une perméabilité élevée	Fe pur	1,6	4	10 000	10	B=1,5T f=50Hz ≈ 10	5 000 000 4 à 8	Pôles inducteurs de machines à courant continu. Electroaimant de contacteurs alimentés en courant continu Rotor en acier forgé de turboalternateur de forte puissance
		Acier doux (0,1 % de C)	1,2		1 500	10			
Variable f=50 ou 60Hz	Rechercher de faibles pertes par courant de Foucault et hystérésis tout en conservant une très bonne perméabilité, d'où un matériau à cycle étroit	Tôle laminée à grains non orientés acier+1 à 4%Si	1,7	24 à 72	6 000 à 9 000	15 à 60	B=1,5T f=50Hz ép. ^{35/100} : 2,3 ép. ^{65/100} : 9,5	1 000 000 8 à 16	Circuits magnétiques des machines à courant alternatif : Transformateurs Moteur asynchrone, synchrone Electroaimant de contacteurs alimentés en courant alternatif
		Tôle à grains orientés acier+3,5 %Si	2	5,6	65 000	48	B=1,5T f=50Hz ép. ^{27/100} : 0,89 ép. ^{35/100} : 1,11		
Variable f > 60Hz	Rechercher une perméabilité importante aux hautes fréquences avec de faibles pertes par courant de Foucault et hystérésis	Ferrites MFe ₂ O ₃	0,4	? à ?	7000	Isolant : 10 ¹⁶	B=0,2T f=100kHz 100	150 000 30 à 300	M=Zn et/ou Mn (f<1,5MHz) M=Zn et/ou Ni (f<200MHz) Alimentation à découpage, filtre haute fréquence
		Alliage de fer-nickel	0,8 à 1,6	0,4 à 55	6000 à 220000	35 à 60	B=0,2T f=100kHz 100	10 000 150 à 400	Circuits magnétiques des composants utilisés à moyenne et haute fréquence : - transformateurs - bobines de couplage
		Alliage de fer-cobalt	0,6 à 1,2	35 à 150	5000 à 12 000	15 à 40	B=0,2T f=100kHz 40	Faible 800 à 2000	- inductances - filtres - blindages

3. Matériaux magnétiques durs

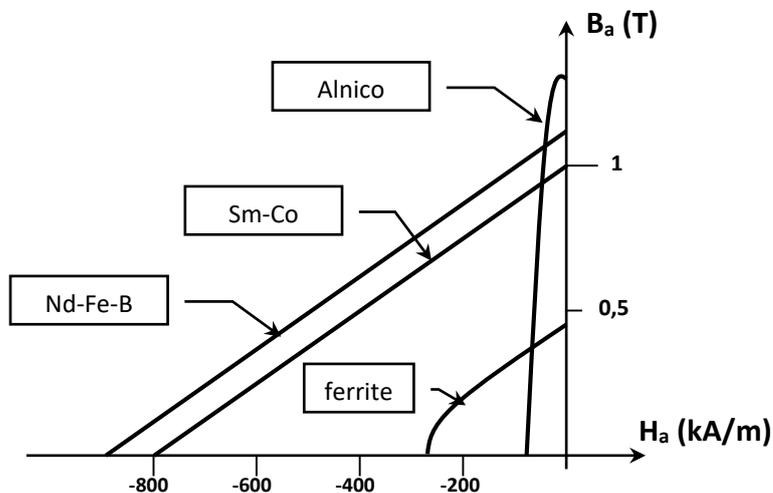
Ces matériaux sont utilisés pour la réalisation d'aimants permanents. Ils possèdent une induction rémanente importante et un champ coercitif élevé.

Ils sont en général massifs et à base de fer ou de terres rares (Sm : samarium, Nd : Néodyme).

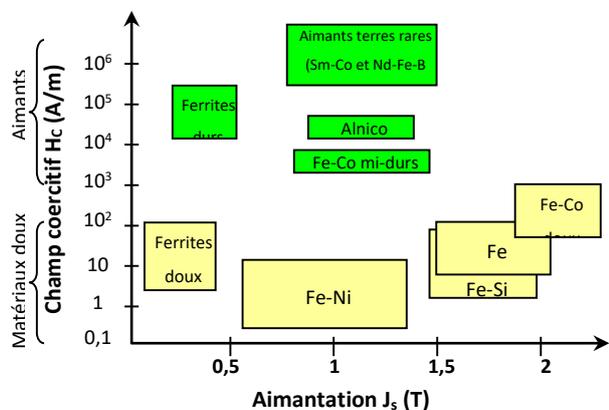
Ils sont souvent associés à du fer doux qui canalise les lignes d'induction et sont aimantés lors du procédé de fabrication.

On distingue essentiellement :

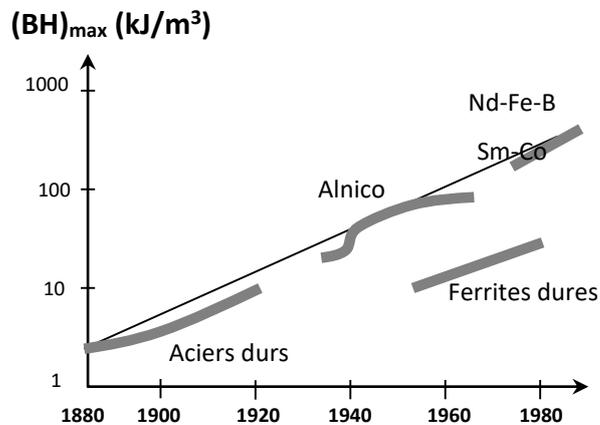
- ✓ les ferrites dures --> les moins cher et les plus utilisées
- ✓ les alliages à base de terres rares --> très performants et en expansion
- ✓ les « alnico » (alliages fer + Al Ni Co) --> en perte de vitesse



Courbes de désaimantation pour les grandes familles de matériaux magnétiques durs (aimants permanents)



Comparaison matériaux doux /durs



Evolution historique des aimants

3.1. Alnico

Les Alnico ont été les premiers aimants fabriqués artificiellement. Ils sont aujourd'hui en perte de vitesse derrière les ferrites et les aimants à base de terres rares.

Ce sont des alliages de fer, d'aluminium, de nickel et de cobalt (les meilleures performances sont obtenues pour des alliages riches en cobalt).

Ils sont obtenus par moulage à haute température, suivi de divers traitements thermiques et magnétiques, ou alors par frittage suivi d'une rectification et d'une découpe.

Ils ont une très bonne tenue en température (maintien des performances magnétiques), ainsi qu'une bonne solidité mécanique. Leur induction rémanente est assez élevée ($1,2 T$), mais leur aimantation chute très rapidement de manière irréversible en présence d'un champ H démagnétisant (augmentation brutale de l'entrefer).

Ils sont surtout utilisés en métrologie ou dans des applications où les aimants sont exposés à des sollicitations mécaniques.

3.2. Ferrites dures

Ce sont des céramiques à base d'oxydes ferriques (Fe_2O_3) associées à du Baryum (Ba) ou du Strontium (Sr).

Elles sont obtenues après plusieurs étapes :

- ✓ Broyage fin des différents constituants puis mélange à 1200 °C pour former la ferrite.
- ✓ Broyage de la ferrite en présence d'eau pour obtenir une poudre très fine ($0,5\ \mu$).
- ✓ Compression avec un liant dans des moules de forme adaptées, en présence d'un champ magnétique.
- ✓ Frittage haute température (1200 °C), suivi d'un refroidissement contrôlé.

Elles présentent le meilleur rapport qualité/prix. Par contre, leur induction rémanente est assez modeste ($< 0,5 T$), et leur aimantation chute aussi rapidement de manière irréversible en présence d'un champ H démagnétisant (identique à l'alnico). De plus, les céramiques obtenues sont très dures et cassantes ce qui interdit l'usinage des produits finis.

3.3. Aimants à base de terres rares

Assez récemment, des alliages à base de terres rares sont apparus. Ils possèdent d'excellentes propriétés magnétiques :

- ✓ Densité d'énergie spécifique de 350 kJ/m^3 (50 kJ/m^3 pour les alnico), ce qui permet une diminution importante du poids et du volume à induction et entrefer donnés.
- ✓ Champ coercitif très élevé avec une aimantation quasi constante ce qui rend très difficile une désaimantation de l'aimant.

On trouve 2 alliages : Samarium-cobalt ou Néodyme-fer-bore. Comme pour les ferrites, ils sont obtenus par frittage de poudres.

Ces produits sont relativement chers et n'ont pas une bonne tenue en température. Ils sont réservés à des applications spécifiques où l'encombrement est le paramètre majeur.

3.4. Domaines d'applications des aimants permanents

- ✓ Inducteur de machines tournantes de faible puissance ($< 10 \text{ kW}$) (machine à courant continu, synchrone, à aimants permanents) ;
- ✓ Haut-parleur et microphone ;
- ✓ Détecteur magnétique ;
- ✓ Compteur, freins magnétiques, tachymètre, appareils de mesure

Tableau 2 : Guide de choix des matériaux durs

		Caractéristiques					Données économiques en 1995 (sous toutes réserves)	utilisations
Matériau	B_r (T)	Champ coercitif H_c (kA/m)	$(BH)_{\max}$ kJ/m ³	Température de Curie T_c (°C)	Température d'utilisation max (°C)	Production t/an Prix en F/kg		
AlNiCo	0,7 à 1,4	50 à 60	13 à 60	860	450	12 000 250	Appareils de mesures Capteurs Pièces exposées aux chocs	
Ferrites	0,4	250	27	460	400	320 000 35	Moteurs, accouplements Répulsion, aimants minces	
Terres rares	SmCo ₅	1	750	190	730	1 300 2 500	Matériel embarqué Microélectronique Moteur synchrone	
	Nd-Fe-B	1,3	950	360	310	1 900 1 500	Répulsion, aimants minces Accouplements	