

### **1. 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 :  $f < 1000 \text{ kHz}$

#### **1.1 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 :***

- 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 :***

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 ( $> 1 \text{ MW}$ ).

#### **1.2 Les alliages Fe-Ni**

Les performances des alliages sont attribuées à leurs pourcentages de nickel variant entre 25 et 35%, dans cette structure finie à une grande maniabilité, il est facile à laminier jusqu'à des épaisseurs très faibles qui pouvant atteindre  $25 \mu\text{m}$ , il est utilisé dans différents appareils comme les transformateurs de signaux et les capteurs.

#### **1.3 Les alliages Fe-Co**

Les alliages Fe-Co ont à la fois des qualités véritablement exceptionnelles et d'énormes défauts. Entre 30 à 50% de cobalt, ces alliages possèdent une aimantation spontanée à température ambiante supérieure ou égale à 2.4 T, record absolu de tous les alliages ferromagnétiques.

L'utilisation de Fe-Co diminue considérablement le poids des dispositifs électromagnétiques, impact direct sur la réduction de l'énergie stockée. Enfin, il faut noter que le cobalt est un élément beaucoup plus coûteux que le nickel car il est peu abondant et moins bien réparti sur la terre.

#### **1.4 Les alliages Fe-Si**

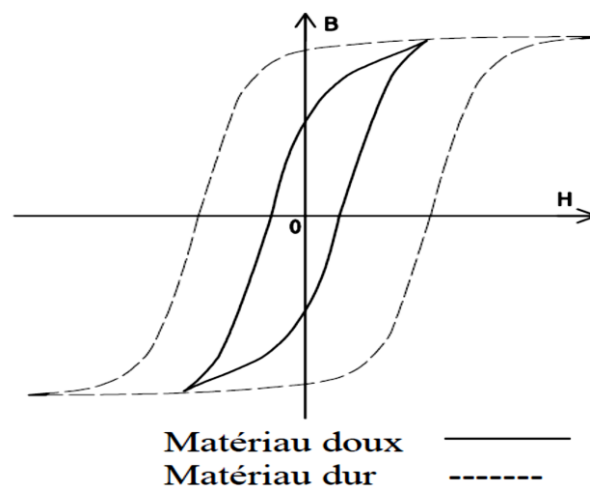
Le fer pur a un comportement cristallographique compliqué, puisqu'il change de structure cristalline entre 910 et 1400°C. Il passe de l'état cubique centré (ferrite ou Fe  $\alpha$ ) à l'état cubique à faces centrées. L'addition de silicium et d'aluminium augmente la stabilité de la phase  $\alpha$ .

Le fait que le métal conserve sa structure ( $\alpha$ ) quelle que soit la température facilite les traitements thermiques de l'alliage. L'addition de silicium et dans une moindre mesure celle de l'aluminium, entraîne un durcissement du métal. Ce durcissement rend possible la découpe dans les tôles minces, de formes compliquées comme celles qu'utilisent les constructeurs de machines. L'addition de silicium entraîne une diminution sensible de l'anisotropie magnéto cristalline du fer. La rotation des moments s'en trouve donc facile.

### **1.5 Ferrites douces**

Elles sont très utilisées en Electronique de Puissance et plus particulièrement dans les alimentations à découpage où la fréquence de fonctionnement est élevée ( $f > 100$  kHz). Ce sont des céramiques ferromagnétiques à base d'oxydes de fer Elles sont fabriquées sous atmosphère inerte : Après mélange et broyage des composants, les poudres sont assemblées par frittage à haute température ( $\approx 1200$  °C). On obtient ainsi un matériau de grande résistivité, massif, mais malheureusement très cassant.

## **2. Cycle d'hystérésis des matériaux ferromagnétiques doux et durs**



Cycle d'hystérésis des matériaux ferromagnétiques doux et durs

### **Matériaux ferromagnétiques doux :**

- \* Cycle d'hystérésis étroit
- \* Champ rémanent  $B_r$  et excitation coercitive  $H_c$  faibles
- \* Pertes par hystérésis faibles
- \* Ils s'aimantent et se désaimantent très facilement

On les utilise pour réaliser des circuits magnétiques de machines (moteurs, génératrices, transformateurs, ...)

### **Matériaux ferromagnétiques durs :**

- \* Cycle d'hystérésis large
- \* Champ rémanent  $B_r$  et excitation coercitive  $H_c$  importants
- \* Pertes par hystérésis importantes
- \* Ils s'aimantent et se désaimantent très difficilement

On les utilise pour réaliser des aimants permanents

GUIDE DE CHOIX DES MATERIAUX DOUX

Forme de l'induction	Objectifs de choix	matériau						Données économiques	utilisations
		exemples	B <sub>max</sub> (T)	Champ coercitif H <sub>c</sub> (A/m)	μR pour B=1 T	Résistivité (Ω.m×10 <sup>-8</sup> )	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 Acier doux (0,1 % de C)	1,6 1,2	4	10 000 1 500	10 10	B=1,5 T f= 50 Hz ≈ 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
		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=1,5 T f= 50 Hz ép. <sup>35/100</sup> : 2,3 ép. <sup>65/100</sup> : 9,5		Circuits magnétiques des machines à courant alternatif : transformateurs moteur asynchrone, synchrone
Variable f= 50 ou 60 Hz	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 à grains orientés acier+3,5 % Si	2	5,6	65 000	48	B=1,5 T f= 50 Hz ép. <sup>27/100</sup> : 0,89 ép. <sup>35/100</sup> : 1,11	1 000 000 8 à 16	Electroaimant de contacteurs alimentés en courant alternatif
		Ferrites MFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	? à ?	7000	Isolant : 10 <sup>16</sup>	B=0,2 T f= 100 kHz 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
Variable f > 60 Hz	Rechercher une perméabilité importante aux hautes fréquences avec de faibles pertes par courant de Foucault et hystérésis	Alliage de fer-nickel	0,8 à 1,6	0,4 à 55	6000 à 220000	35 à 60	B=0,2 T f= 100 kHz 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=0,2 T f= 100 kHz 40	Faible 800 à 2000	- inductances - filtres - blindages

### 3. Matériaux Ferromagnétiques durs

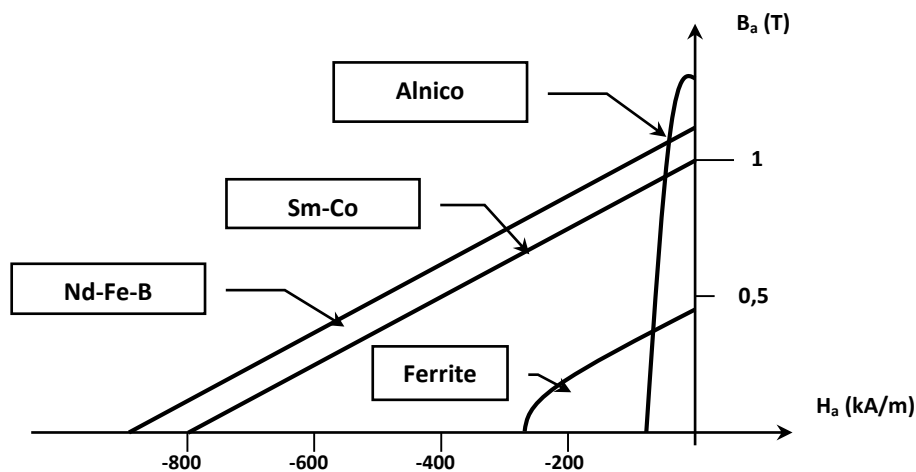
Ces matériaux sont utilisés pour la réalisation d'aimants permanents. Ils possèdent une induction rémanente importante et un champ coercitif élevé.

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

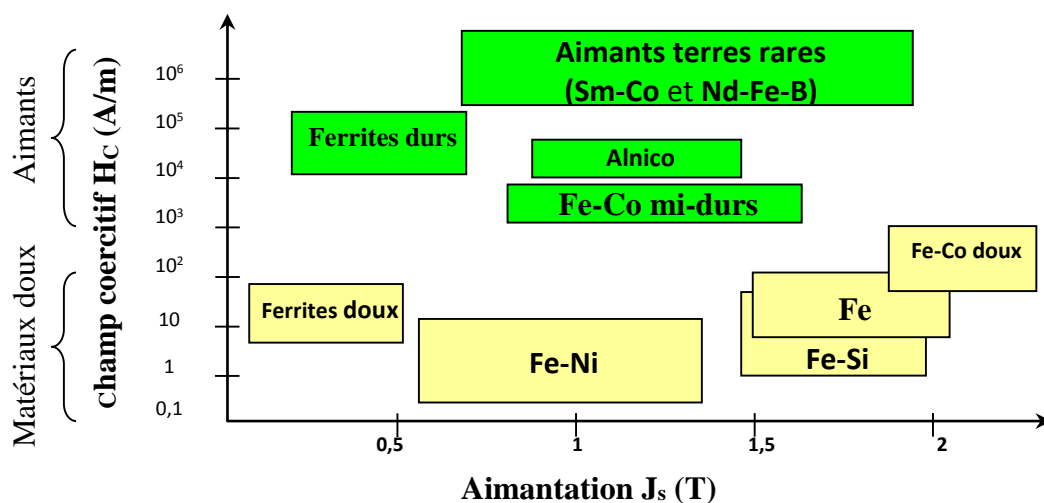
Ils sont souvent associés à du fer doux qui canalise les lignes d'induction et sont aimantés lors du procédé de fabrication.

On distingue essentiellement, aujourd'hui :

- les *ferrites dures* --> moins cher et le plus utilisé
- les *alliages à base de terres rares* --> très performants et en expansion
- les « *alnico* » (alliages fer + AlNiCo) --> en perte de vitesse



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



*Comparaison matériaux doux /durs*

### **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 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) associées à du Baryum (Ba) ou du Strontium (Sr).

Elles sont obtenues après plusieurs étapes :

broyage fin des différents constituants puis mélange à  $1200^\circ\text{C}$  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 ( $1200^\circ\text{C}$ ), 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 (idem 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  $350 \text{ kJ/m}^3$  ( $50 \text{ kJ/m}^3$  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.

**4. Domaines d'applications des aimants permanents**

- inducteur de machines tournantes de faible puissance (< 10 kW) (machine à courant continu, synchrone, à aimants permanents).
- haut-parleur et microphone
- détecteur magnétique
- compteur EDF -- freins magnétiques – tachymètre
- appareil de mesure

**5. Caractéristiques des aimants permanents**

		caractéristiques				Données économiques en 1995	Utilisations
Matériau	$B_r$ (T)	Champ coercitif $H_c$ (kA/m)	$(BH)_{max}$ kJ/m <sup>3</sup>	Température de Curie $T_c$ (°C)	Température d'utilisation max (°C)	Production t/an Prix en F/kg	
<b>AlNiCo</b>		0,7 à 1,4	50 à 60	13 à 60	860	450	12 000 <b>250</b> - Appareils de mesures - Capteurs - Pièces exposées aux chocs
<b>Ferrites</b>		0,4	250	27	460	400	320 000 <b>35</b> - Moteurs, accouplements - Répulsion, aimants minces
<b>Terres rares</b>	SmCo <sub>5</sub>	1	750	190	730	200	1 300 <b>2 500</b> - Matériel embarqué - Microélectronique - Moteur synchrone
	Nd-Fe-B	1,3	950	360	310	150	1 900 <b>1 500</b> - Répulsion, aimants minces - Accouplements

**6. Critères de choix**

Chaque famille d'aimants présente un défaut :

- **AlNiCo** : faible champ coercitif (attention à la désaimantation)
- **Ferrites** : faible induction rémanente
- **Sm-Co** : technologie onéreuse
- **Nd-Fe-B** : faible température d'utilisation due à l'instabilité thermique des propriétés thermiques

On choisira telle ou telle famille selon les impératifs suivants :

- *Ferrites* : faible coût de revient
- *Terres rares* : volume et poids réduits
- *AlNiCo* : solidité mécanique et bonne tenue en température