

I. Matériaux magnétiques :

Soumises à une induction magnétique, certaines substances se mettent à produire elles-mêmes, dans le volume qu'elles occupent et à l'extérieur, une induction magnétique. On dit qu'elles s'aimantent ou se polarisent magnétiquement. Ils s'appellent *matériaux magnétiques*.

II. 1. Induction magnétique \vec{B} et champ magnétique \vec{H} dans le vide

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 :

$$\|\vec{B}\| = B_M = \mu_0 \times kI$$

et on définit ainsi le vecteur excitation magnétique \vec{H} qui vérifie la relation :

$$\vec{B} = \mu_0 \times \vec{H} \rightarrow B \text{ en tesla et } H \text{ en A/m}$$

la constante de proportionnalité $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$, on appelle μ_0 la perméabilité magnétique du vide.

2. Moment magnétique atomique. Instrument d'étude des matériaux magnétiques

Le moment magnétique d'un atome est représenté par deux modèles:

- le dipôle magnétique (fig. 3.3);
- le courant ampérien (fig. 3.4).

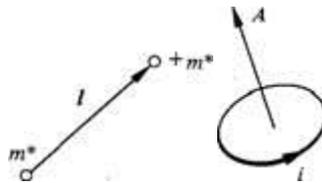


Fig. 3.3

Fig. 3.4

qui sont définis respectivement par

$$m_d = m l \quad \text{Wb m} \quad (3.5)$$

$$m_A = i A \quad \text{A-m}^2 \quad (3.6)$$

A est le vecteur représentant la surface délimitée par le courant circulaire i .

3. Vecteur aimantation et vecteur polarisation magnétique

L'induction magnétique dans la matière peut être exprimée par l'équation

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (3.9)$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{I}) \quad (3.10)$$

avec :

le vecteur aimantation \vec{M} , mesure de la densité volumique de moment magnétique ampérien. L'unité de \vec{M} est l'ampère par mètre.

le vecteur polarisation magnétique \vec{I} , mesure de la densité volumique de moment magnétique dipolaire. L'unité de \vec{I} est le Tesla.

II.4. Perméabilité magnétique

On appelle *perméabilité magnétique absolue* μ la grandeur

$$\mu = \mu_0 + X = \mu_0(1 + X_r) \quad \text{H/m} \quad (3.13)$$

La perméabilité magnétique relative

$$\mu_r = \mu / \mu_0; \quad (3.14)$$

II.5. Susceptibilité magnétique :

L'aimantation \vec{M} est proportionnelle à l'excitation magnétique appliquée \vec{H} : le coefficient de proportionnalité, noté χ , définit la susceptibilité magnétique du milieu ou matériau considéré.

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H}$$

Dans le cas général, on définit la susceptibilité par :

$$X_m = \left. \frac{\partial M_{m,H}}{\partial H} \right|_{H=0}$$

On distingue plusieurs types de magnétisme :

- Lorsque X est négatif, on dit que le corps dans lequel apparaît l'aimantation est diamagnétique.
- Lorsque X est nul, on a du vide.
- Lorsque X est positif, le corps est dit paramagnétique.
- Lorsque X est positif et très élevé, le corps paramagnétique est dit ferromagnétique.

Certains matériaux ferromagnétiques, outre leur perméabilité élevée, présentent une rémanence : ils conservent leur aimantation en l'absence d'excitation. Les principaux matériaux utilisés sont le fer, le cobalt et le nickel.

III. CLASSIFICATION DES TYPES DE MAGNÉTISME

1. Diamagnétisme

Ce type de magnétisme est caractérisé par une susceptibilité relative négative, de faible amplitude.

Un matériau diamagnétique va s'aimanter faiblement dans le sens opposé au champ magnétique et va perdre son aimantation lorsque le champ magnétique cesse.

Le diamagnétisme est dû à un mouvement orbital des électrons, provoqué par le champ magnétique appliqué c.d.r « le diamagnétisme est dû au fait que les orbites électroniques agissent chacune comme des petites spires de courant ». Ce mouvement peut être assimilé à un courant microscopique dont le comportement serait comparable à celui d'un courant induit dans un solénoïde.

En vertu de la loi de Lenz, le courant induit s'oppose au champ qui le produit, ce qui est en accord avec le fait que X_r est négatif. Le diamagnétisme nécessite un nombre pair d'électrons, que tous les électrons soient appariés. le diamagnétisme ne dépend pas de la température.

Les gaz rares, certains métaux, la plupart des métalloïdes et un grand nombre de composés organiques sont diamagnétiques.

Matière	X_r	Matière	X_r
Si	$- 1,2 \cdot 10^{-6}$	Se	$- 4,0 \cdot 10^{-6}$
Cu	$- 1,08 \cdot 10^{-6}$	Ag	$- 2,4 \cdot 10^{-6}$
Zn	$- 1,9 \cdot 10^{-6}$	Pb	$- 1,4 \cdot 10^{-6}$
Ge	$- 1,5 \cdot 10^{-6}$	Al ₂ O ₃	$- 3,5 \cdot 10^{-6}$

2. Paramagnétisme

Le paramagnétisme est caractérisé par une susceptibilité relative positive, de faible amplitude, c'est à dire comprise entre 10^{-6} et 10^{-3} . Il se rencontre dans les substances dont les atomes possèdent un moment magnétique propre. Lorsque les atomes et ions de ces substances ne sont pas soumis à un champ magnétique \vec{H} , leur moment magnétique sont orienté au hasard et donc ils ne produisent pas de magnétisation macroscopiquement observable. Par contre, si on les soumet à un champ magnétique \vec{H} , les moments magnétiques vont s'orienter dans le sens de \vec{H} faisant ainsi apparaître un moment magnétique macroscopique \vec{M} non nul.

Mais ce moment magnétique macroscopique disparaît avec le champ magnétique et ceci à cause de l'agitation thermique du milieu qui brise l'orientation préférentielle qu'avaient

pris les moments magnétiques propres. Cet effet, ce phénomène dépend donc de la température et il suit la loi de Curie $\chi = C/T$, est appelé paramagnétisme.

3. Ferromagnétisme

Les matériaux ferromagnétiques (par ex. fer, cobalt, nickel) ont une susceptibilité magnétique χ_m positive et grande, et ces matériaux ont tous une sous-couche 3d ou 4d incomplète. Le ferromagnétisme est le type de magnétisme résultant de l'alignement de moments magnétiques propre, ces moments magnétiques qui sont orientés localement dans une même direction par une interaction mutuelle appelée *couplage ferromagnétique*.

Les matériaux ferromagnétiques présentent donc également une polarisation spontanée.

L'aimantation diminue quand la température augmente. Au-dessus de la température de Curie $T_c = 768 \text{ °C}$, le fer devient paramagnétique.

4. Antiferromagnétisme :

L'antiferromagnétisme se distingue par une variation de la susceptibilité en fonction de la température d'une allure très particulière. Ce type de matériau ne présente pas de magnétisme car les spins des électrons des atomes voisins sont opposés.

Comme dans les matériaux paramagnétiques, les atomes portent un moment magnétique permanent, toutefois ces moments ne sont plus indépendants les uns des autres mais au contraire fortement liés. De cette interaction, qui porte le nom de *couplage antiferromagnétique*, résulte un arrangement antiparallèle des moments.

Lorsque la température augmente, cet arrangement se dégrade. La diminution concomitante de l'effet de forces d'alignement rend plus sensible l'action d'un champ extérieur. Cela explique la décroissance de $1/\chi_r$ en fonction de la température, jusqu'à une température O_N appelée température de Neel, à laquelle le couplage antiferromagnétique disparaît.

Au-delà de O_N , le comportement des matériaux antiferromagnétiques devient comparable à celui des matériaux paramagnétiques.

5. Ferrimagnétisme

Le ferrimagnétisme est le magnétisme d'une classe d'oxydes appelés ferrites. Dans la structure cristalline de ces matériaux, on peut distinguer deux familles de sites A et B, occupés par des ions possédant des moments magnétiques m_A et m_B respectivement.

Le nombre de sites A diffère du nombre de sites B et le plus souvent m_A diffère de m_B . Le fort couplage antiferromagnétique existant entre les sites A et B provoque donc une polarisation spontanée I_s , c'est-à-dire, une polarisation existant *en l'absence d'un champ magnétique appliqué* (fig).

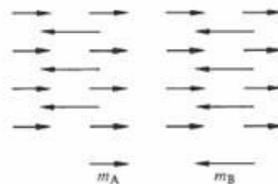


Fig.

Cette polarisation spontanée varie en fonction de la température. L'agitation thermique croissant avec la température a tendance à redistribuer aléatoirement m_A et m_B . Il en résulte une diminution de I_s , qui s'annule pour la température de Curie.

IV. LE DIAGRAMME B-H

Le diagramme $B-H$, appelé aussi courbe d'aimantation ou cycle d'hystérésis est la courbe de réponse de matériaux magnétiques. La relation $B-H$ n'est pas linéaire puisque la perméabilité μ dépend de H , d'où la nécessité d'une représentation de la fonction $B(H)$. La

forme du diagramme $B-H$ dépend de la mobilité des parois de Bloch, de l'énergie interne du matériau et du champ H appliqué.

VI.1. Processus de polarisation et diagramme $B-H$

Soit un monocristal de fer, pratiquement sans défauts, dans lequel les domaines magnétiques se présentent tels qu'à la figure suivante (a).

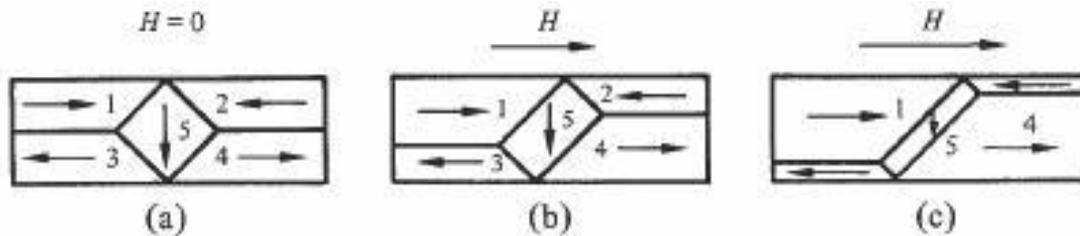


Fig. 3.68

Dès qu'on applique un champ H croissant comme indiqué, l'énergie des moments magnétiques est augmentée dans les domaines 2, 3, et 5 pour créer un seul domaine orienté selon H subsistera, et cela provoque un déplacement des parois de Bloch. En coupant H , on se retrouve donc à l'état initial (a), le processus de polarisation est réversible.

La forme du diagramme $B-H$ peut varier en fonction des conditions d'utilisation et plus particulièrement en fonction de l'amplitude du champ magnétique.

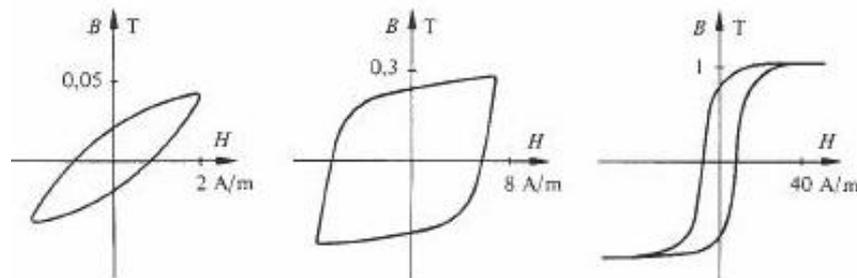


Fig. Effets de l'amplitude du champ sur le diagramme $B-H$ d'un alliage fer-nickel.

La fonction $B(H)$ observée à champ croissant sur un échantillon n'ayant jamais été polarisé (à l'échelle macroscopique) porte le nom de *courbe de première aimantation*. À champ décroissant, la fonction $B(H)$ s'écarte de la courbe de première aimantation, en raison du caractère irréversible de la polarisation. En régime périodique, la fonction $B(H)$ prend la forme d'un cycle d'hystérésis. Seule la température (au-dessus du point de Curie) permet de décrire une nouvelle fois la courbe de première aimantation.

Schématiquement, le diagramme $B-H$ se divise en trois zones:

- la *zone des champs faibles* (tab. 3.69 (b)) caractérisée par un comportement quasi linéaire de la matière, ainsi que des perméabilités modérées;
- la *zone des champs moyens* (tab. 3.69 (c), (d), (e)) dans laquelle les effets non linéaires s'accroissent fortement, tandis que la perméabilité passe par sa valeur maximum ;
- la *zone des champs forts* (tab. 3.69 (f)) ou *zone de saturation* où la perméabilité décroît et tend asymptotiquement vers la perméabilité du vide.

IV.2. Induction rémanente : Soit un échantillon polarisé à saturation, c'est-à-dire soumis à un champ magnétique H supérieur à H_{sat} . On appelle *induction rémanente* B_r , l'induction qui subsiste dans l'échantillon après qu'on ait fait décroître H jusqu'à zéro.

V. Pertes magnétiques.

Toute variation d'induction dans une matière magnétique provoque, à l'intérieur de celle-ci, une dissipation d'énergie. Cette énergie apparaît le plus souvent sous forme de chaleur et n'est généralement pas récupérable, d'où l'expression *pertes magnétiques* utilisée pour désigner le phénomène. On distingue trois types de pertes magnétiques

✓ les pertes par hystérésis :

Les *pertes par hystérésis* sont dues au travail des forces de freinage agissant sur les parois de Bloch en mouvement. Elles sont donc maximum quand les forces d'épinglage sont les plus grandes, c'est-à-dire dans les matériaux magnétiques durs. Les pertes par hystérésis correspondent au travail nécessaire pour parcourir lentement le diagramme $B-H$.

• les pertes par courant de Foucault :

On appelle perte par courant de Foucault, les pertes par effet Joules résultant des courants créés dans toute matière conductrice (magnétique ou non), par un flux variable dans le temps. Ces pertes peuvent être importantes dans les matériaux de faible résistivité électrique comme les alliages magnétiques, elles restent à un bas niveau dans les ferrites.

✓ les pertes résiduelles ou pertes par traînage :

Les *pertes par traînage* sont dues au retard de l'induction par rapport au champ, décrit à la figure suivante.

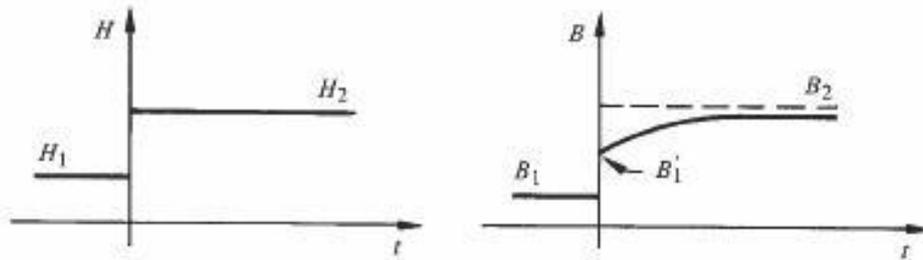


Fig.

Lorsque le champ H varie brusquement de H_1 à H_2 , l'induction suit immédiatement de B_1 à B_1' puis tend asymptotiquement vers la valeur de B_2 correspondant à H_2 .

VI. 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 : $f = 50$ Hz
- les alliages fer nickel ou cobalt --> moyennes fréquences : $f < 100$ kHz
- les ferrites (oxydes de fer) --> hautes fréquences : $f < 1000$ kHz

i. 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.** $C_{FER} \approx 5$ 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 kW).
- **les tôles à grains orientés.** $C_{FER} \approx 1$ 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 MW).

ii. 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 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)

iii. 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 ($X.Fe_{12}O_{19}$ -- $X = Mn$ ou Ni, Zn)

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

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×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 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
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 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. 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=1,5 T f=50 Hz ép. ²⁷ / ₁₀₀ : 0,89 ép. ³⁵ / ₁₀₀ : 1,11		
Variable f > 60 Hz	Rechercher une perméabilité importante aux hautes fréquences avec de faibles pertes par courant de Foucault et hystérésis	Ferrites MF ₂ O ₃	0,4	? à ?	7000	Isolant : 10 ¹⁶	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
		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

VII. Matériaux magnétiques durs

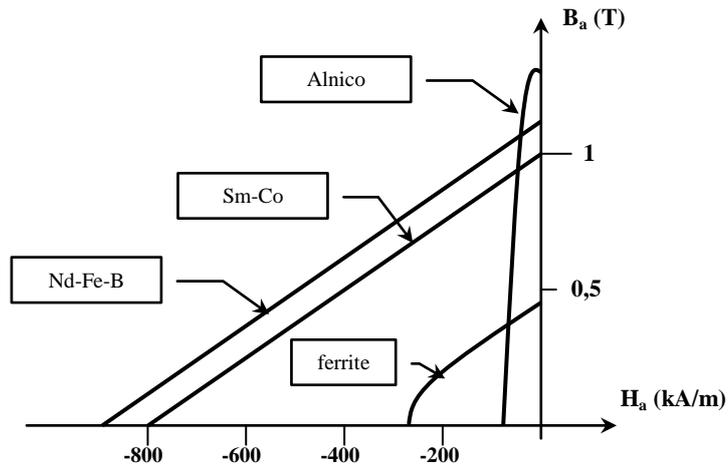
Ces matériaux sont utilisés pour la réalisation d'aimants permanents. Ils possèdent une induction rémanente importante et un champ coercitif élevé.

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

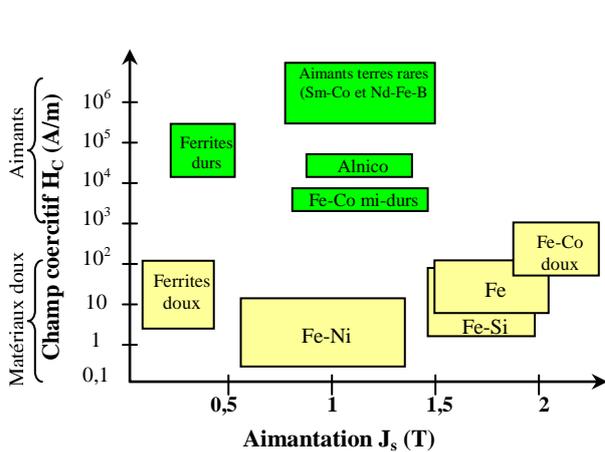
Ils sont souvent associés à du fer doux qui canalise les lignes d'induction et sont aimantés lors du procédé de fabrication.

On distingue essentiellement, aujourd'hui :

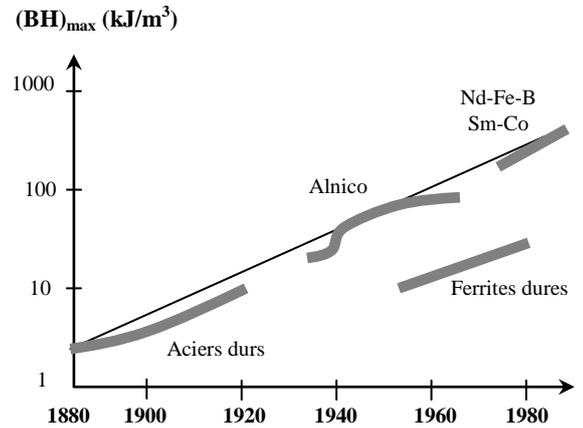
- les *ferrites dures* --> moins cher et le plus utilisé
- les *alliages à base de terres rares* --> très performants et en expansion
- les « *alnico* » (alliages fer + Al Ni Co) --> en perte de vitesse



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



Comparaison matériaux doux /durs



Evolution historique des aimants

i. 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.

ii. 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 μ).

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 (idem alnico). De plus, les céramiques obtenues sont très dures et cassantes ce qui interdit l'usinage des produits finis.

iii. 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/m³ (50 kJ/m³ 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.

iv. 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

GUIDE DE CHOIX DES MATÉRIAUX DURS
propriétés

		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 Répulsion, aimants minces Accouplements
	Nd-Fe-B	1,3	950	360	310	1 900 1 500	

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