

MATERIAUX EN ELECTROTECHNIQUE

IUFM AIX-MARSEILLE
CAPET et PLP2 Electrotechnique

Michel STOLIDI

TABLES DES MATIERES

1.	INTRODUCTION.....	3
1.1.	Classification.....	3
1.2.	Productions.....	4
2.	MATERIAUX CONDUCTEURS.....	7
2.1.	Echelle des résistivités.....	7
2.2.	Lexique	7
2.3.	Propriétés physiques	7
2.4.	Bobinages de machines et câbles électriques.....	8
2.5.	Amélioration des contacts électriques	8
2.6.	Câblage et soudure	8
2.7.	Contacts glissants	8
2.8.	Résistances bobinées.....	8
2.9.	Lampes à incandescence.....	8
2.10.	Lampes à décharges.....	8
2.11.	Sondes de température.....	8
3.	MATERIAUX ISOLANTS.....	11
3.1.	Echelle des résistivités.....	11
3.2.	Lexique	11
3.3.	Propriétés physiques	12
3.4.	Classification.....	12
3.5.	Bobinages de machines.....	12
3.6.	Câbles électriques.....	13
3.7.	Condensateurs.....	13
3.8.	Isolateurs.....	14
3.9.	Appareillages haute tension	14
4.	MATERIAUX MAGNETIQUES.....	18
4.1.	Rappels.....	18
4.2.	Matériaux magnétiques doux.....	21
4.3.	Matériaux magnétiques durs	23
5.	BIBLIOGRAPHIE.....	26

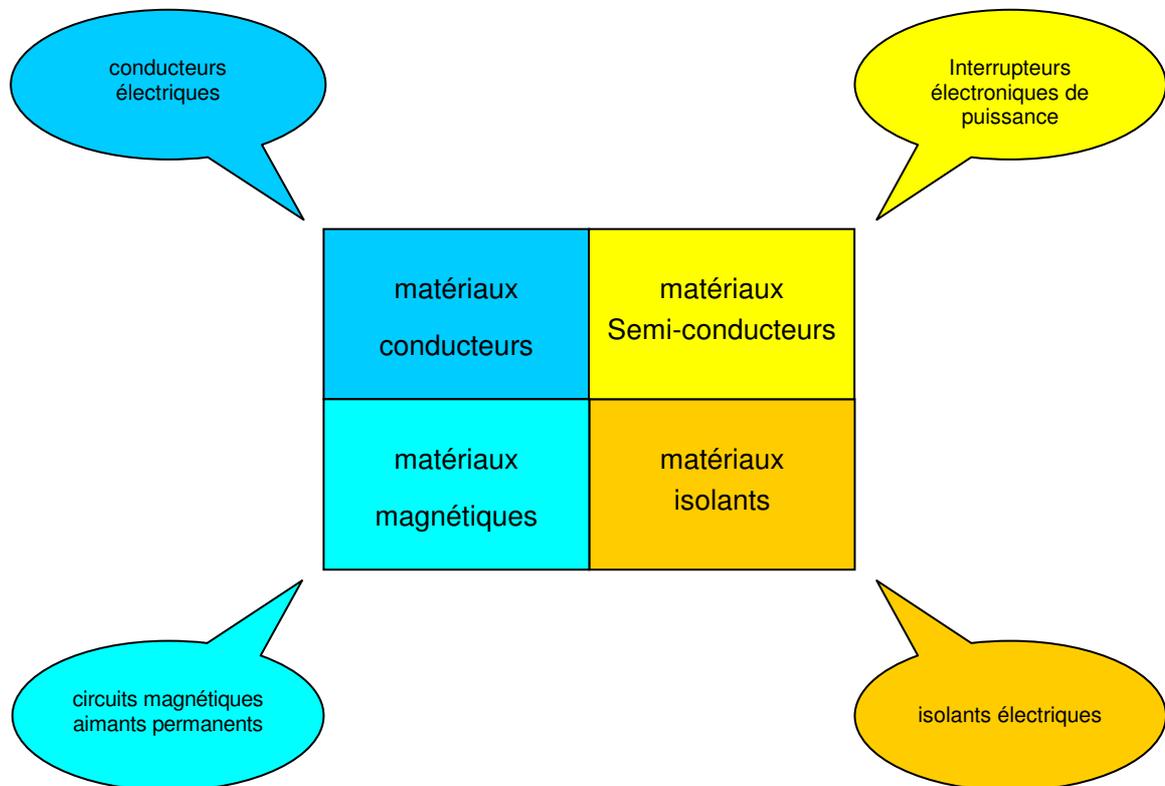
1. INTRODUCTION

Les machines électriques, connues depuis le siècle dernier, ainsi que l'ensemble du matériel électrique évoluent vers une plus grande compacité, grâce à l'amélioration des matériaux qui les constituent.

1.1. Classification

Ces matériaux peuvent être classés en quatre groupes selon leur fonction :

- les matériaux conducteurs pour véhiculer le courant électrique.
- les matériaux isolants pour isoler les conducteurs électriques.
- les matériaux magnétiques pour créer ou canaliser l'induction magnétique.
- les matériaux semi-conducteurs pour la fabrication des interrupteurs électroniques de puissance.



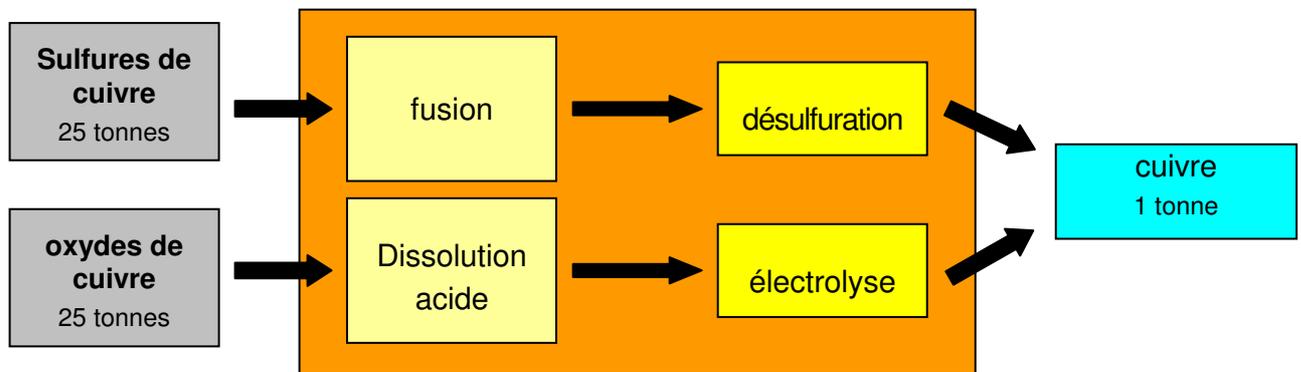
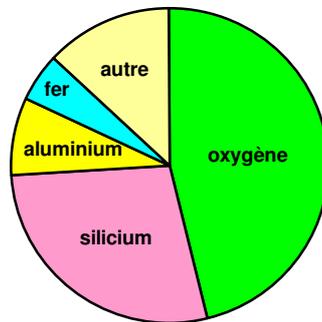
Le choix de ces matériaux dépend, en premier lieu de leurs propriétés électriques (résistivité, perméabilité, constante diélectrique...) et de leur coût, mais aussi de leurs propriétés physiques et mécaniques (densité, dilatation, point de fusion, sensibilité à la corrosion, dureté, élasticité...).

Les éléments principaux de ces matériaux sont :

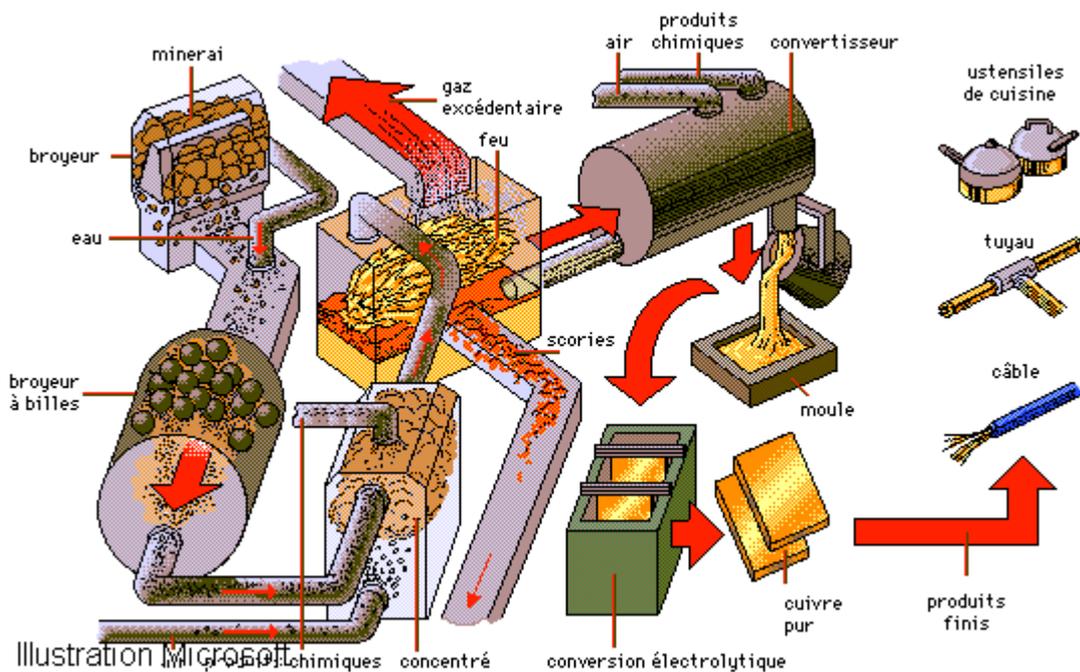
- le cuivre et l'aluminium pour les conducteurs électriques.
- le fer pour les circuits magnétiques.
- le silicium pour les composants d'électronique de puissance.
- la silice (oxyde de silicium), le bois et les dérivés du pétrole pour les isolants électriques.

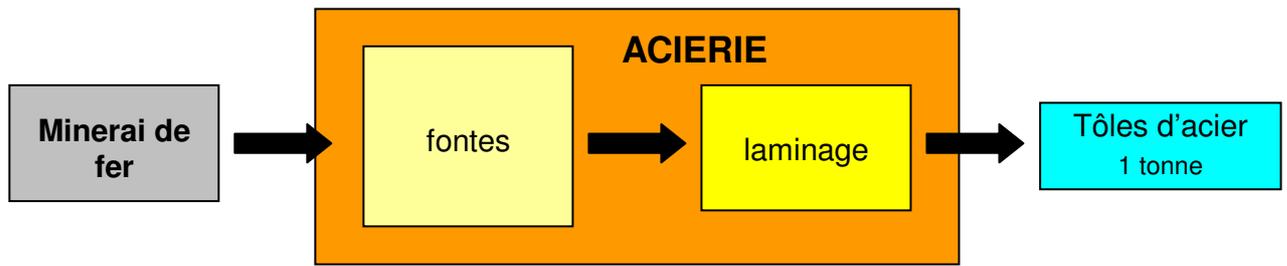
1.2. Productions

La plupart de ces éléments se trouvent en abondance sur la terre :



----- Fabrication du cuivre -----





----- Fabrication du fer -----

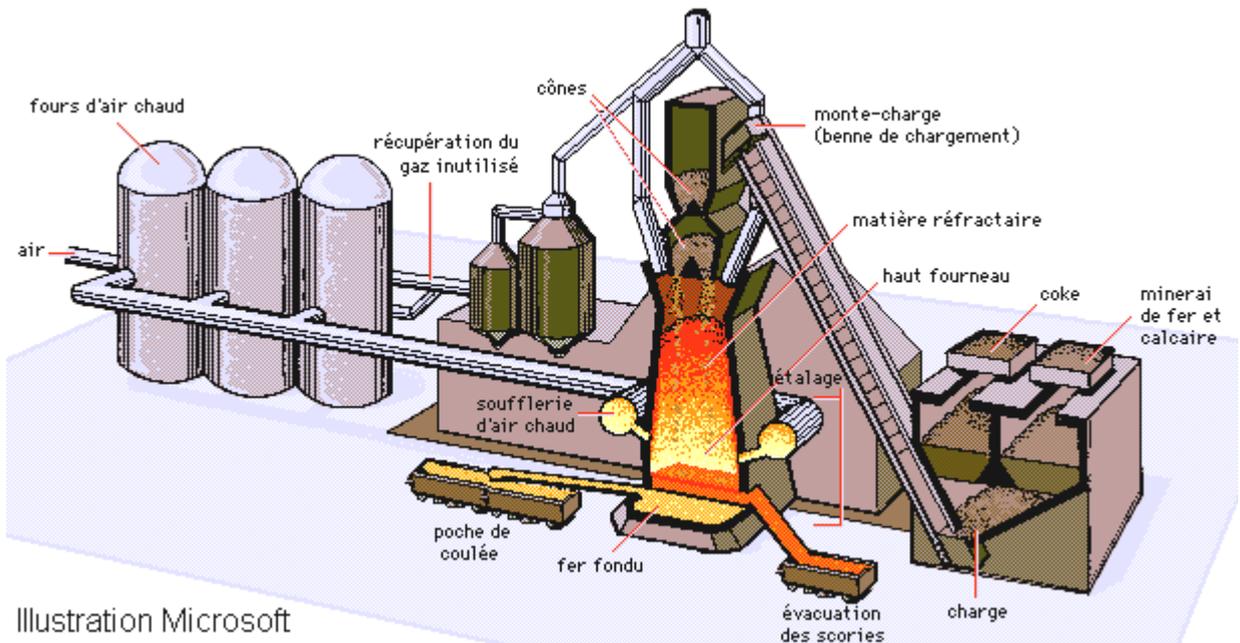


Illustration Microsoft

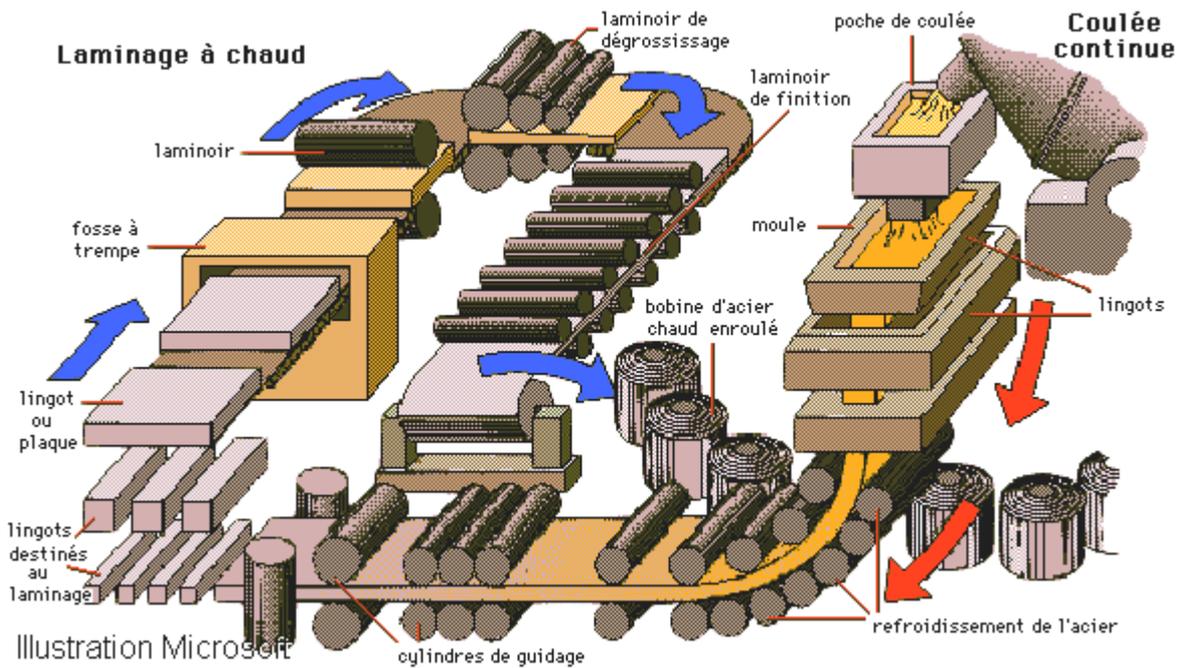
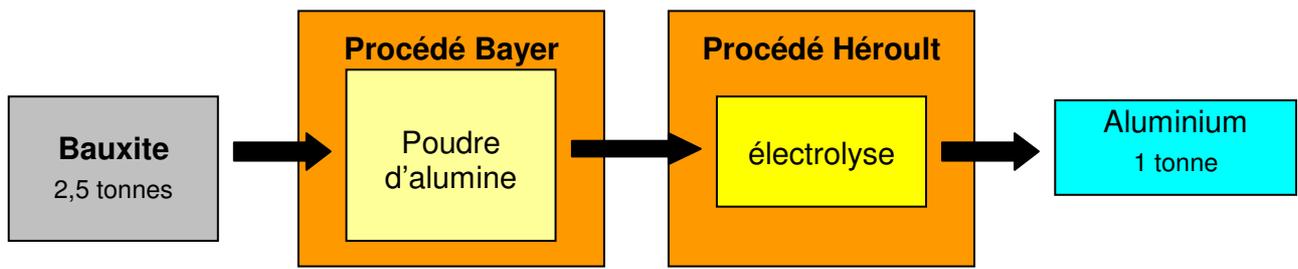
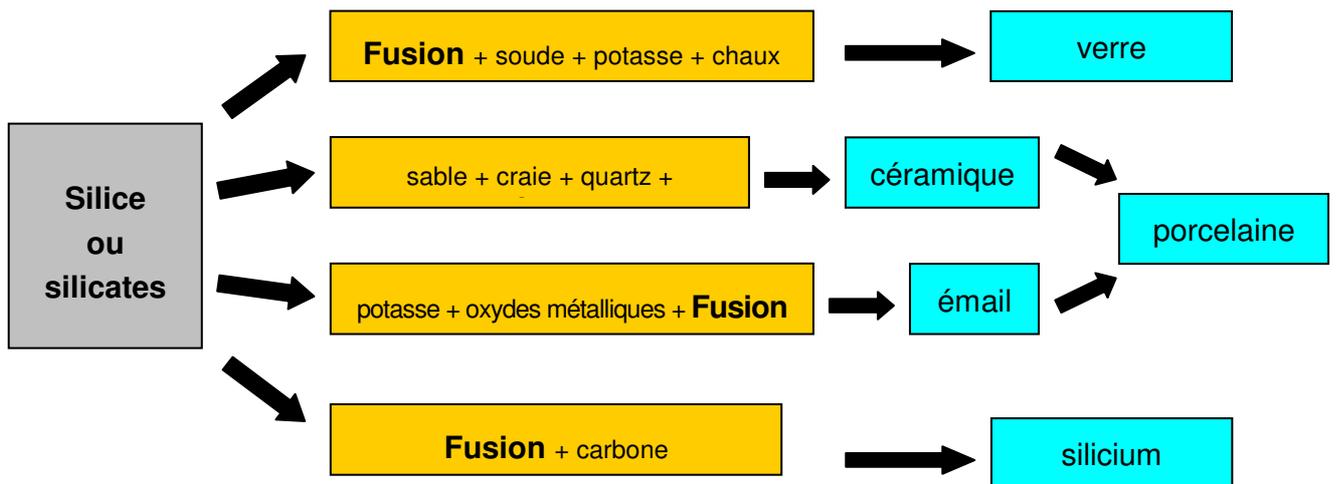


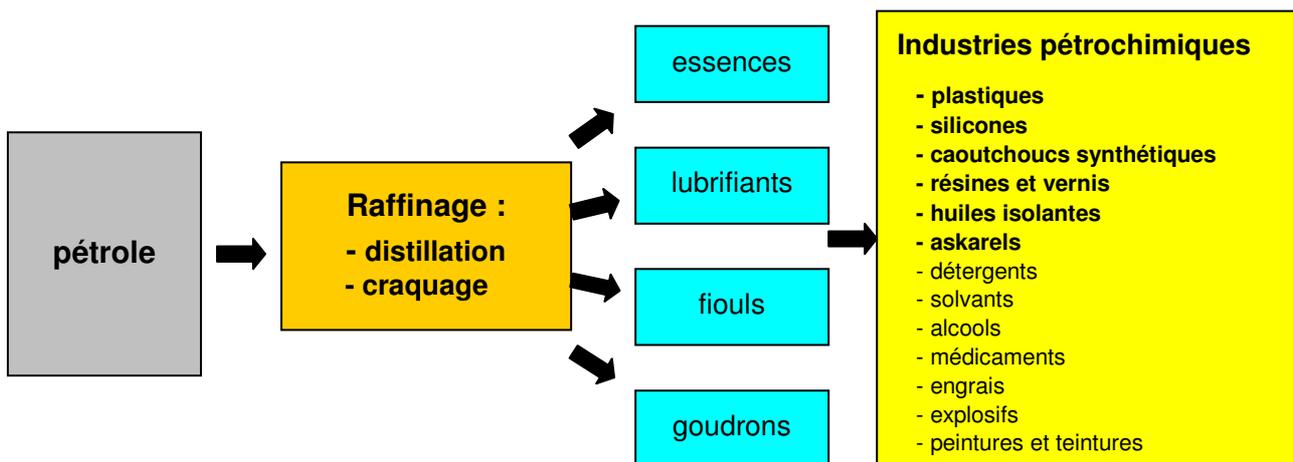
Illustration Microsoft



----- Fabrication de l'aluminium -----



----- Fabrication des isolants minéraux -----

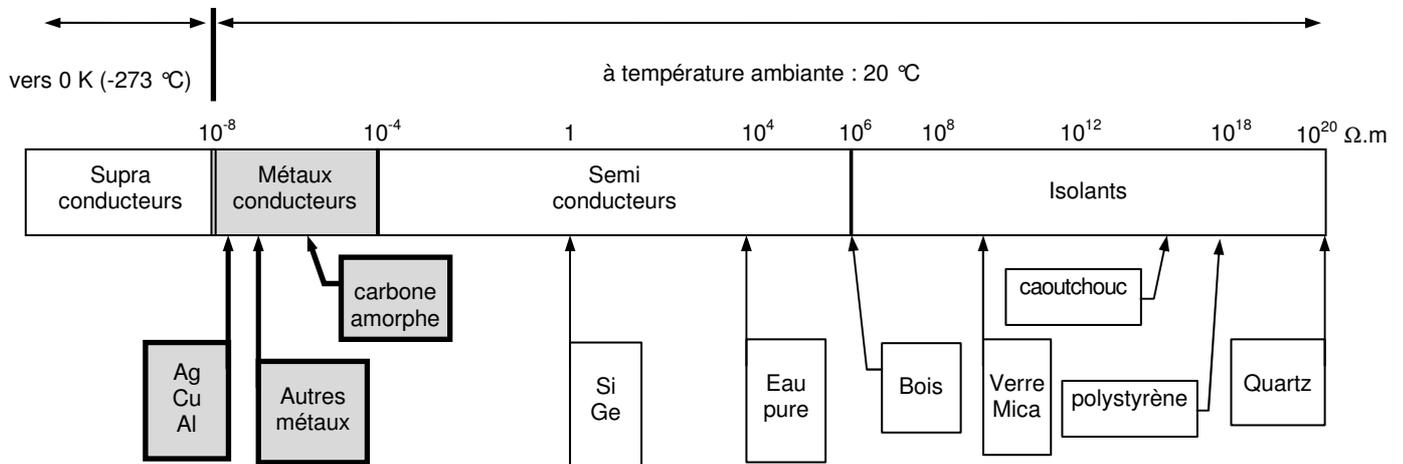


----- Fabrication des isolants organiques -----

2. MATERIAUX CONDUCTEURS

2.1. Echelle des résistivités

Les matériaux supraconducteurs sont des conducteurs qui, en dessous d'une certaine température critique (-148 °C pour la plus élevée connue actuellement), ne présentent plus aucune résistance au passage du courant (résistivité électrique nulle).



2.2. Lexique

METAUX USUELS (éléments de transition)						NON METAUX	
Al	Aluminium	Sn	étain	Au	Or	C	Carbone
Ag	Argent	Fe	fer	Pt	platine	Ge	germanium
Cr	Chrome	Hg	mercure	Pb	plomb	O	Oxygène
Co	Cobalt	Mo	molybdène	W	tungstène	P	phosphore
Cu	Cuivre	Ni	nickel	Zn	zinc	Si	silicium

Fontes : fer (92 %) + 2 à 5 % de carbone + impuretés

Aciers : fer (97 % min) + 0,05 à 1,5 % de C + traitements thermiques

bronzes : Cu + ≈ 10 % de Sn

Laitons : Cu + ≈ 50 % de Zinc

Constantan : Cu + Ni

2.3. Propriétés physiques

Les conducteurs électriques sont essentiellement des métaux ou des alliages métalliques. Ils possèdent tous à peu près les caractéristiques suivantes :

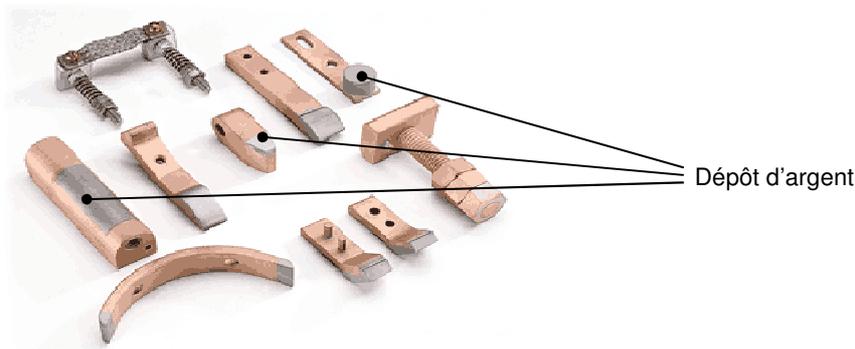
- faible résistivité électrique : < 10⁻⁶ Ωm (≈ 1 million de milliard fois plus pour les isolants)
- bonne conductivité thermique : ≈ 100 W/(m °C) (≈ 500 fois moins pour les isolants)
- solide de grande dureté sauf pour le mercure (liquide), le sodium et le plomb
- densité élevée : ≈ 10 sauf pour **Al** : 2,6 et **Au, Pt et W** : ≈ 20
- influence importante de la température sur :
 - . la résistivité : **40 % en plus** pour 100 °C d'élévation
 - . la dilatation linéique : **qq. mm/m** pour 100 °C d'élévation
- influence importante de la fréquence sur la résistivité : **effet de peau** : en alternatif, le courant n'utilise pas la totalité de la section du conducteur mais a tendance à circuler sur sa périphérie. Ce phénomène se traduit par l'augmentation de la résistance du conducteur. C'est la raison pour laquelle on fractionne le câble en plusieurs brins (fil de Litz en HF).

2.4. Bobinages de machines et câbles électriques

Les moins résistifs et les plus économiques sont le **cuivre et l'aluminium**. Ce dernier, étant quasiment 2 fois plus résistif mais 3 fois plus léger, est utilisé pour les lignes de transport haute tension.

2.5. Amélioration des contacts électriques

Le platine, l'or et surtout l'argent, qui ont une très bonne résistivité, et qui sont difficilement altérable (par choc, par corrosion ou par arc électrique) sont déposés en surface du cuivre ou de l'aluminium pour améliorer les résistances de contact et la durée de vie des fusibles, des bras de sectionneur HT, des contacteurs...



2.6. Câblage et soudure

L'étain et le plomb, grâce à leur faible température de fusion sont utilisés pour le câblage des circuits imprimés.

En micro-électronique, on utilise l'argent pour braser les « puces », et l'or ou l'aluminium pour effectuer le câblage par fils de très faible diamètre (bondings de 10 à 500 μ).

2.7. Contacts glissants

Le carbone amorphe (« charbon ») entre dans la constitution des balais de machines à courant continu et de machines synchrones ou asynchrones. Malgré sa résistivité médiocre, il n'altère pas les bagues ou collecteurs tournants et présentent une bonne résistance de contact.

Le bronze est utilisé dans les contacts avec les caténaies.

2.8. Résistances bobinées

Il faut une résistivité plus élevée que pour les câbles ($\approx 100 \cdot 10^{-8}$). On les atteint avec des alliages :

- Fe Cu Ni (maillechort)
- Ni Cr
- Fe Ni Cr
- Fe Cr Al

2.9. Lampes à incandescence

Le tungstène, grâce à sa température de fusion élevée (3400 °C), constitue le filament des lampes à incandescence.

2.10. Lampes à décharges

Le mercure et le sodium, sous forme de vapeur, émettent un rayonnement lumineux.

2.11. Sondes de température

thermocouple : plages de [-185 °C , 300 °C] à [20 °C , 2300 °C] : la jonction de 2 métaux différents (fer, cuivre, platine...) génère une tension fonction de la température.

thermorésistance : plages de [0 °C , 200 °C] à [600 °C , 850 °C] : le plus souvent en fil de platine (sonde PT 100). La résistance, parcourue par un courant connu, génère une tension fonction de la température.

CARATERISTIQUES DES METAUX CONDUCTEURS

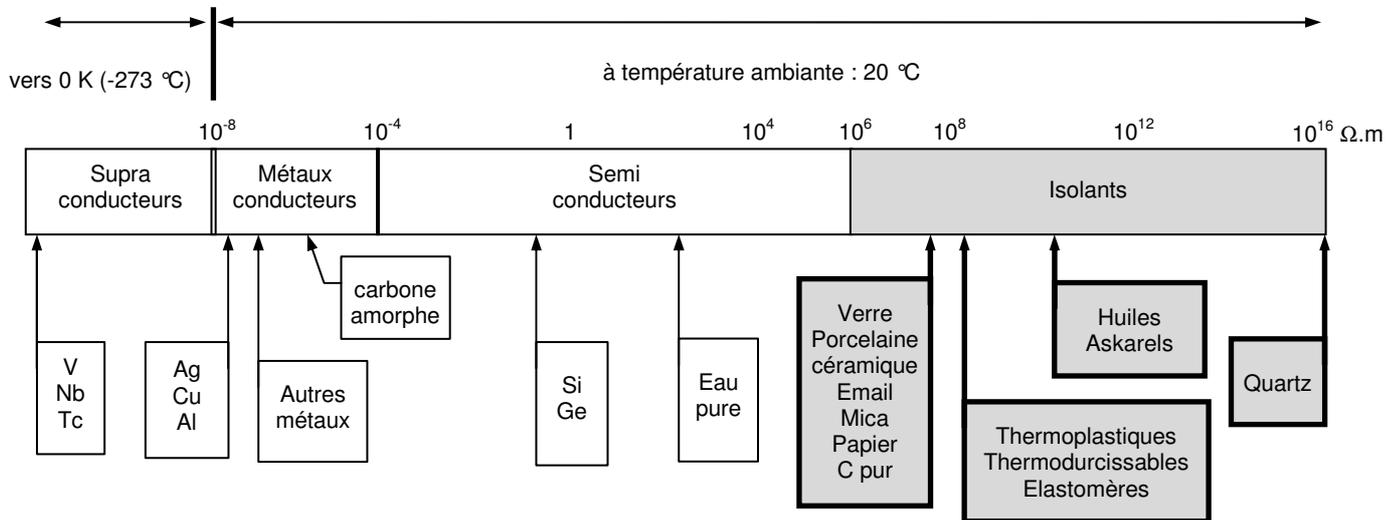
Désignation et composition	Masse volumique (Kg /m ³)	Température de fusion (°C)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Coefficient dilatation thermique (10 ⁻⁶ /°C)	Résistivité à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	Coefficient de température (10 ⁻⁴ /°C)	Résistance à la rupture (N/mm ²)	Allongement (%)	Dureté (H.B.)	Propriétés et emploi
Argent -- Ag	10,5	960	408	20	1,6	38	157		55	Excellentes propriétés électriques. Grande résistance à l'oxydation. Allié au Cd, Ni : contacts électriques. Fusibles. Élément d'alliage du cuivre et du tungstène.
Cuivre -- Cu	8,9	1085	400	17	1,7	39	25 à 30	10 à 40	50 à 90	bon conducteur. Ductile, malléable (laminage, filage, emboutissage, pliage...). Pur ou faiblement allié : fils, câbles, barres, lames collecteur, caténares, bagues de moteurs, appareillages en alliages... alliages : laitons, bronzes, maillechort, constantan
Or -- Au	19,3	1064		19	2,1	30			36	Métal rare. Inaltérable et inoxydable Câblage microélectronique. Contacts.
Aluminium -- Al	2,7	660	222	23	2,8	43	80 à 170	1 à 45	15 à 45	Très léger. Protégé par la faible couche d'alumine qui se forme à sa surface. Très malléable (moulage, laminage, filage, emboutissage, pliage, usinage...). Câbles, câbles aériens, barres, cages de moteur
Sodium -- Na	1	98	134	71	4,2					Très mou, léger. Très réactif avec l'eau. Fluide caloporteur. Lampes à décharge
Rhodium -- Rh	12,4	1960	88	8	4,5					Très rare (3 tonnes/an). Inaltérable et difficile à travailler. Thermocouple. Contacts électriques.
Tungstène -- W	19,1	3410	201	4	5,5	48	900		34 0	Très dur. Grande résistance à température très élevée. Filaments de lampes à incandescence. Contacts électriques (alliés avec Cu et à Al).
Zinc -- Zn	7,1	420	113	29	5,9	42				Malléable à chaud (150 °C). Protégé par la faible couche d'oxyde qui se forme à sa surface. Revêtement anti-corrosion. Allié au cuivre dans les laitons.
Cadmium -- Cd	8,7	320	92	7	6,8	38	50			Bonne résistance à la corrosion. Toxique. Batterie nickel-cadmium
Nickel -- Ni	8,9	1455	92	13	6,8	47			15 5	Bonne dureté. Inoxydable. Allié au fer (matériaux magnétiques, acier inoxydable). Batterie nickel-cadmium. Thermocouples. Résistances.
Fer -- Fe	7,9	1540	75	12	9,7	55				Facilement oxydable, magnétique. Grand nombre d'alliages :, maillechort, constantan, aciers. Matériau magnétique. Résistances.
Platine -- Pt	21,5	1773	71	89	10	48	180		70	Très Bonne résistance à la corrosion et à l'arc électrique. Grande dureté. Contacts. Electrodes. Thermocouple. Thermorésistance
Etain -- Sn	7,3	232	27		11,5	43	80			Faible température de fusion. Allié au cuivre dans les laitons et au plomb pour les soudures électriques.
Plomb -- Pb	11,3	327	35	29	21	42	50			Mou, ductile et malléable. Bonne résistance à la corrosion. Toxique. Batteries. Soudures électriques. Armure de câbles électriques.
Mercure -- Hg	13,6	-39			96	9	xxx	xx	xx	Liquide à température ambiante. Toxique. Contacts électriques. Tubes fluorescents. Lampes à vapeur de mercure.

CARATERISTIQUES DES ALLIAGES METALLIQUES CONDUCTEURS

Désignation et composition	Masse volumique (Kg /m ³)	Température de fusion (°C)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Coefficient dilatation thermique (10 ⁻⁶ /°C)	Résistivité à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	Coefficient de température (10 ⁻⁴ /°C)	Résistance à la rupture (N/mm ²)	Allongement (%)	Dureté (H.B.)	Propriétés et emploi
Laitons Cu+15 à 40%Zn	≈ 8	≈ 940		18	6,5	10	300 à 600	10 à 45	50 à 80	résistance à l'oxydation. Emboutissage. Usinage. Petites pièces de matériels électriques. Cosses, douilles, culots, raccords..
Bronzes Cu+10% Sn+Zn Cu+10% Al+Zn	≈ 9	900		17	12 à 15	5	200 à 240	5 à 20	60 à 70	Moulage. Pièces moulées, pièces frottantes. collecteur, caténares, portes balais
Constantan Cu+45% Ni		1240			49	0	320	6		Résistivité indépendante de la température. Thermocouples. Appareils de mesure.
maillechort Cu+25% Ni+25%Zn	8,5	1000		23	30 à 50	2,5	520	1 à 45	140	Malléable, ductile, inaltérable. Usinable, résistant à la rupture. Résistivité importante résistances, ressorts conducteurs

3. MATERIAUX ISOLANTS

3.1. Echelle des résistivités



3.2. Lexique

Diamant : cristal de carbone pur

Silice : nom commun de l'oxyde de silicium. Dissous dans l'eau, on obtient de l'acide silicique qui donne des sels métalliques ou non appelés **silicates**. Silice et silicates sont très répandus dans la nature (27 % de la croûte terrestre) sous forme de roches et d'argiles.

Quartz : cristal de Silice pure SiO₂

Silicone : matière plastique mais avec du silicium à la place du carbone

Mica : Silicate aluminopotassique

Micanite : Aggloméré de mica et de gomme-laque

Verre : solide amorphe obtenu par fusion à base de silicates et de silice additionnée de potasse, de soude, de chaux et d'éléments divers.

Email : enduit vitreux (à base de silice, de potasse et d'oxydes métalliques) appliqué à froid sur verre ou métal et fixé après fusion.

Céramique : nom commun donné au mélange d'argiles (silicate d'aluminium) plus ou moins pures avec d'autres substances (sable, craie, quartz...) façonnée puis durcie par cuisson au four. Les produits obtenus vont de la poterie grossière à la porcelaine.

Huile minérale : par opposition à huile végétale ; en fait, il vaudrait mieux dire huile organique. produit visqueux organique, extrait du pétrole ou synthétisée. Certaines ont des qualités isolantes.

Huile silicone : idem huile minérale avec du silicium à la place du carbone.

Askarels : liquides organiques chlorés (PCB, PCT), aux bonnes qualités isolantes.

Elastomères : haut polymère possédant de bonnes qualités élastiques.

Plastiques : colloïde à très grosses molécules malléables à chaud et durcissant à froid (**thermoplastique, thermodurcissables**).

3.3. Propriétés physiques

Les isolants électriques possèdent tous à peu près les caractéristiques suivantes :

- **mauvaise tenue en température <200 °C en général** (sauf pour l'amiante, le verre et le mica)
- **rigidité électrique élevée** : $\approx 10 \text{ kV/mm}$
- **très forte résistivité électrique** : $> 10^6 \Omega\text{m}$
- **constante diélectrique relative $\epsilon_R > 1$ (≈ 2 à 8)**
- **mauvaise conductivité thermique** : isolant thermique
- Solide, liquide ou gaz
- densité voisine de 1

3.4. Classification

Plusieurs méthodes peuvent être adoptées pour classer les isolants :

@ classification en fonction de la tenue en température (voir tableau page13) :

La norme **NFC 51-111** définit des classes d'isolant selon leur tenue en température, qui dépend de la matière isolante, mais aussi des matières d'agglomération et d'imprégnation.

@ classification en fonction de l'état physique (voir tableau page14 et 15) :

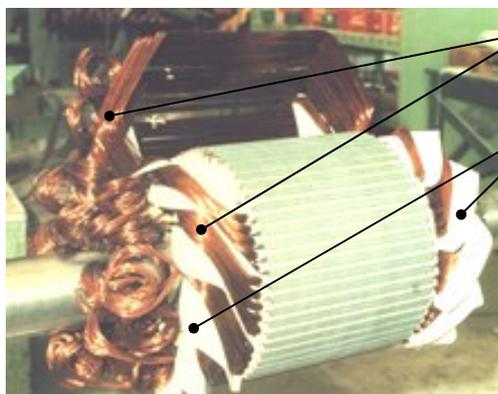
- **solide** : mica, bois, céramiques, plastiques ...
- **liquide** : huiles, pyralène, vernis...
- **gaz** : air sec, azote, SF6...

@ classification en fonction de l'origine (voir tableau page14 et 15) :

- minérale : mica, porcelaine, verre, amiante,...
- organique : bois, papier, coton, soie, caoutchouc (latex),...
- synthétique : plastiques (thermoplastiques ou thermodurcissables), silicones :
 - . silicones : molécules dont les atomes de carbone ont été remplacés par du silicium.
 - . thermoplastiques: plastiques ramollis à chaud (il peut alors être moulé, formé ou extrudé), et durci à froid. Le processus est réversible.
 - . thermodurcissables: plastiques durcis par un procédé thermique. Le processus est irréversible.

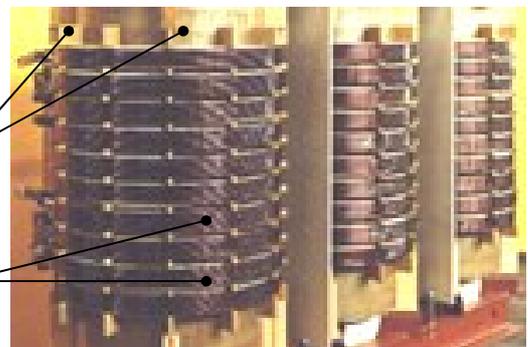
3.5. Bobinages de machines

- **basse tension** : fils conducteurs émaillés
- **haute tension** : barres conductrices isolées par du papier, mica, verre, bakélite, résine (enrobage, imprégnation)



Cuivre émaillé

Isolants



Cales en bakélite

Galette isolée et imprégnée

--- Rotor bobiné de moteur asynchrone ---

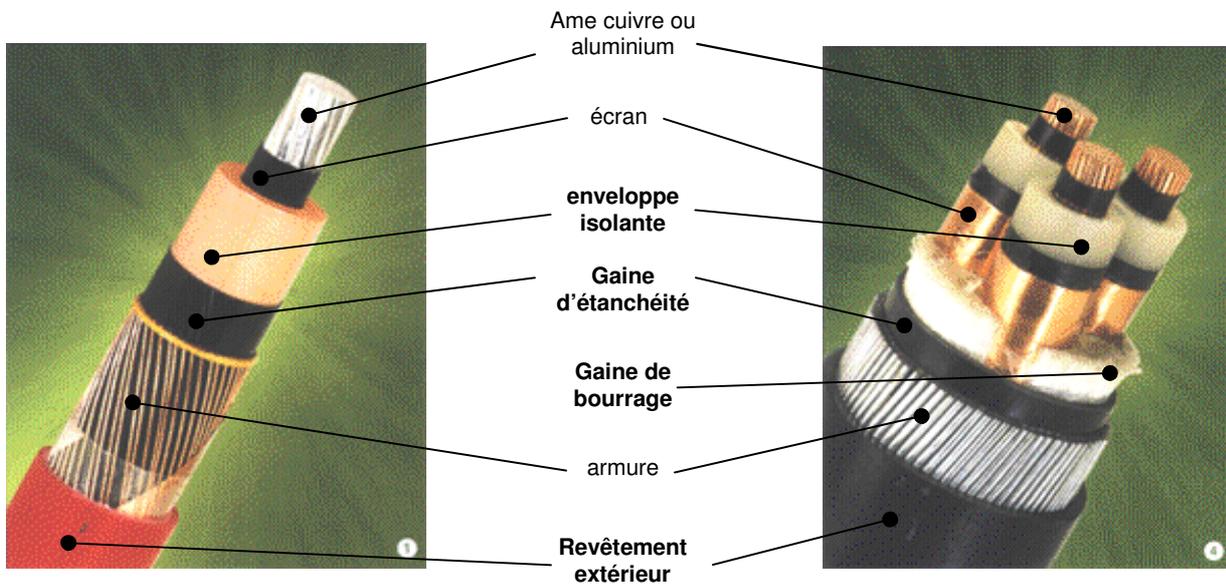
--- Transformateur triphasé ---

3.6. Câbles électriques

Un câble est constitué d'une âme conductrice métallique (Cu ou Al) recouvert d'un isolant, d'un écran et d'un revêtement extérieur, complété si besoin est par une gaine d'étanchéité et par une « armure ».

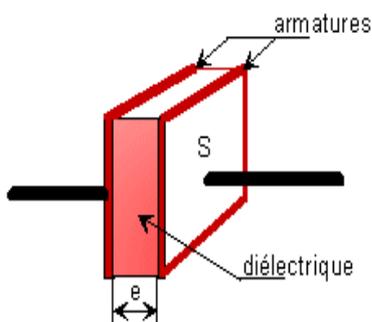
L'enveloppe isolante, mais aussi les gaines et revêtement extérieur sont constitués de matières synthétiques (thermoplastiques et élastomères) :

- PVC : Polychlorure de vinyle
- PE : Polyéthylène
- PR : Polyéthylène réticulé
- EPR : Ethylène-propylène
- caoutchouc silicone



3.7. Condensateurs

Schématiquement, un condensateur est formé d'un diélectrique ($\epsilon_R > 1$) serré entre deux électrodes. Les diélectriques isolants utilisés sont suivant les technologies en céramique, papier, verre, mica ou plastique.



Valeur de la capacité d'un composant capacitif plan

$$C = 9 \cdot 10^{-12} \cdot \epsilon_r \frac{S}{e}$$

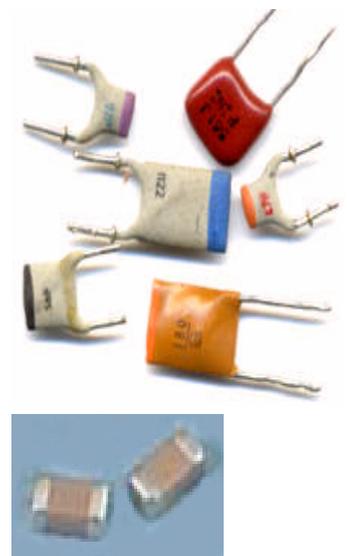
S = surface d'une armature (en m²)

e = distance séparant les armatures (en m) -

ϵ_r = permittivité relative



--- Condensateurs plastiques ---

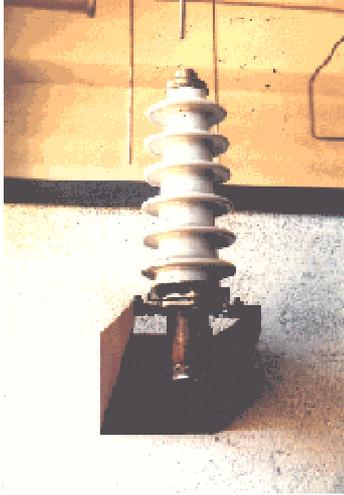


--- Condensateurs céramiques ---

3.8. Isolateurs

Ils sont en verre ou en porcelaine et sont utilisés pour isoler :

- les bornes de sortie des appareillages haute tension (sectionneur, disjoncteur, transformateur, matériel roulant...).
- les câbles haute tension des pylônes de transport d'énergie électrique



---- *isolateur de tramway* ---

Isolateur 225 kV

Isolateur 63 kV

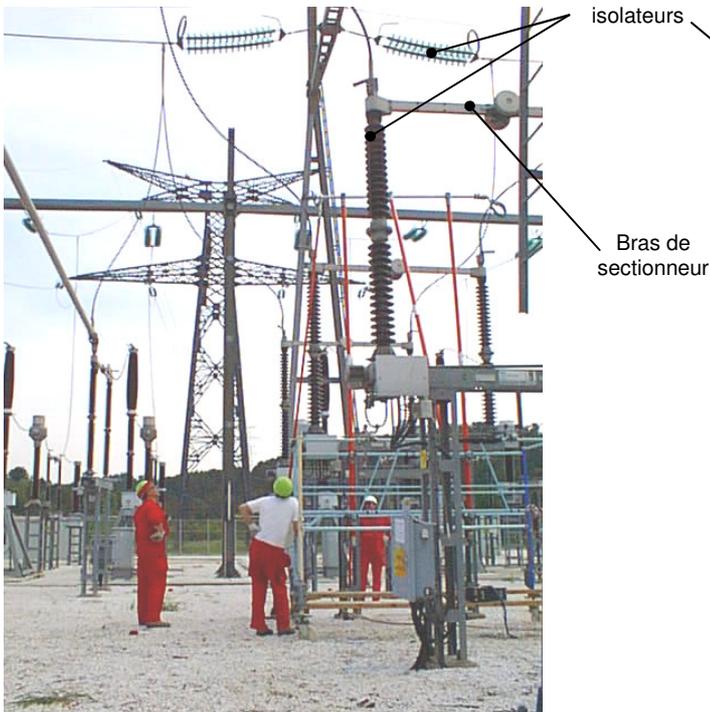


--- *Transformateur 225/63 kV immergé dans l'huile* ---

3.9. Appareillages haute tension

L'isolement interne est renforcé par un isolant supplémentaire :

- **solide** : résine, élastomère (électronique haute tension).
- **Liquide** : huile minérale, askarel (interdit depuis 1986) dans les transformateurs de puissance.
- **gaz** : SF6 dans les disjoncteurs haute tension.



---- *Sectionneur 63 kV* ----



---- *disjoncteur 63 kV au SF6* ----

CLASSIFICATION EN FONCTION DE LA TEMPERATURE :

Classe	Matières Isolantes	Matières d'agglomération	Matières d'imprégnation
Y 90°C max	coton, soie, papier et dérivés, fibre d'acétate, bois, polyéthylène, polystyrène, PVC, Caoutchouc	Pas de matières d'agglomération ou d'imprégnation. Classe peu utilisée.	
A 105°C max	Isolants de classe Y imprégnés par un diélectrique liquide.		Vernis à base de résines naturelles Huiles isolantes Solutions cellulose
	Toile vernie Papier verni	Vernis à base de résines	
	Stratifié bois	Résines phénoliques	
	Emaux aux résines polyamides Résines polyesters Film d'acétate		
E 120°C max	Emaux aux résines polyvinyles Polyuréthane, époxyde		
	Résines moulées avec charge cellulosique Stratifiés coton, papier	Résines mélanines	
	Résines polyesters Film de cellulose ou de polyéthylène		
B 130°C max	Amiante, fibre de verre, émaux aux résines formal, polyvinyle		Asphaltes Résine synthétique avec huile Résines polyesters Résines époxydes
	Tissu de verre imprégnée Amiante imprégnée	Vernis à base de résines synthétiques et d'huile	
	Mica aggloméré	Résines synthétiques époxydes	
	Stratifié ou tissu de fibre de verre Stratifié d'amiante	Résines mélanines	
F 155°C max	Fibre de verre Amiante		polyesters, polyuréthanes
	Tissu de verre imprégnée Amiante imprégnée Mica aggloméré	Résines alkyles, époxydes, Silicone - alkyles	
	Stratifié ou tissu de fibre de verre Stratifié d'amiante		
H 180°C max	Fibre de verre		Résine silicone sélectionnée
	Tissu de fibres de verre et d'amiante imprégnés Elastomère de silicone Fibre de polyamide	Résines et élastomères de silicone	
	Mica aggloméré Stratifié de tissu de verre	Résine silicone sélectionnée	
C > 180°C	Polytetrafluoréthylène (250°C)		Résine silicone stable jusqu'à 225°C
	Mica aggloméré Tissu de verre ou d'amiante traité		
		Mica, porcelaine, céramiques, verre, quartz	

CLASSIFICATION EN FONCTION DE L'ETAT PHYSIQUE

DESIGNATION		Masse volumique	Température max	Résistance à la rupture	Résistivité	Rigidité diélectrique	Constante diélectrique ϵ_r	PROPRIETES	EMPLOIS	
		kg/m ³	°C	N/mm ²	Ωm	kV/mm				
ISOLANTS SOLIDES	Origine minérale	MICA Feuilles minces à l'état naturel	3000	200		10^{13}	100 à 200	6 à 7	Très grande Rigidité diélectrique	Agglomérés à des résines d'où : micanites, rubans micacés, micafolium
		VERRE Sable de silice + chaux + soude	2500	>180		10^{10} à 10^{17}	25 à 45	6	Grande résistance mécanique mais très fragile	Isolateurs de lignes aériennes Fibre et tissus de verre
		PORCELAINE Argile + quartz + émail	2500	>180	100	10^{12}	16	5	Résiste aux chocs thermiques et à la chaleur	Isolateurs H.T. Support de résistances électriques. Pièces moulées
		AMIANTE Silicate de chaux + magnésie	1800 à 2200	>180		10^9	3	2	bonne résistance à la chaleur et au feu mais craint l'humidité	Support de résistances. Isolant de conducteurs. En plaques, rubans, cordons
	Origine organique	BOIS Imprégné de bakélite	600 à 900	105	140	10^4	5	9	Très léger. Peu coûteux	Poteaux, tableaux, moulures, cales isolantes, panneaux
		PAPIER Cellulose agglomérée et imprégnée	800 à 1300	60	70 à 120	10^{10} à 10^{16}	60 à 80	6	Très sensible à l'humidité. souple	Rubans imprégnés pour câbles haute tension. Cartons, rubans, produits stratifiés
		CAHOUTCHOUC Résine naturelle Latex de l'hévéa	960	60	32	10^{14}	20 à 30	3	Elastique. Attaqué par les huiles. Vulcanisées par addition de soufre	Produits en bande ou moulés. Isolation des conducteurs et câbles
		COTON Fibres imprégnées		90 à 120	50 à 100	10^9	5 à 10	3 à 4	Très souple, économique et bonne résistance à la traction	Fils, rubans, toile. Isolation en bobinage avec imprégnation
ISOLANTS LIQUIDES	HUILE MINERALE Distillation du pétrole brut	850 à 950	145		10^{13}	9 à 10	2	Rigidité diélectrique chute avec la présence d'humidité	Isolation des transformateurs	
	ASKARELS diélectriques chlorés (pyralène)	1300 à 1500			10^{10}	20	5	Ininflammable.	Interdit depuis 1990	
ISOLANTS GAZEUX	AIR SEC				10^{14}	3	1	Rigidité très élevée à la pression de 10 bars : 225 kV/mm	Isolation des lignes aériennes. Interrupteurs, disjoncteur pneumatique	
	SF6 Hexafluorure de soufre					7,5	1	Rigidité diélectrique égale à 2,5 fois celle de l'air	Disjoncteurs haute tension	

CLASSIFICATION EN FONCTION DE L'ETAT PHYSIQUE (SUITE)

DESIGNATION		Masse volumique	Température max	Résistance à la rupture	Résistivité	Rigidité diélectrique	Constante diélectrique ϵ_r	PROPRIETES	EMPLOIS
UNITES		kg/m ³	°C	N/mm ²	Ωm	kV/mm			
THERMODURCISSABLES	BAKELITE Résine phénolique + farine de bois	1400	150 à 170	3 à 5	10^{10} à 10^{12}	10 à 20	5 à 9	Résiste à la chaleur, couleur sombre	Poudre à mouler, résine, vernis. Très utilisé en produits en plaques et appareillage
	FORMICA Résine aminoplaste + charge cellulosique	1400	100 à 120	4 à 8	10^{10}	10 à 15	7 à 10	Transparent, se colore facilement	Poudre à mouler, résine, vernis. Produits stratifiés, pièces d'appareillage
	ARALDITE Résine époxy	1200	110 à 120	6,5	10^{14} à 10^{15}	70	4,5	Très bonne rigidité électrique	Résine à couler, vernis, colle, pièces isolantes moulées
	POLYESTER Résine alkyles	1200	120	4,5	10^{13}	13 à 22	2,5 à 4	Très utilisé en stratifié avec fibre de verre	Résine, poudre, pièces moulées. Produits stratifiés
	SILICONE carbone remplacé par du silicium	1800	180	40 à 80	10^{14} à 10^{16}	300	2,5	excellentes propriétés électrique et mécanique, mais coûteux	Huiles, graisses, caoutchouc Poudre à mouler, résine, vernis.
THERMOPLASTIQUES	PVC Polychlorure de vinyle	1400	60	4	10^{12}	35	5	Le plus utilisé, peut se coller facilement, très souple	Isolation et gaines pour conducteurs et câbles, feuilles plaques, tubes
	POLYSTYRENE	1000	80	5	10^{15}	25	2,5	Transparent, léger, n'absorbe pas l'humidité	Moulage de pièces isolantes
	PLEXIGLAS	1200	80	7	10^{16}	15	4	Transparence parfaite	Plaques, résine à mouler, supports et boîtiers transparents
	NYLON-RILSAN polyamides	1100	100 à 150	6	10^{11}	14	5	Très résistant à l'usure, s'obtient en fils très fins	Fils et tissus de guipage de fils Pièces isolantes d'appareillage
	TEFLON fluoréthène	2200	250	3	10^{17}	18	2	Bonnes propriétés électrique et mécanique, à haute température, mais coûteux	Rubans, stratifiés Utilisations spéciales
	CAHOUTCHOUC néoprène	1240	70	4	10^{10}	14	7	Très élastique, résiste aux huiles et aux solvants	Isolement des fils et des câbles

4. MATERIAUX MAGNETIQUES

4.1. Rappels

4.1.1. 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 :

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

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

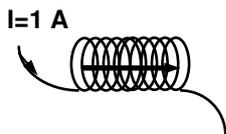
On dit que le milieu magnétique caractérisé par μ_0 , est excité par le circuit électrique « kI » et on définit ainsi le vecteur excitation magnétique \vec{H} qui vérifie la relation :

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

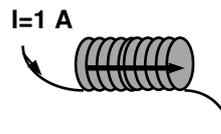
4.1.2. Substance ferromagnétique

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

exemple : solénoïde de 500 spires / m

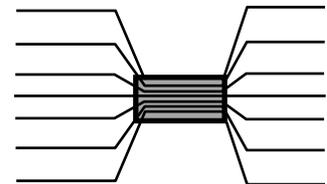
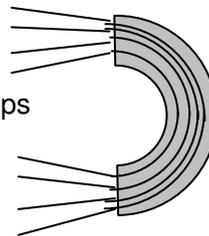


$B = 0,63 \text{ mT}$ dans le vide



$B = 1 \text{ T}$ dans fer doux

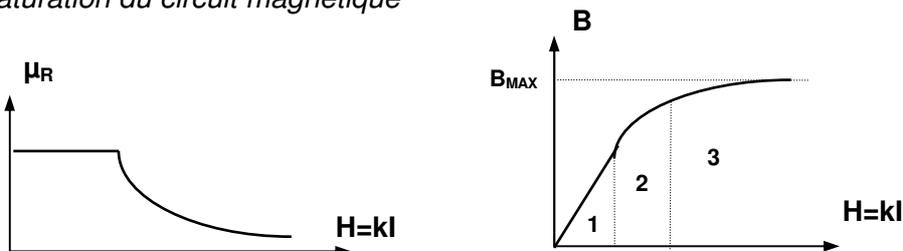
@ Ces matériaux canalisent les lignes de champs



@ Ils perdent leurs propriétés magnétiques au-dessus de la température de Curie : (**770°C pour le fer**)

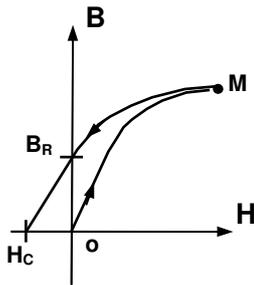
@ Leur perméabilité relative diminue fortement quand H augmente - **saturation** - et dépend des états magnétiques antérieurs - **hystérésis magnétique** .

4.1.3. 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.

4.1.4. 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 : **$H_C = \text{excitation coercitive}$**

4.1.5. Cycle d'hystérésis -- pertes par hystérésis

Si on applique à un matériau magnétique une excitation H alternative, on obtient dans le plan « B, H » 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 :

$$\text{pertes par hystérésis} \rightarrow p_h = k_1 f B_{\max}^2$$

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**

ex : acier au silicium

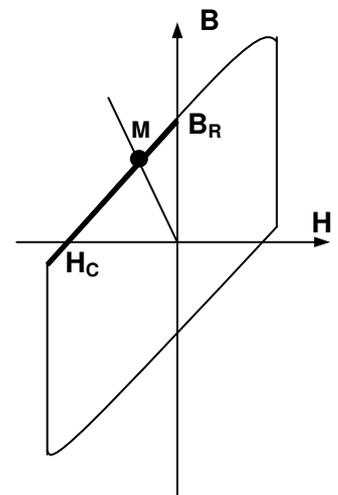
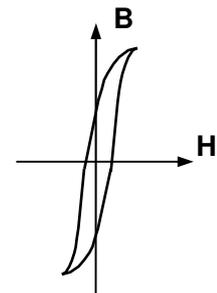
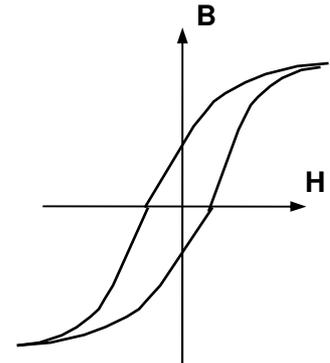
@ Dans les aimants permanents, on recherche des valeurs importantes de B_R et H_C : il faut donc augmenter la surface du cycle :

---> **utilisation de matériaux durs**

remarque :

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**.



4.1.6. 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 ρi_F^2 :

$$\text{pertes par courants de Foucault} \rightarrow p_c = k_2 \times \frac{(e \cdot f \cdot B_{MAX})^2}{\rho}$$

Remarques :

@ pour réduire les pertes par courants de Foucault, on peut :

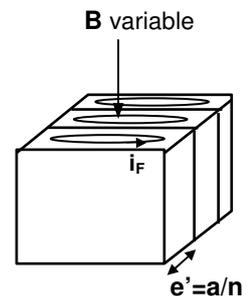
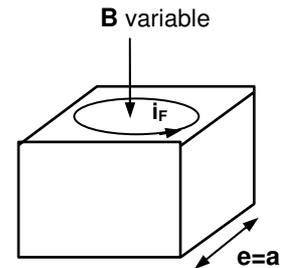
---> diminuer l'épaisseur ***e*** en utilisant un assemblage de tôles de faible épaisseur (35/100 ou 50/100) isolées entre elles :

- **circuit magnétique feuilleté**

---> utiliser des matériaux magnétiques à résistivité plus élevée :

- **tôles d'acier au silicium**

- **ferrites** (à fréquence élevée)



4.1.7. 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*** » :

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

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

M : masse du circuit

$f_0 = 50 \text{ Hz}$

$B_0 = 1 \text{ T}$

$1,5 < k < 2$

4.2. 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 : $f < 1000 \text{ kHz}$

4.2.1. 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 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 MW).

4.2.2. 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 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)

4.2.3. 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 ($f > 100 \text{ kHz}$)

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 ($\approx 1200 \text{ }^\circ\text{C}$). On obtient ainsi un matériau de grande résistivité, massif, mais malheureusement très cassant.

GUIDE DE CHOIX DES MATERIAUX 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 ϵ ($\Omega.m \times 10^8$)	Pertes (W/kg)	Production t/an Prix en F/kg	
constant e	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
		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 MFe_2O_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
		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	<i>Faible</i> 800 à 2000	- bobines de couplage - inductances - filtres - blindages

4.3. Matériaux magnétiques durs

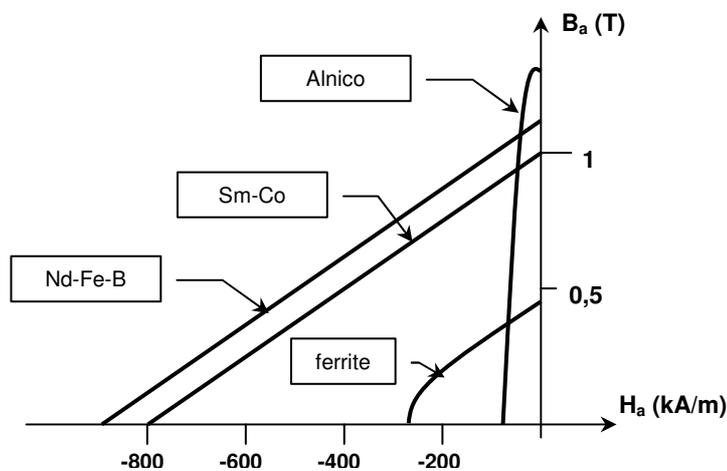
Ces matériaux sont utilisés pour la réalisation d'aimants permanents. Ils possèdent une induction rémanente importante et un champ coercitif élevé.

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

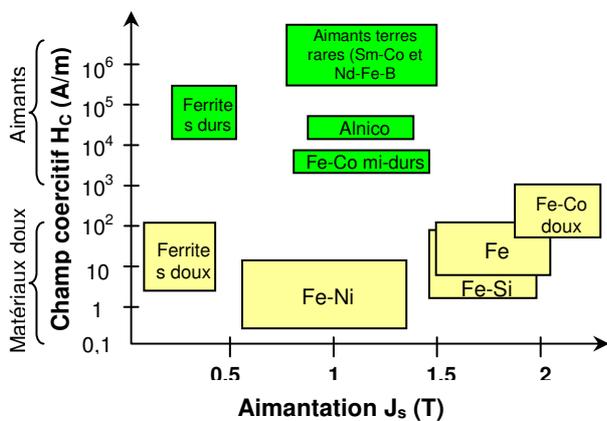
Ils sont souvent associés à du fer doux qui canalise les lignes d'induction et sont aimantés lors du procédé de fabrication.

On distingue essentiellement, aujourd'hui :

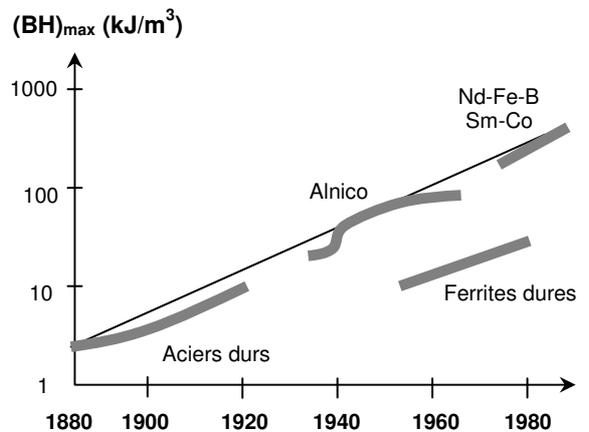
- les **ferrites dures** --> moins cher et le plus utilisé
- les **alliages à base de terres rares** --> très performants et en expansion
- les « **alnico** » (alliages fer + Al Ni Co) --> en perte de vitesse



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



Comparaison matériaux doux /durs



Evolution historique des aimants

4.3.1. 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.

4.3.2. 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 (0,5µ).

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.

4.3.3. 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/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.

4.3.4. 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

GUIDE DE CHOIX DES MATERIAUX 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

5. BIBLIOGRAPHIE

- Techniques de l'ingénieur
 - * Alliages fer-silicium (D 2110 – D2111 – D2112)
 - * Aimants permanents - matériaux et applications (D2100 – D2101)
- Revue 3E.I du 15 décembre 1998 : Aimants et électroaimant
- Henry Ney : Electrotechnique et normalisation (NATHAN)
- Mauclerc-Aubert-Domenach : Guide du technicien en Electrotechnique (Hachette)
- Encyclopédie ENCARTA (Microsoft)
- Sébastien Usai : Rapport de stage bac pro EIE - <http://trouge.free.fr/stage>
- Assemblage Paro Inc – Canada (équipements électriques HT) - [Assemblage Paro Inc.](http://www.assemblageparo.com)
- IDE : Isolants de l'Est - <http://www.isolants.com/>
- Pirelli, secteur câbles - <http://www.pirelli.com/>