

Chapitre 2

Matériaux conducteurs

1. Matériaux usuels

Métaux :

Al aluminium, **Ag** argent, **Cr** chrome, **Co** cobalt, **Cu** cuivre, **Sn** étain, **Fe** fer, **Hg** mercure, **Mo** molybdène, **Ni** nickel, **Au** or, **Pt** platine, **Pb** plomb, **W** tungstène, **Zn** zinc

Non métaux :

C carbone, **Ge** germanium, **O** oxygène, **P** phosphore, **Si** silicium

Alliages :

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

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

Bronzes : cuivre + ≈10% de Sn

Laitons : cuivre + ≈50% de Zn

Constantan : Cu + Ni

2. 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 : $< 10^{-6} \Omega \cdot m$ (1 million de milliard fois plus pour les isolants) ;
- ✓ Bonne conductivité thermique : $\approx 100 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ (≈ 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 (2,7), pour Au, Pt et W (≈ 20) ;
- ✓ Influence importante de la température sur la résistivité (40 % en plus pour 100 °C d'élévation) et sur 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).

3. Densité de courant

Densité de courant: $J = I/S$ [A/mm²]

avec I : Intensité de courant S : section du conducteur

Densité volumique de pertes Joule : $P_j = \rho J^2$ [W/m³] avec ρ en $\Omega.m$

Les pertes sont la principale limitation des systèmes électromécaniques.

Densités de courants admissibles

Matériau	Densité volumique	Résistivité à 20 °C ($10^{-8} \Omega m$)
Cu	8,96	1,7
Al	2,7	2,6
Ag	10,5	1,6
Laiton (Cu-Zn-Mn)	8,5	7,2

La résistivité est en général une fonction croissante de la température :

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad ; \quad \text{pour le Cu : } \alpha = 39.10^{-4} K^{-1}$$

Les valeurs typiques des densités de courant :

3 à 5 A/mm ²	normal
$J = 10$ A/mm ²	refroidissement à eau
20 A/mm ²	refroidissement très étudié

Les pertes sont un phénomène volumique alors que leur évacuation est surfacique. Par conséquent, plus la section sera élevée, plus la densité de courant admissible diminuera.

Exemple : câble triphasé Cu à isolant PVC dans l'air

Section (mm ²)	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
I (A)	18,5	25	34	43	60	80	101	126	153	196	238	276
J (A/mm ²)	12,3	10	8,5	7,2	6	5	4	3,6	3,1	2,8	2,5	2,3

Exemple : lignes aériennes électriques

Dans le cas des lignes aériennes électriques, les densités de courant optimales (coût du conducteur et supports plus capitalisation des pertes) sont plus faibles que les valeurs ci-dessus. Elles sont comprises entre 0,6 et 0,8 A/mm² en fonction du coefficient d'utilisation de la ligne (répartition de sa charge en cours d'année). Les contraintes sont :

- ✓ technique : limite d'échauffement du conducteur (60°C par exemple) compte tenu des conditions extérieures (saison, vent, ...) ;

Section (mm ²)	I _{max} (A)		J _{max} (A/mm ²)	
	Eté	Hiver	Eté	Hiver
228	510	640	2,22	2,81
841	1100	1400	1,31	1,66

- ✓ économique : capitalisation des pertes sur la durée de vie de la ligne ;
- ✓ sécurité : possibilité de report d'une ligne à une autre.

D'où la densité de courant économique $J < 1 \text{ A/mm}^2$ (0,6 à 0,8).

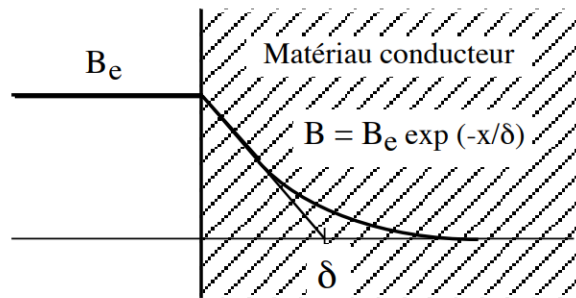
4. Effet de peau

Lorsqu'un matériau conducteur est soumis à une induction magnétique variable, il a tendance à s'opposer à ces variations en développant des courants induits ou courants de Foucault. C'est la loi de Lenz. Ce phénomène d'écrantage est appelé aussi effet de peau.

Pour résoudre le problème d'électromagnétisme, il faut utiliser les équations de Maxwell et les relations des matériaux (du milieu) dans les différentes régions considérées.

$$\text{Maxwell: } \begin{cases} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \end{cases} \quad \text{Milieu: } \begin{cases} \vec{E} = \rho \vec{j} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \end{cases}$$

L'induction décroît et est déphasée dans le matériau. Cette décroissance se fait sur la longueur caractéristique δ , l'épaisseur de peau.



De manière analogue, le courant ne pénètre pas dans un conducteur de forte section (rayon par rapport à δ). Le courant se concentre à la surface. Comme conséquence, la résistance "apparente" augmente et le conducteur est mal utilisé ; une solution est de subdiviser le conducteur.

Pour un conducteur en cuivre de diamètre 30 mm (3δ), 50 Hz, la diminution est d'environ 10 %.

5. Domaines d'application

5.1. 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 HT.

5.2. Amélioration des contacts électriques

Le platine, l'or et surtout l'argent, qui ont une très bonne résistivité, et qui sont difficilement altérables (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 sectionneurs HT, des contacteurs...

5.3. 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).

5.4. Contacts glissants

Le carbone amorphe (le 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 présente une bonne résistance de contact.

Le bronze est utilisé dans les contacts avec les caténaires.

5.5. Résistances bobinées

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

5.6. Lampes à incandescence

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

5.7. Lampes à décharges

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

5.8. 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.

Thermo-résistance : 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.

6. Supraconducteurs

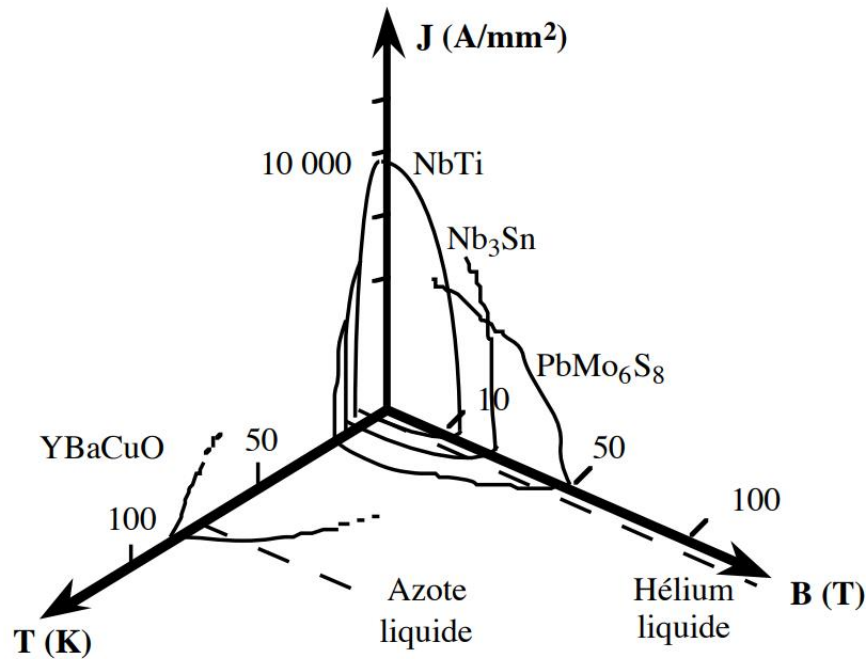
$\rho = 0$: possible avec les *matériaux supraconducteurs* ($\rho < 10^{-24} \Omega \cdot m$).

Avec une telle résistivité, mesurée, le courant dans une bobine court-circuitée ne décroît de 63 % qu'après 120 000 années (!).

Découverte en 1911, la supraconductivité a vu ses premières applications dans les années 1960. Elle reste néanmoins encore aujourd'hui cantonnée dans des niches bien spécifiques comme l'imagerie médicale ou la physique des hautes énergies. Certains supraconducteurs présentent cependant des propriétés extrêmement intéressantes pour le génie électrique, à savoir des densités de courant beaucoup plus élevées que dans les conducteurs résistifs (centaines d'A/mm² au lieu de quelques A/mm²) et une absence de pertes lorsque l'induction magnétique ne varie pas dans le temps. Les supraconducteurs offrent en outre de nouvelles possibilités comme l'apparition ultra rapide d'une résistance par dépassement d'un certain courant ou d'un champ. Ces performances exceptionnelles n'apparaissent qu'en dessous d'une certaine température dite critique. Celle-ci est inférieure à 20K environ pour les supraconducteurs conventionnels dits "**bas T_c**" et de l'ordre de 100K pour certains oxydes supraconducteurs appelés "**hauts T_c**". Cela implique que les dispositifs supraconducteurs doivent être refroidis. L'élément supraconducteur est inséré à l'intérieur d'un cryostat qui assure une

isolation thermique très poussée. La cryogénie reste une technologie complexe mais parfaitement maîtrisée et utilisable par des non-spécialistes.

Un matériau supraconducteur est dans un état non dissipatif lorsque les grandeurs températures (T), densité de courant (J) et champ magnétique (H) sont inférieures aux valeurs critiques T_c , J_c et H_c . Ces trois grandeurs sont reliées et elles définissent une surface critique dans l'espace (T, H, J) (Figure ci-dessous).



Les pertes dans un supraconducteur ne sont nulles que lorsque son environnement électromagnétique est constant. Dès que celui-ci varie dans le temps, des pertes, dites pertes ac, existent. La relation de Maxwell-Faraday ($\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$) nous indique en effet qu'un champ électrique apparaît dès que l'induction magnétique (extérieure ou liée au courant de transport) est variable. Ce champ électrique est à l'origine de la dissipation en régime variable. Compte tenu du coût énergétique important d'extraction des pertes à basse température (formule de Carnot), les pertes ac doivent être maintenues à un niveau extrêmement faible pour que la solution supraconductrice en alternatif soit viable. Ceci est obtenu par une structure particulière du fil supraconducteur. Les supraconducteurs peuvent être décomposés en deux grandes classes : les supraconducteurs à basse température critique (bas T_c) et ceux à haute température critique (haut T_c).

6.1. Supraconducteurs Bas Tc : matériaux conventionnels (NbTi, Nb₃Sn, ...)

Ce sont des matériaux industriels (NbTi : 1000 tonnes de conducteur par an), performants en termes de propriétés de transport (3000 A/mm² ; 5 T ; 4,2 K). Ils doivent être par contre maintenus à très basse température, typiquement 4,2K (Hélium liquide à pression atmosphérique) pour présenter leurs propriétés exceptionnelles.

Cela nécessite un environnement cryogénique donc une complexité technologique. C'est pourquoi ils sont utilisés seulement lorsqu'on ne peut pas faire autrement ou s'ils surclassent très nettement les systèmes conventionnels (imagerie et spectrométrie médicales, physiques des hautes énergies, tokamaks, ...).

6.2. Supraconducteurs Haut Tc : matériaux de type oxydes intermétalliques (YBaCuO, BiCaSrCuO, TlBaCaCuO, HgBaCaCuO, ...)

Ces matériaux, découverts en 1986, sont encore au stade du développement, voire de la recherche. Leurs performances sont encore modestes ou sont obtenues sur des dimensions réduites. Ce sont des matériaux de type céramique qui posent des grandes difficultés pour leur mise en œuvre sous forme de conducteur de grande longueur. Leurs températures de fonctionnement sont nettement plus élevées, donc plus facilement accessibles, comparé aux supraconducteurs conventionnels, les rendant donc extrêmement attrayants et ils sont promis un bel avenir. Les recherches, très importantes, concernent les matériaux, leurs procédés d'élaboration et les applications. Des conducteurs en longueur kilométrique sont d'ores et déjà commercialisés avec des performances suffisantes pour des démonstrateurs. Les premières réalisations, dont certaines d'envergure (MVA), commencent à apparaître.