

Chapitre 3 : Propriétés physiques

Comme nous l'avons vu précédemment aussi, il existe des solides qui sont connus pour être des isolants électriques mais qui conduisent la chaleur aussi bien que les métaux. Cette observation nous amène à penser qu'il existe au moins un autre mécanisme de conduction thermique que celui faisant intervenir des électrons mobiles. Le mécanisme qui est en majeure partie responsable du transport de la chaleur dans les isolants électriques fait intervenir *les vibrations du réseau cristallin*. On parle dans ce cas de conductivité thermique de réseau ou conductivité thermique par *phonons*.

Dans un solide, les atomes vibrent constamment autour de leur position d'équilibre et l'amplitude des vibrations croît avec la température. Si on fournit de l'énergie thermique à une extrémité d'un cristal, l'amplitude des vibrations atomiques augmente à cette extrémité. À cause des forces interatomiques qui assurent la cohésion du cristal, tout mouvement d'un atome influence ses voisins immédiats et se transmet de proche en proche sous la forme d'une onde dans la direction du gradient thermique. *C'est par ce mécanisme que la chaleur est conduite dans les isolants électriques.*

3.3 Les propriétés magnétiques

3.3.1 Notions de base sur le magnétisme

Les propriétés magnétiques des matériaux ont un rôle majeur dans des domaines comme les machines électriques (moteurs électriques, génératrices, transformateurs) et le stockage de l'information (bandes et pistes magnétiques, disques durs). Dans cette partie, nous décrirons d'une manière très simplifiée, les comportements magnétiques les plus fréquents des matériaux ainsi que le caractère exceptionnel de leurs propriétés, tels que les aimants.

On peut assimiler la circulation des électrons sur les orbitales atomiques à un courant électrique tournant en boucle. Ce mouvement génère un moment magnétique perpendiculaire au plan de l'orbitale. De même, un électron qui tourne sur lui-même génère un moment magnétique, qui est toujours le même en intensité mais affecté d'un signe (+) ou (-) selon le sens de rotation.

Si toutes les couches électroniques d'un atome sont remplies, la somme de ces courants est nulle et cet atome n'aura aucun moment magnétique résultant. Il sera insensible à un champ magnétique externe et fera partie des matériaux diamagnétiques. C'est le cas des gaz rares, du carbone diamant ou du magnésium. Seuls les atomes dont les couches sont incomplètes possèdent un moment magnétique. Mais il faut considérer deux cas :

- Les atomes comportant un seul électron sur la couche externe sont faiblement sensibles à un champ magnétique externe. Ils font partie des matériaux *paramagnétiques*. C'est le cas du sodium et des alcalins. D'autres atomes paramagnétiques possèdent un moment magnétique non nul mais il n'y a pas d'orientation globale possible car l'agitation thermique désorganise constamment l'alignement des dipôles (nombreuses céramiques). Tous ces matériaux (les plus nombreux) sont très intéressants pour construire des appareils insensibles aux champs externes.
- A l'état solide, seuls les éléments ayant une couche interne incomplète auront une forte sensibilité à un champ magnétique externe. Ils constituent la famille des matériaux *ferromagnétiques*. Les dipôles atomiques s'alignent tous sur une grande distance dans le sens du champ externe et forment des domaines magnétiques à orientation commune. Cet « ordre interne » intense peut n'apparaître que si un champ externe les suscite et disparaître avec lui, ou bien subsister en l'absence du champ : il s'agit des aimants permanents, capables eux-mêmes de créer un champ magnétique autour d'eux.

L'effet ferromagnétique est détruit par l'agitation thermique et tous les matériaux ferromagnétiques possèdent une température limite dite température de Curie, au-delà de laquelle ils deviennent paramagnétiques. La plupart des matériaux ferromagnétiques sont rares. Citons le fer, le cobalt et le nickel, les plus importants, mais aussi les « terres rares », comme le terbium ou le samarium qui sont utilisés pour la fabrication d'aimants de très hautes performances.

Le ferrimagnétisme est un cas particulier de ferromagnétisme appliqué aux composés. Le matériau étant constitué d'atomes différents, ceux-ci génèrent des moments magnétiques différents. Ces moments s'annulent en partie mais la résultante conduit à un comportement de type ferromagnétique. C'est le cas de certains matériaux de grande importance technologique tels que les ferrites qui sont des mélanges d'oxydes de fer et d'autres métaux (Ni, Zn, Ba). Ils ont permis de fabriquer à partir de poudre des aimants d'efficacité moyenne mais très faciles à mettre en forme (magnets).

3.3.2 Induction magnétique, perméabilité et susceptibilité

Sous l'effet d'un champ magnétique extérieur H (exemple de l'aimantation due à la circulation d'un courant dans un solénoïde et exprimé en $A.m^{-1}$) il se crée dans le vide un champ d'induction

Chapitre 3 : Propriétés physiques

magnétique B_0 , capable de susciter un comportement magnétique dans un matériau. B est exprimée en tesla (T) et est proportionnelle au champ H :

$$B_0 = \mu_0 \cdot H \quad \text{Eq 3-9}$$

Où : μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, en henry (H) par mètre ($\mu_0=4\pi 10^{-7} Hm^{-1}$).

En présence de matière, on observe l'induction (B) et on peut définir μ , la perméabilité magnétique du milieu :

$$B = \mu \cdot H \quad \text{Eq 3-10}$$

On définit plus souvent la perméabilité relative μ_r du milieu :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{Eq 3-11}$$

Une autre approche consiste à introduire la notion d'aimantation « M », et à dire que l'induction (B) dans la matière peut aussi s'écrire :

$$B = \mu_0(H + M) \quad \text{Eq 3-12}$$

L'aimantation représente le champ magnétique local induit par le champ magnétique extérieur (H).

L'aimantation est donc proportionnelle à H . On peut alors écrire :

$$M = \mu_r \cdot H \quad \text{Eq 3-13}$$

$$B = \mu_0 \cdot H (1 + X_r) \quad \text{Eq 3-14}$$

En comparant l'équation 3-14 à l'équation 3-10 on trouve :

$$\mu = \mu_0 (1 + X_r) \quad \text{Eq 3-15}$$

Où : X_r est la susceptibilité magnétique relative du matériau.

C'est une grandeur sans dimension, reliée à μ_r par la relation :

$$\mu_r = 1 + X_r \quad \text{Eq 3-16}$$

- Les matériaux diamagnétiques ont une susceptibilité X_r négative très petite (environ -10^{-6}).
- Les matériaux paramagnétiques ont un X_r positif compris entre 10^{-6} et 10^{-3} .
- Les matériaux ferromagnétiques ont un X_r positif très grand, compris entre 10^3 à 10^6 .

3.3.3 Courbe d'aimantation, boucle d'hystérésis

La courbe donnée dans la *Figure 3-8* est la courbe d'aimantation d'un matériau ferromagnétique. Elle est obtenue en mesurant l'induction (B) en fonction d'un champ externe (d'excitation) H , variant de 0 à $+H_s$, puis de $+H_s$ à $-H_s$ et enfin de $-H_s$ à $+H_s$.

B_s est l'aimantation à saturation du matériau, obtenue pour le champ extérieur H_s .

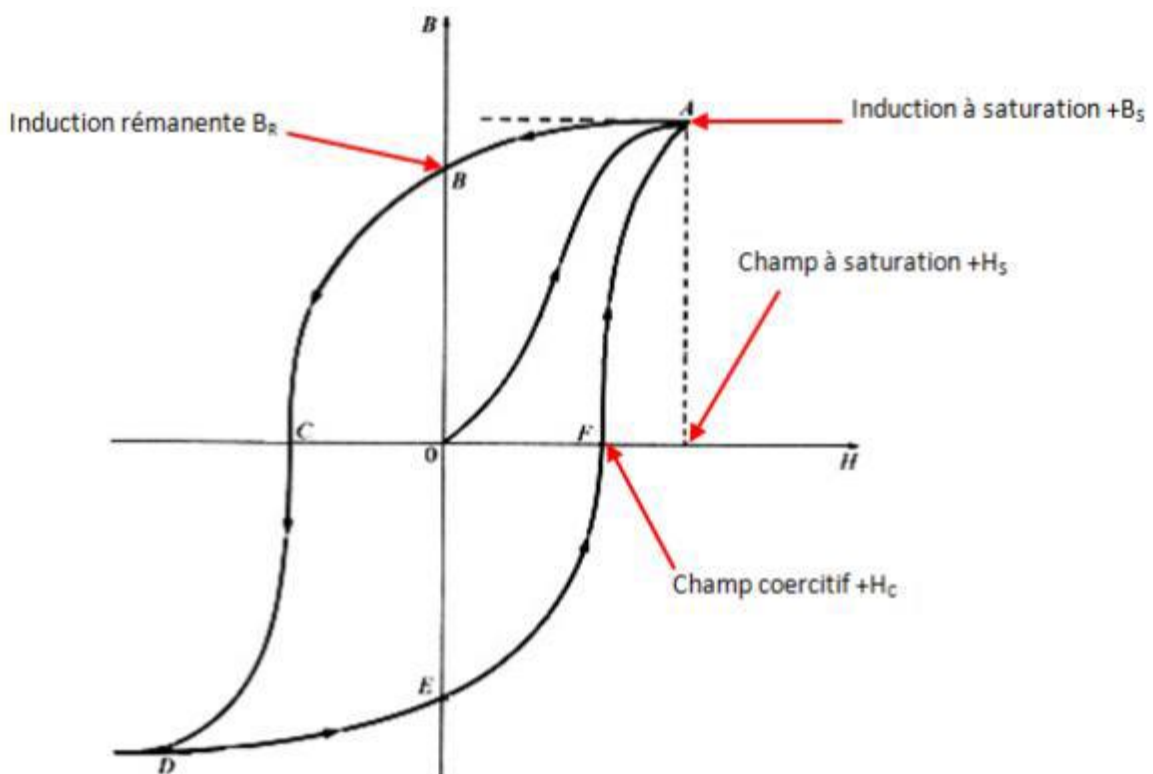


Figure 3-8 : Courbe d'aimantation, boucle d'hystérésis

Chapitre 3 : Propriétés physiques

- En O (point de départ de la courbe), le matériau contient des domaines magnétiques dont l'orientation est globalement nulle.
- Le long de la partie OA de la courbe, le champ augmente jusqu'à la saturation. C'est la courbe de première aimantation. Les domaines évoluent vers un seul domaine de même orientation et la saturation est atteinte quand l'induction devient constante, B_s , pour le champ $+H_s$.
- Le champ décroît jusqu'à 0 quand on parcourt la courbe AB. Les domaines réapparaissent mais la réorganisation n'est pas complète et, au point B, pour $H = 0$ il subsiste une induction rémanente B_R .
- Il faut appliquer un champ de sens opposé pour annuler B_R . Ceci est atteint au point C pour la valeur du champ $-H_c$, dit champ coercitif.
- Lorsque le champ continue vers les valeurs négatives (courbe CD), on atteint la saturation inverse du point A pour la valeur $-H_s$. Un seul domaine magnétique s'est à nouveau formé mais il est orienté dans le sens contraire de celui qui existait en A.
- Si le champ évolue à nouveau vers les valeurs positives, on décrit la partie DEFA, symétrique par rapport à O de la courbe analysée.

Cette courbe décrit la boucle d'hystérésis de l'aimantation, et permet de mesurer les paramètres caractéristiques du ferromagnétisme d'un matériau donné que sont B_s , B_R , H_s et H_c . Dans le cas que nous venons de considérer, le matériau est devenu *un aimant permanent*, caractérisé par B_R . L'aire de la boucle représente *l'énergie dépensée* pour réorienter les domaines magnétiques au cours du cycle. Cette énergie est dissipée sous forme de chaleur (pertes magnétiques). C'est surtout cette énergie qui fait chauffer la carcasse magnétique d'un transformateur fonctionnant à 50 Hz. La courbe précédente est celle des matériaux magnétiques durs, que sont les aimants.

Il existe la catégorie des matériaux magnétiques doux, dont la courbe d'hystérésis est très haute et très étroite. La courbe donnée dans la *Figure 3-9* compare la courbe d'aimantation de ces deux types de matériaux (magnétiques durs et magnétiques doux).

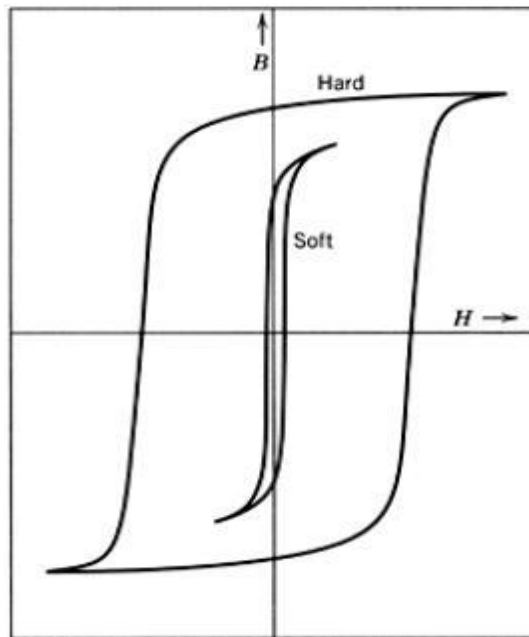


Figure 3-9 : Comparaison entre la courbe d'aimantation d'un matériau magnétique dur et celle d'un matériaux magnétique doux

Ces matériaux sont destinés à produire une très forte induction sous l'effet d'un champ externe. Ils servent à « canaliser » les champs magnétiques dans de nombreux appareils électrotechniques (moteurs, transformateurs, blindages magnétiques, noyaux des électroaimants) mais ne doivent pas conserver d'aimantation.