

Programme Cours Matériaux Electrotechnique

Chapitre 1. Matériaux magnétiques

Classification des matériaux magnétiques, caractérisation technique d'aimantation.

Chapitre 2. Matériaux ferromagnétiques

Matériaux ferromagnétiques durs et leurs applications, matériaux ferromagnétiques doux et leurs applications ; caractérisation des aimants permanents.

Chapitre 3. Matériaux diélectriques

Phénomène de polarisation, résistivité diélectrique, rigidité diélectrique, pertes diélectriques, propriétés physico-chimiques.

Chapitre 4. Matériaux conducteurs et supraconducteur

Généralités et Application.

Chapitre 5. Semi-conducteurs

Généralités et Applications

Introduction

Les matériaux magnétiques sont au cœur de génie électrique et sont un élément moteur de son évolution. On le rencontre dans de nombreux dispositifs allant des machines électriques utilisées dans l'industrie lourde aux petits appareils électroniques du quotidien.

Les matériaux magnétiques doux, en particuliers, sont incontournables car, tout en étant économiquement accessible, ils offrent une polarisation magnétique élevée et permettent une variation aisée du flux magnétique avec une faible dissipation d'énergie.

Définition magnétisme ;

Le magnétisme représente un ensemble de phénomènes physiques dans lesquels les objets exercent des forces attractives ou répulsives sur d'autres matériaux.

I. Relation entre l'induction magnétique \vec{B} et le champ d'excitation \vec{H}

Dans le vide les vecteurs champs d'induction magnétique \vec{B} et champ d'excitation magnétique \vec{H} sont colinéaires puisque liés par la relation $\vec{B} = \mu_0 \times \vec{H}$ où μ_0 est la **perméabilité magnétique du vide** (T.m/A), ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$).

Remarque : dans l'air, le comportement est similaire.

Dans un milieu magnétique quelconque mais isotrope, ces vecteurs restent colinéaires. Cependant, le coefficient de proportionnalité dépend du matériau.

On définit le **vecteur aimantation** \vec{J} qui indique l'influence du milieu. Champ d'excitation et aimantation se superposent pour exprimer le champ d'induction :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}$$

Or l'aimantation est proportionnelle au champ d'excitation, si bien que :

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad \text{Où } \chi \text{ c'est la } \textbf{susceptibilité magnétique} \text{ du matériau.}$$

Il en résulte une nouvelle expression liant \vec{B} et \vec{H} :

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

Où μ est la **perméabilité absolue** et μ_r la **perméabilité relative** du matériau.

Les matériaux peuvent être classés suivant leur comportement magnétique, c'est à dire suivant la **susceptibilité magnétique** χ .

II. Classification des matériaux d'un point de vue magnétique

II.1.1 Matériaux paramagnétiques (tableau 1)

La susceptibilité χ est faible (donc $\mu_r \gg 1$), positive et pratiquement constante (variation en $1/T$).

Les vecteurs \vec{H} et \vec{J} sont de même sens et l'aimantation disparaît avec le champ d'excitation.

Dans ces matériaux, les moments magnétiques permanents s'alignent sous l'effet d'un champ

magnétique. Mais cette orientation ne compense pas l'agitation thermique qui reste prépondérante. En conséquence l'aimantation globale reste faible.

La plupart des gaz, certains métaux et quelques sels font partie de la catégorie des paramagnétiques.

II.1.2 Exemples des matériaux paramagnétiques :

Ils sont rares : O, Pt, Al, Mn... La susceptibilité χ est positive. La théorie de Paul Langevin suppose que les atomes possèdent un moment magnétique permanent sans aucun couplage entre eux. À l'approche d'un champ magnétique, les moments, en cherchant à s'aligner, provoquent une élévation de température faisant diminuer χ selon la loi de Curie. L'aimantation est faible et temporaire.

Matière	χ	Matière	χ
Na	$8,6 \cdot 10^{-6}$	Pt	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Al	$7,7 \cdot 10^{-6}$	U	$3,3 \cdot 10^{-5}$
Mn	$1,2 \cdot 10^{-4}$	CoO	$0,75 \cdot 10^{-3}$
Ta	$1,1 \cdot 10^{-6}$	Fe ₃ C*	$3,7 \cdot 10^{-5}$
W	$3,5 \cdot 10^{-6}$	Fe _γ *	$2,5 \cdot 10^{-5}$

II.2.1 Matériaux diamagnétiques (tableau 2)

La susceptibilité χ est faible (donc $\mu_r \approx 1$), négative et pratiquement constante (variation en $1/T$). Les vecteurs \vec{H} et \vec{J} sont de sens contraires et l'aimantation disparaît avec le champ d'excitation. Dans ce cas, le champ magnétique provoque un mouvement orbital des électrons. Le comportement est alors similaire à une spire créant un courant qui s'oppose au champ : d'où le signe négatif de χ .

II.2.2 Exemples des matériaux diamagnétiques :

Presque tous les corps, Cu, Pb, Zn, Ag, Si... le sont. La susceptibilité χ est négative. Le corps s'oppose à l'approche d'un champ magnétique, par mise en mouvement des électrons, en accord avec la loi de Lenz. La très faible augmentation de l'aimantation $\vec{J} = \chi \vec{H}$ est temporaire.

Matière	χ	Matière	χ
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	$-3,5 \cdot 10^{-6}$

II.3.1 Matériaux ferromagnétiques

Dans cette catégorie essentielle pour l'électrotechnique, la susceptibilité c est élevée ($\mu_r \gg 1$), positive et variable avec l'excitation magnétique (**Figure 1**). D'autre part la température influence particulièrement c : au-delà de la température de Curie, un matériau ferromagnétique se comporte comme un matériau paramagnétique. Enfin, notons aussi que l'induction magnétique dépend du sens de variation de H , ce qui introduit la notion de rémanence et de cycle d'hystérésis (**voir III.2.2**).

II.3.2 Exemples des matériaux ferromagnétiques : fer, cobalt, nickel et leurs alliages. Notons enfin ces matériaux ferromagnétiques particuliers, les ferrimagnétiques (ferrites) ne sont pas conducteurs du courant électrique. Ils sont intéressants car ils ne favorisent pas la création des courants de Foucault (courants apparaissant dans les masses magnétiques soumises à des champs variables et générateurs de pertes électromagnétiques). Les pertes se trouvent donc diminuées ce qui les destine à des applications en haute fréquence (selfs radiofréquences, alimentations à découpage, etc.).

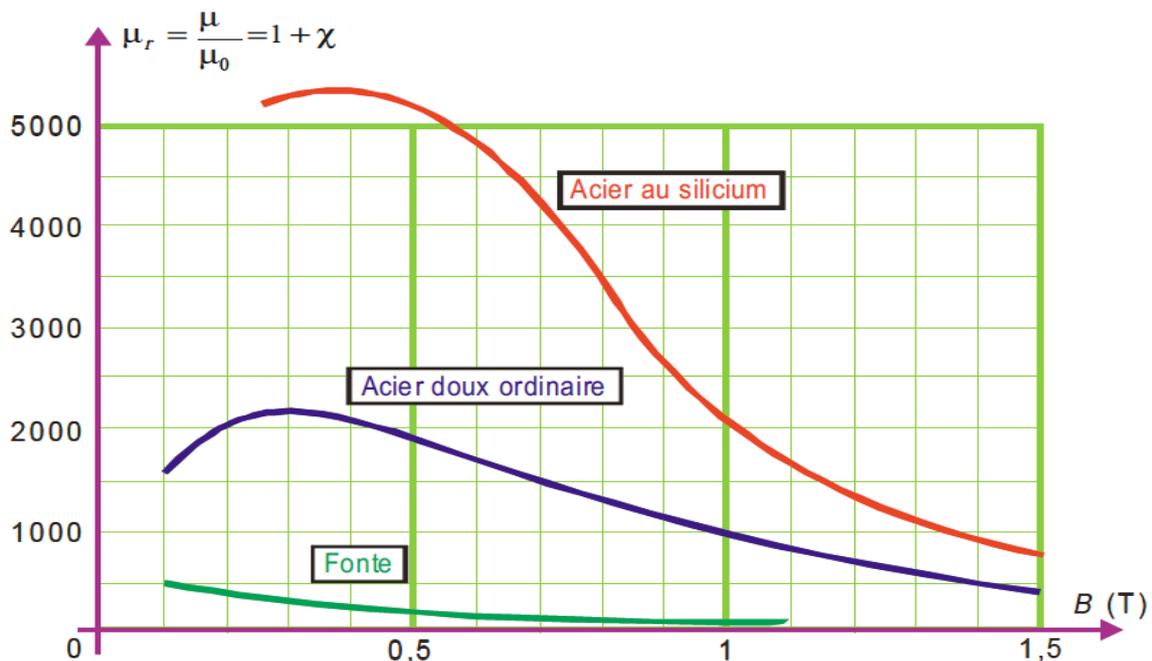


Figure 5 : courbes de première aimantation de matériaux courants.

Les différents comportements magnétiques des trois catégories de matériaux peuvent être illustrés par le graphe de la *Figure 2*.

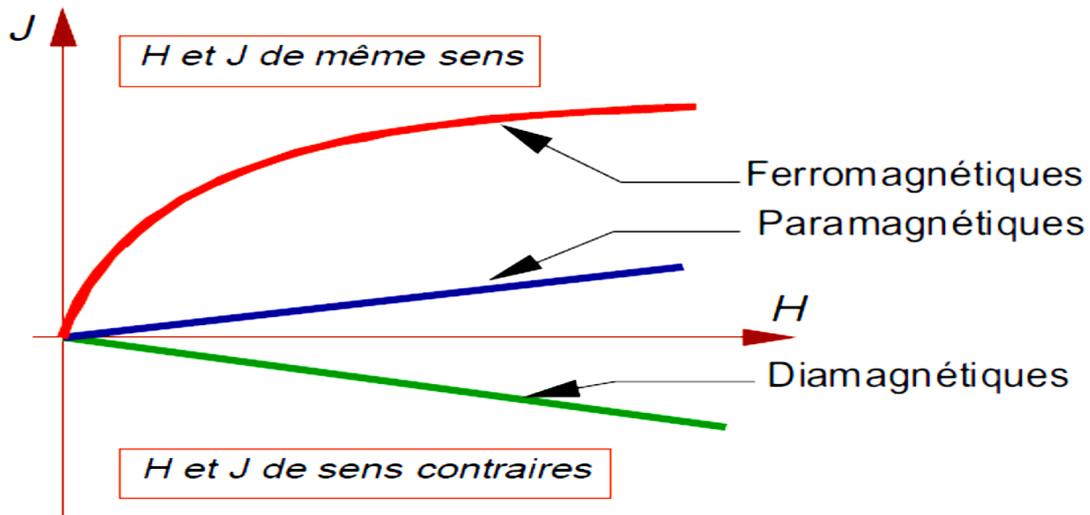


Figure 2 : illustration des comportements magnétiques.

III.2. Processus de polarisation

III.2.1. Courbe de première aimantation

Le matériau est initialement démagnétisé (pas d'aimantation). On fait progressivement croître le champ d'excitation dans lequel est plongé le matériau. La courbe de la *Figure 4* représente l'induction B . On distingue trois zones : la première linéaire, puis le coude de saturation et la zone de saturation. Pour situer l'influence des matériaux, la *Figure 5* présente différentes courbes de première aimantation.

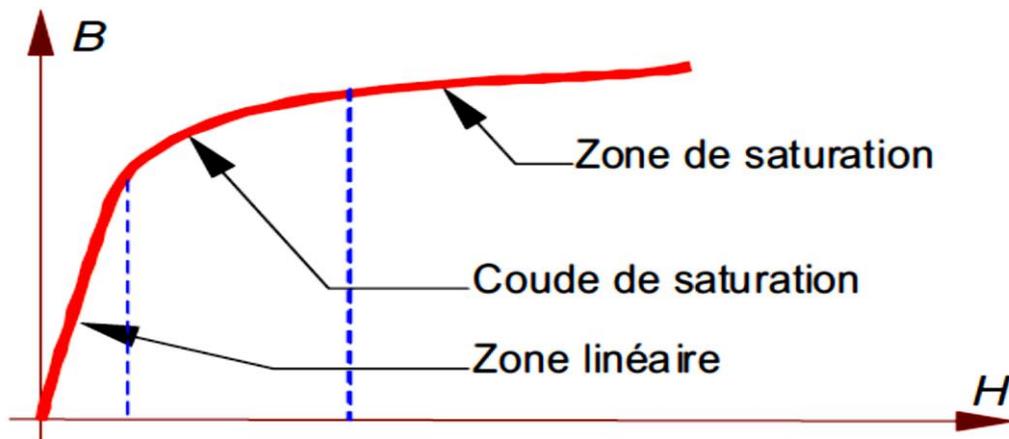
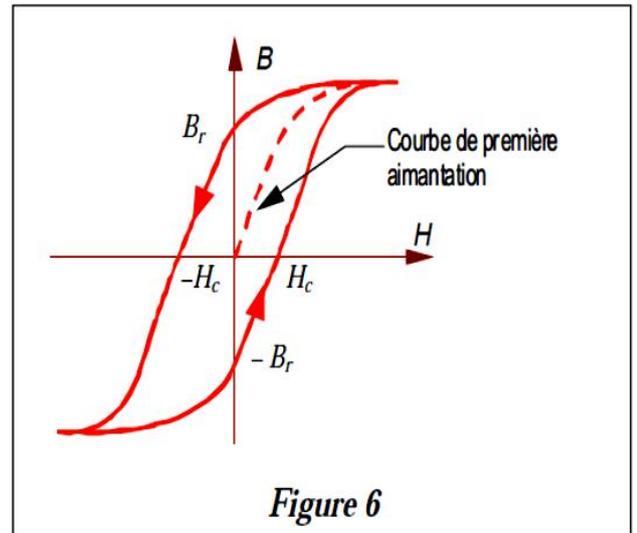


Figure 4 : décomposition de la courbe de première aimantation

III.2.2. Cycle d'hystérésis

A partir d'un point (H, B) de la courbe de première aimantation, on diminue le champ H , l'induction B ne repasse pas sur la même courbe. En conséquence, B nulle ne correspond plus à une valeur nulle de H . Il subsiste une **induction rémanente** B_r (l'induction qui demeure après la disparition du champ). Le champ d'excitation doit s'inverser pour annuler B , c'est le **champ coercitif** H_c (le champ à appliquer pour annuler l'induction). L'induction maximale est l'**induction de saturation** B_{sat} .



On assiste à un phénomène irréversible car les domaines de Weiss sont bouleversés.

