

CHAPITRE II

MATERIAUX MAGNETIQUES

Les matériaux magnétiques sont utilisés en général pour canaliser les flux magnétiques qui, par leurs interactions avec les courants électriques, sont à la base du fonctionnement des machines électriques et des dispositifs électromagnétiques tels les relais. Ainsi l'étude des circuits magnétiques est nécessaire pour comprendre l'électrotechnique. Aussi, certains matériaux magnétiques sont utilisés pour la construction d'aimants permanents qui servent d'inducteurs et à d'autres applications.

I – PROPRIETES MAGNETIQUES DES MATERIAUX

Le magnétisme représente un ensemble de phénomènes physiques dans lesquels les objets exercent des forces attractives ou répulsives sur d'autres matériaux. Les courants électriques et les moments magnétiques des particules élémentaires fondamentales sont à l'origine du champ magnétique qui engendre ces forces. Tous les matériaux sont influencés, de manière plus ou moins complexe, par la présence d'un champ magnétique, et l'état magnétique d'un matériau dépend de sa température.

Les aimants permanents possèdent des moments magnétiques permanents à l'origine du ferromagnétisme. Cependant, la plupart des matériaux ne possèdent pas de moments permanents. Parmi ces derniers, certains sont attirés par la présence d'un champ magnétique (paramagnétisme); d'autres sont au contraire repoussés par celui-ci (diamagnétisme); d'autres encore ont une relation beaucoup plus complexe avec un champ magnétique appliqué (antiferromagnétisme).

Les substances qui sont affectées de façon négligeable par les champs magnétiques sont considérées comme étant des substances non-magnétiques, dites amagnétiques.

L'aimantation **M** caractérise à l'échelle macroscopique le comportement magnétique d'un échantillon de matière. C'est la somme des moments microscopiques orbitaux et des moments magnétiques de spin des électrons et des atomes. Elle se mesure en ampères par mètre. On pose :

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

avec

B l'induction magnétique, H le champ magnétique et μ_0 la perméabilité du vide.

La présence du matériau modifie le champ magnétique. M est normalement reliée à H. On pose :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$$

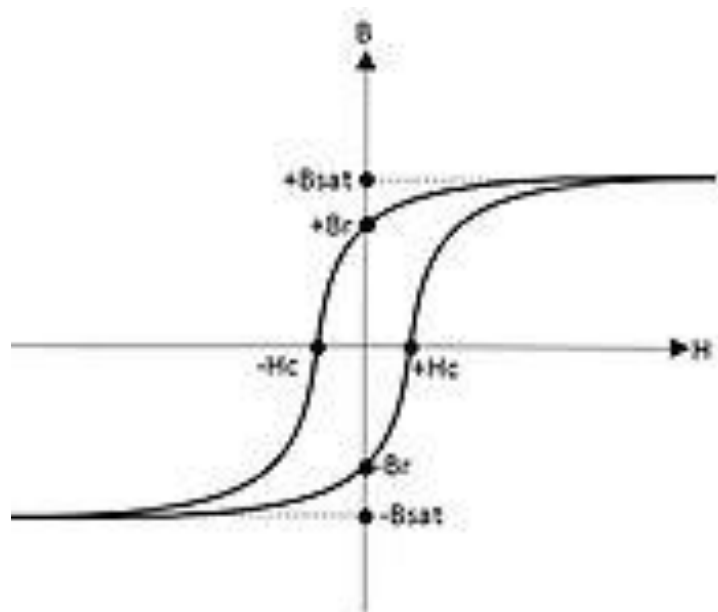
avec μ la : perméabilité magnétique du matériau, et μ_r sa perméabilité relative. Cette dernière est très proche de 1 par défaut pour les matériaux diamagnétiques, très proche de 1

par excès pour les matériaux paramagnétiques, et largement plus grande que 1 pour les ferromagnétiques. En plus, pour les matériaux ferromagnétiques elle est non constante et dépend de l'histoire de l'aimantation.

Cycles d'hystérésis

Lorsqu'on a magnétisé un échantillon de matériau jusqu'à la saturation et que l'on fait décroître l'excitation H , on constate que B décroît également, mais en suivant une courbe différente qui se situe au-dessus de la courbe de première aimantation. Ceci est le fait d'un retard à la désaimantation. On dit qu'il y a hystérésis. Voir figure.

Lorsque H est ramené à 0, il subsiste un champ magnétique B_r appelé champ rémanent (du latin *remanere*, rester). Pour annuler ce champ rémanent, il est nécessaire d'inverser le courant dans le solénoïde, c'est-à-dire d'imposer à H une valeur négative. Le champ magnétique s'annule alors pour une valeur de l'excitation H_c appelée champ coercitif.



Diamagnétisme

Le diamagnétisme est un comportement des matériaux qui les conduit, lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, à générer un autre champ magnétique opposé, créé par une très faible aimantation. Lorsque le champ n'est plus appliqué, l'aimantation disparaît. Le diamagnétisme est un phénomène qui apparaît dans toute la matière atomique, mais il est masqué par les effets du paramagnétisme ou du ferromagnétisme lorsque ceux-ci coexistent avec lui dans le matériau.

La description classique est : Quand on applique un champ magnétique, le flux magnétique passant à travers la surface décrite par la trajectoire fermée de l'électron est modifié. L'électron réagit selon le phénomène classique d'induction, ce qui induit un moment magnétique opposé et proportionnel au champ appliqué. C'est l'origine du diamagnétisme.

Paramagnétisme

Le paramagnétisme désigne en magnétisme le comportement d'un milieu matériel qui ne possède pas d'aimantation spontanée mais qui, sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, acquiert une aimantation dirigée dans le même sens que ce champ d'excitation. Un matériau paramagnétique possède donc une susceptibilité magnétique de valeur positive (contrairement aux matériaux diamagnétiques), en général assez faible. Cette aimantation disparaît lorsque le champ d'excitation est coupé, il n'y a donc pas de phénomène d'hystérésis comme pour le ferromagnétisme.

À l'échelle microscopique, on peut décrire un matériau paramagnétique comme un ensemble de dipôles magnétiques indépendants. La réponse du système à un champ magnétique appliqué est alors déterminée par le rapport de forces entre l'énergie magnétique d'une part qui tend à ordonner les dipôles en les alignant selon le champ appliqué, et l'énergie d'agitation thermique d'autre part qui favorise le désordre.

Lorsque les atomes possèdent leur propre moment magnétique permanent, le diamagnétisme (toujours présent) est masqué par le paramagnétisme. Sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, ces atomes, petits aimants permanents, s'orientent selon le champ appliqué et l'amplifient. Ce phénomène est limité par l'agitation thermique et dépend fortement de la température (loi de Curie)

Ferromagnétisme

Les matériaux ferromagnétiques sont des corps qui ont la capacité de s'aimanter sous l'effet d'un champ magnétique extérieur et de garder cette aimantation. Il en existe deux sous catégories, à savoir les ferromagnétiques durs (qui sont utilisés pour fabriquer des aimants permanents) et les ferromagnétiques doux. L'aimantation rémanente est due à un ordre à l'échelle microscopique et par un ordre à l'échelle du matériau (domaine de Weiss).

En effet, lorsqu'un matériau est ferromagnétique, il est divisé en domaines, appelés domaines de Weiss, à l'intérieur desquels l'orientation magnétique est identique. Chaque domaine se comporte alors comme un aimant. Ces domaines sont séparés par des parois dites parois de Bloch.

Ces domaines n'existent pas lorsque les dimensions du matériau sont très faibles (quelques nm). Ces matériaux sont dits nanocristallins.

Le déplacement de ces parois est responsable des phénomènes d'hystérésis. Les anisotropies magnétiques expliquent les axes d'aimantation faciles.

Corps Ferromagnétiques

Pour l'usage industriel, le fer, le cobalt et le nickel sont les matériaux ferromagnétiques les plus utilisés. De plus, certaines terres rares (les Lanthanides dans la classification périodique) sont également ferromagnétiques à basse température et utilisées dans l'industrie.

En ce qui concerne les alliages, la situation est très complexe : certains alliages de fer et de nickel ne sont pas ferromagnétiques (ex: acier inoxydable austénitique), alors que l'alliage

d'Heusler, constitué uniquement de métaux non ferromagnétiques (61 % Cu, 24 % Mn, 15 % Al), est ferromagnétique.

Enfin, il faut ajouter les ferrites, dont la composition est de la forme ($MO ; Fe_2O_3$) où M est un métal divalent et dont le représentant le plus ancien est la magnétite Fe_3O_4 ($FeO ; Fe_2O_3$).

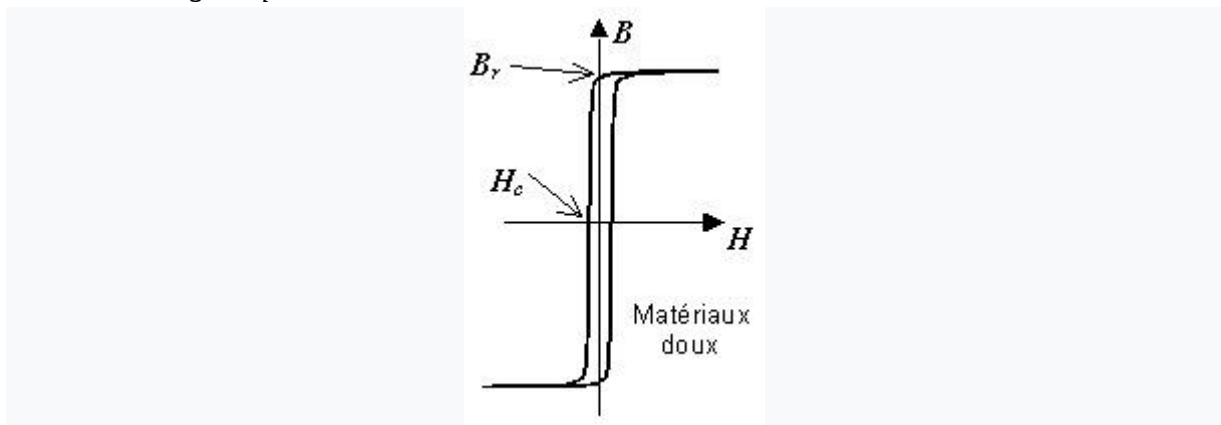
Conséquences de l'hystérésis pour des matériaux ferromagnétiques

L'aimantation de la matière absorbe de l'énergie qui n'est que partiellement restituée au cours de la désaimantation. Cette énergie est dissipée sous forme calorifique : le matériau s'échauffe. On démontre que les pertes par hystérésis sont proportionnelles à l'aire du cycle d'hystérésis et à la fréquence de la tension d'alimentation.

Dans le cas où une substance ferromagnétique doit décrire un grand nombre de cycles d'hystérésis (machines tournantes, transformateurs...), il faut choisir des matériaux tels que l'aire du cycle soit aussi petite que possible. Ces matériaux sont dits magnétiquement « doux. »

À l'opposé, c'est grâce à une hystérésis importante que l'on peut réaliser des aimants permanents. On utilise pour leur fabrication des matériaux magnétiquement durs : certains aciers à l'aluminium, au nickel ou au cobalt conviennent parfaitement. On réalise aussi des aimants avec de la poudre de fer agglomérée dans un isolant.

Matériaux magnétiques doux

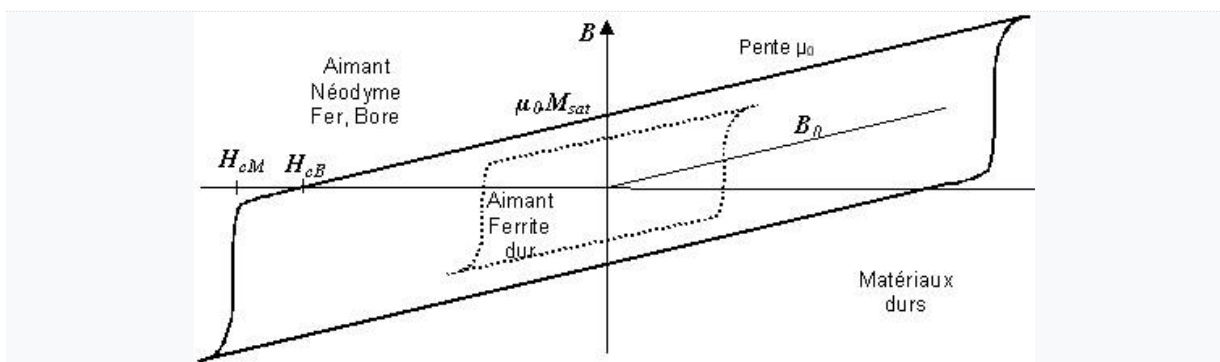


La particularité des matériaux ferromagnétiques doux est que l'action de créer ou d'annuler l'aimantation dans le matériau nécessite moins d'énergie que pour les matériaux ferromagnétiques durs. Les ferromagnétiques doux sont utilisés dans les transformateurs, les électro-aimants ou dans toute application dans laquelle le matériau travaille à haute fréquence. Ils possèdent un champ coercitif très faible avec une très forte susceptibilité. C'est cette forte susceptibilité qui permet d'obtenir une forte induction à partir d'un faible champ extérieur et ainsi être utile dans les électro-aimants ou à la canalisation des lignes de champs. Un faible champ coercitif et une forte susceptibilité entraînent l'étroitesse du cycle d'hystérésis. L'aire de ce cycle représente l'énergie dissipée sous forme de chaleur lors d'un parcours complet du cycle, appelée « pertes magnétiques ».

Les matériaux magnétiques doux sont utilisés pour réaliser des électroaimants (leur aimantation doit pouvoir facilement être annulée) ou des circuits magnétiques fonctionnant en régime alternatif (machines électriques, transformateurs).

Matériaux magnétiques durs

Les matériaux ferromagnétiques durs possèdent une aimantation naturelle présente en absence de champ magnétique extérieur, ainsi qu'un champ coercitif et une rémanence élevés. Le cycle d'hystérésis des ferromagnétiques durs est aplati et allongé sur l'axe des abscisses. Les matériaux ferromagnétiques durs sont à la base des aimants permanents, et notamment des aimants à forte puissance.



Contrairement aux précédents, les cycles sont extrêmement larges : plusieurs centaines de kA m^{-1} . Il est impossible de les dessiner dans un même repère que les précédents.

Certains de ces matériaux à base de terres rares (alliages samarium-cobalt ou néodyme-fer-bore) ne se désaimantent pas, même lorsqu'on annule le champ magnétique interne (l'excitation vaut alors H_{cB}). Pour annuler (en fait inverser) l'aimantation, il est nécessaire de fournir une excitation magnétique que l'on appelle H_{cM} : excitation de désaimantation irréversible.

L'application de ces matériaux est la réalisation d'aimants permanents de très forte puissance. Les ferrofluides sont des suspensions de particules aimantées de taille nanométrique dans un liquide. Ces liquides réagissent à un champ magnétique extérieur (par exemple, leur surface se hérissé de pointes).

Origine microscopique du ferromagnétisme

Lorsqu'un matériau est ferromagnétique ou ferrimagnétique, il est divisé en domaines, appelés domaines de Weiss, à l'intérieur duquel l'orientation magnétique est identique. Ce domaine se comporte alors comme un aimant. Ces domaines sont séparés par des parois dites parois de Bloch.

Ces domaines n'existent pas lorsque les dimensions du matériau sont très faibles (quelques nm). Ces matériaux sont dits nanocristallins.

Le déplacement de ces parois est responsable des phénomènes d'hystérésis.

II – MATERIAUX MAGNETIQUES DOUX – CIRCUITS MAGNETIQUES

Un circuit magnétique est un circuit généralement réalisé en matériau ferromagnétique au travers duquel circule un flux de champ magnétique.

Le champ magnétique est généralement créé soit par des enroulements enserrant le circuit magnétique et traversés par des courants, soit par des aimants contenus dans le circuit magnétique.

Lorsque plusieurs circuits électriques sont bobinés autour d'un même circuit magnétique, ils constituent des circuits magnétiquement couplés.

Il est constitué d'un assemblage de pièces en matériaux ferromagnétiques. Il peut comprendre un entrefer : petit espace d'air dans le circuit. Cet entrefer peut être :

- structurel : c'est le cas dans les machines tournantes où le rotor est séparé du stator par un entrefer que l'on souhaite le plus petit possible ;
- intentionnel : permet d'éviter la saturation du circuit magnétique et confère une plus grande linéarité à l'inductance ainsi créée.

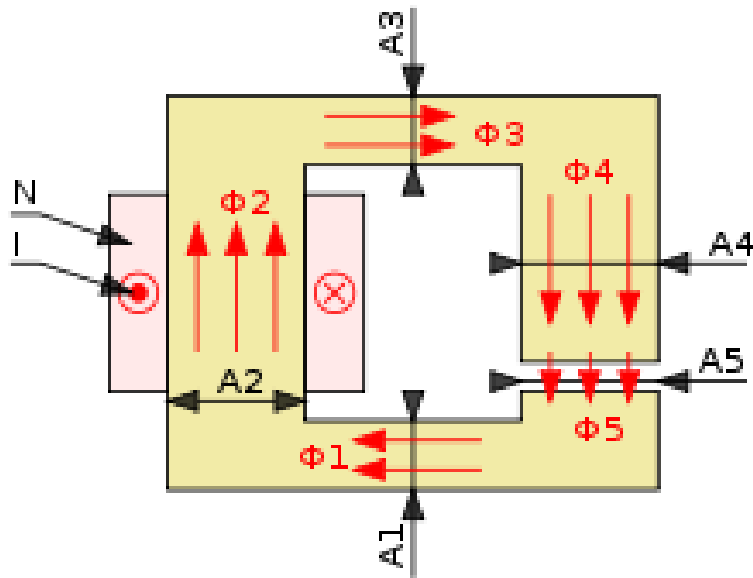
Si le circuit magnétique est soumis à un champ magnétique périodique de fréquence faible il est nécessaire dans ce cas de limiter les pertes magnétiques :

- Les pertes par hystérésis sont limitées par l'utilisation de matériaux à cycle étroit.
- Les pertes par courants de Foucault sont limitées par un feuilletage du circuit magnétique : En remplacement d'une pièce massive, on procède à un empilage de tôles isolées les unes des autres. L'isolation a pour but d'empêcher la circulation de courants d'une plaque à l'autre.

Si le circuit magnétique est soumis à un champ magnétique périodique haute fréquence, et puisque les pertes par courants de Foucault augmentent en fonction du carré de la fréquence, ces circuits doivent être réalisés à l'aide de matériaux ferromagnétiques isolants.

- Les ferrites sont des oxydes mixtes de Fer III et d'autres métaux M divalents (M peut être également le fer. Dans ce cas le ferrite obtenu s'appelle la magnétite). Les plus utilisés pour la constitution de circuits magnétiques sont les ferrites à base de zinc (Zn) et/ou de manganèse (Mn).
- Les matériaux nanocristallins sont des agglomérats de cristaux dont la taille est de l'ordre de la dizaine de nanomètres, noyés dans une phase amorphe. Ils sont constitués de fer, d'autres métaux (cuivre, niobium) et de métalloïdes (carbone, silicium, bore). Leurs excitations coercitives étant très faibles, de l'ordre de l'A/m, ils présentent un cycle d'hystérésis très étroit.

Un circuit magnétique typique est montré ci-dessous



Analogie d'Hopkinson

Cette analogie consiste à faire un parallèle entre les circuits électriques et les circuits magnétiques.

Circuits électriques	Circuits magnétiques
Intensité du courant électrique	Flux du champ magnétique dans le circuit
Résistance	Réductance
Permittivité	Perméabilité
Force électromotrice	Force magnétomotrice

Pour un circuit magnétique homogène, c'est-à-dire constitué d'un seul matériau et de section homogène, la réductance est donnée par :

$$R = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S}$$

avec

μ la perméabilité magnétique en H / m, l la longueur en mètres, et S la section en m².

Si l'épaisseur de l'entrefer est grande, il n'est plus possible de considérer que les lignes de champ magnétique restent perpendiculaires à l'entrefer. On doit alors tenir compte de l'épanouissement du champ magnétique c'est-à-dire considérer que la section S est plus grande que celle des pièces métalliques de part et d'autre de l'entrefer.

Si le circuit est hétérogène les lois d'association des réluctances permettent de calculer celle d'un circuit magnétique de forme complexe ou composé de matériaux aux caractéristiques magnétiques différentes. On décompose ce circuit en tronçon homogène, c'est-à-dire de même section et constitué du même matériau.

Calcul des circuits

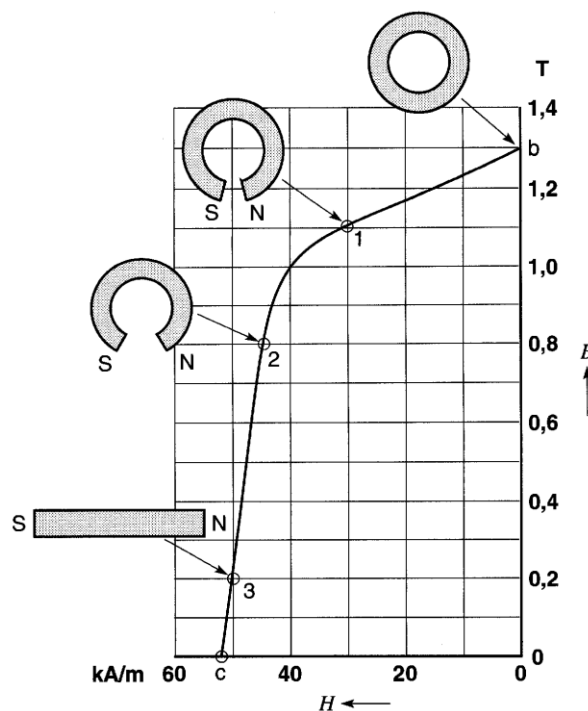
En général les circuits magnétiques sont saturés, et on doit utiliser les courbes d'aimantation des matériaux utilisés ou les graphes des perméabilités en fonction du champ magnétique. Ces calculs, en général, demandent la fmm nécessaire pour produire un flux donné en un point du circuit ou le calcul de l'induction créée par l'ensemble des courants alimentant le circuit.

Les exercices de Travaux dirigés montrent comment y procéder.

III – MATERIAUX MAGNETIQUES DURS – AIMANTS PERMANENTS

Pour fabriquer des aimants permanents puissants, on a recours à divers alliages de : fer, aluminium, cobalt, cuivre etc. Un alliage fort puissant est l'Alnico V (Al + Ni + Co + Cu + Fe). Il est 25 fois plus petit qu'un aimant en acier trempé créant le même champ.

La densité de flux rémanent B_r correspond à celle obtenue dans un circuit magnétique fermé. Pour rendre ce flux accessible on doit y ouvrir un entrefer. En agissant ainsi on observe que la densité de flux diminue quand l'entrefer augmente, passant successivement par les points b, 1, 2, 3, sur la courbe de désaimantation B-H du matériau, comme sur la figure.



Le champ H et, par conséquent, la fmm développée par un aimant dépendent donc de B . Connaissant les dimensions de l'aimant, on peut calculer la fmm et le flux qu'il produit. Le flux est donné par $\Phi = B \times \text{section de l'aimant}$ et la fmm = $H \times \text{longueur de l'aimant}$.

Produit énergétique

Dans la plupart des montages comportant un aimant permanent, on désire produire un flux dans un entrefer dont la longueur et la section sont connues. Comme la valeur de H n'est pas constante mais varie avec B , on choisit le point dans la courbe de désaimantation qui donne le produit BH maximal. Ceci assure une quantité minimale de matériau magnétique. Ce produit max est appelé le produit énergétique de l'aimant