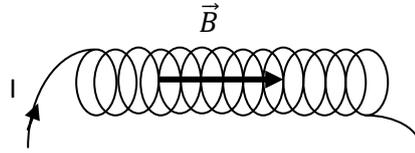


Propriétés magnétiques des matériaux

1. Production d'un champ magnétique

Une bobine parcourue par un courant produit un champ magnétique suivant l'axe du solénoïde :



Le champ magnétique a une intensité : $B = \mu_0 \frac{N}{L} I$ en Tesla T

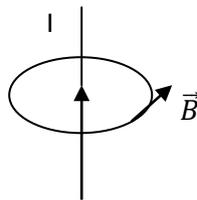
N est le nombre de spire, L la longueur de la bobine, I l'intensité du courant. μ_0 est la perméabilité magnétique du vide est vaut $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ uSI.

La direction est donnée par la règle du tire-bouchon. Le tire-bouchon que l'on enfonce dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens du courant est dans la direction du champ magnétique.

Le solénoïde est équivalent à un aimant avec un pôle nord et un pôle sud :



De même, un fil parcouru par un courant produit un champ magnétique circulaire :



2. Susceptibilité magnétique d'un matériau

On place un barreau métallique dans le solénoïde parcouru par un courant. Il est donc soumis à un champ magnétique extérieur $B_0 = \mu_0 H$. H est l'excitation magnétique en $A \cdot m^{-1}$.

On mesure alors un champ magnétique résultant $B = \mu H = \mu \frac{B_0}{\mu_0} = \mu_r B_0$ où μ_r est la perméabilité magnétique relative.

En notant, $\mu_r = 1 + \chi$ où χ est la susceptibilité magnétique, on pourra écrire :

$$B = \mu_r B_0 = (1 + \chi) B_0 = \mu_0 H + \mu_0 M$$

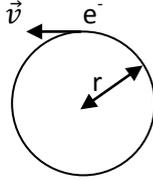
où M est le vecteur aimantation en $A \cdot m^{-1}$ avec $\chi = M / H$.

3 cas se présentent :

μ_r	χ	
≤ 1	≤ 0	Diamagnétique
≥ 1	≥ 0	Paramagnétique
$\gg 1$	$\gg 0$	Ferromagnétique

3. Le moment magnétique associé aux électrons

Chaque électron contribue au magnétisme du matériau.



On peut définir :

- Sa quantité de mouvement $\vec{p} = m \vec{v}$
- Comme le mouvement de l'électron autour du noyau est circulaire, on définit plutôt son moment cinétique $\sigma = m v r$
- Son moment magnétique $M = I S$ avec $I = \frac{dq}{dt} = \frac{e}{t} = \frac{ev}{2\pi r}$ et $S = \pi r^2$.
Donc, $M = \frac{evr}{2} = \frac{e\sigma}{2m}$ en $A.m^2$

Le moment cinétique est quantifié : il est $\sigma = n \frac{h}{2\pi}$ où n est un des nombres quantiques s ou m .

Le moment magnétique élémentaire de chaque électron, appelé moment de Bohr,

$$\text{est : } M_B = \frac{eh}{4\pi m_e} = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ A.m}^2$$

On note que pour une aimantation donnée $M/M_B = n$ le nombre de magnétons par m^3 .

4. Nature des différentes formes de magnétisme

a. Le diamagnétisme

En appliquant un champ magnétique extérieur à un matériau, la loi de Lenz conduit à ce qu'un champ magnétique opposé apparaisse. Le champ résultant est donc plus petit que le champ inducteur.

Le diamagnétisme est un phénomène faible qui sera masqué par les autres formes de magnétisme dont l'intensité est plus forte et qui sont liés à un nombre impair d'électrons.

Le diamagnétisme nécessite un nombre pair d'électrons, que tous les électrons soient appariés. Les gaz rares, H_2 , N_2 ... sont diamagnétiques mais pas O_2 .

N'étant pas lié à un ordre, le diamagnétisme ne dépend pas de la température.

b. Le paramagnétisme

Hors de la présence d'un champ magnétique, les électrons célibataires s'orientent dans le désordre. En présence d'un champ magnétique, ils s'orientent tous dans le sens du champ et par conséquent le renforce.

Le paramagnétisme est donc moins fort quand la température augmente. Il suit la loi de Curie $\chi = \frac{C}{T}$.

Les métaux alcalins, alcalino-terreux, l'aluminium, les métaux de transition ayant des électrons célibataires sont paramagnétiques.

Par contre, l'oxygène O_2 est paramagnétique donc il n'y a pas de double liaison entre les 2 atomes contrairement à ce que l'on pourrait penser. La structure de la molécule est expliquée par la théorie des orbitales moléculaires qui explique la présence de 2 électrons célibataires.

c. Le ferromagnétisme

Quelques éléments s'aimantent fortement en présence d'un champ magnétique extérieur et même peuvent conserver de façon permanente cette aimantation. Ces éléments ont tous une sous-couche 3d ou 4d incomplète.

C'est le cas typiquement du fer de structure électronique $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 2p^6 4s^2 3d^6$:



Les spins des 4 électrons célibataires se couplent, ce qui renforce le champ magnétique.

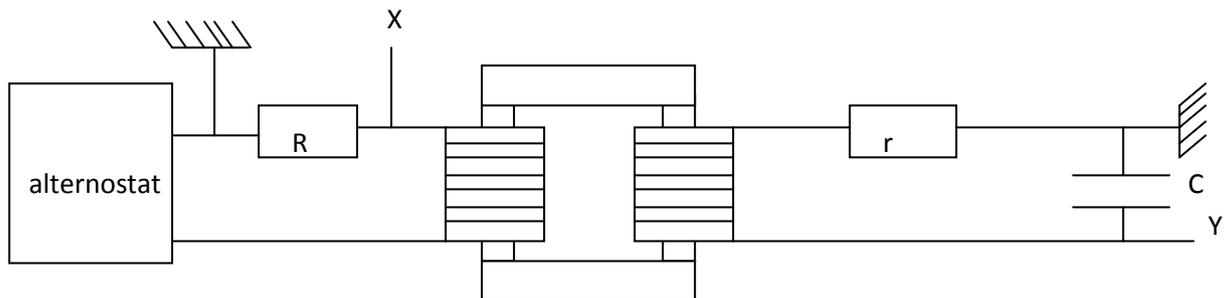
L'aimantation diminue quand la température augmente. Au dessus de la température de Curie $T_c = 768\text{ }^\circ\text{C}$, le fer devient paramagnétique.

Le cobalt, le nickel, les ferromanganèses, ferromagnésiens, ferrocobalts sont aussi ferromagnétiques.

5. Le cycle d'hystérésis des matériaux magnétiques

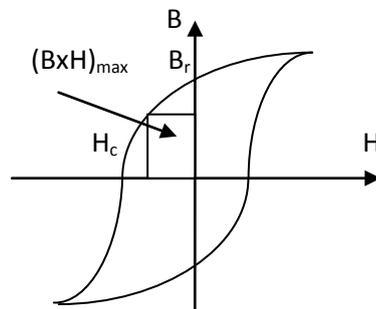
a. Tracé du cycle

Afin de visualiser le cycle sur l'oscilloscope $Y = f(X)$, on réalise le circuit suivant où un courant alternatif alimente un transformateur constitué de 2 bobines :



Sur la voie X, on a $u_R = R i$. On visualise B_0 ou H.

Sur la voie Y, on $u_c = \frac{q}{C} = \frac{\int i dt}{C} = \frac{1}{RC} \int e dt$ or $e = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d(NbS)}{dt}$ donc $u_c = \frac{NS}{RC} b$. On visualise B.



B_r est le champ rémanent lorsque le champ inducteur est nul.

H_c est l'excitation coercitive nécessaire afin d'annuler le champ rémanent.

Plus le cycle est large, plus le matériau magnétique est dur. Ils sont utilisés pour les aimants permanents.

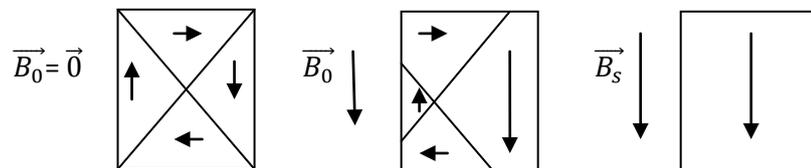
		B_r en T	H_c en $A.m^{-1}$	$(B \times H)$ en $kJ.m^{-3}$	ρ en $\Omega.m$
Acier au W	92,8 % Fe, 6 % W	0,95	5900	2,6	$3,0.10^{-7}$
Cunife	20 % Fe, 20 % Ni, 60 % Cu	0,54	44.000	12	$1,8.10^{-7}$
Alnico	34 % Fe, 7 % Al, 35 % Co + Ni, Ti, Cu	0,76	125.000	36	
Ferrite	BaO-6 Fe_2O_3	0,32	240.000	20	10^4

A l'opposé, un faible champ coercitif caractérise un matériau doux. On notera que ces matériaux perdent peu d'énergie lors de cycles d'aimantation et désaimantation. Ils laissent passer le courant sauf s'ils comportent des impuretés et des défauts.

		μ_r	B_s en T	Perte d'énergie par cycle en $J.m^{-3}$	ρ en $\Omega.m$
Fer	99,95 %	150	2,14	270	$1,0.10^{-7}$
Fer-silicium	97% Fe	1400	2,01	40	$4,7.10^{-7}$
Permalloy 45	55 % Fe, 45 % Ni	2500	1,6	120	$4,5.10^{-7}$

b. Interprétation par les domaines de Weiss

On considère que le matériau est formé de domaines qui ont une orientation magnétique donnée. Chaque domaine est séparé par des parois, appelées parois de Bloch. Plus le champ magnétique extérieur grandit, plus le domaine de même orientation augmente de surface. Cela correspond à la schématisation suivante :

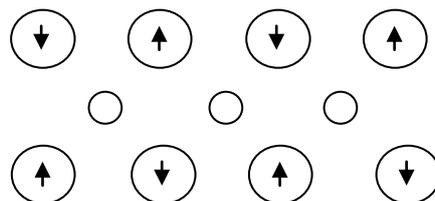


6. D'autres formes de magnétisme

a. L'antiferromagnétisme

Il est tel que le matériau ne présente pas de magnétisme car les spins des électrons des atomes voisins sont opposés.

C'est le cas pour l'oxyde de manganèse MnO . Les ions O^{2-} ne présentent pas globalement de magnétisme par contre les ions Mn^{2+} sont représentés de la façon suivante :



b. Le ferrimagnétisme

Ces matériaux ont un magnétisme permanent tel la magnétite Fe_3O_4 . On peut écrire la magnétite $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3$ formée d'ions O^{2-} sans magnétisme et d'ions Fe^{2+} et Fe^{3+} dont le magnétisme est semblable à l'antiferromagnétisme. L'organisation des ions et leur nombre sont tels que les ions Fe^{3+} ont globalement un magnétisme nul alors que les ions Fe^{2+} sont tous avec un spin orienté dans le même sens.

Le YIG (yttrium iron garnet) appelé aussi grenat d'yttrium de formule $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ est l'un des aimants permanents les plus utilisés. Etant des céramiques peu conductrices, ils permettent de réduire les pertes par courants de Foucault.