

Propriétés magnétiques.

Dans ce chapitre nous allons étudier les propriétés magnétiques des matériaux. Beaucoup des technologies modernes reposent sur le magnétisme et les matériaux magnétiques. Ceux-ci incluent générateurs d'électricité, transformateurs, moteurs électriques, radio, téléphones, ordinateurs, et des composants des appareils de reproduction vidéo et sonores.

Des exemples bien connus comme matériaux magnétiques sont le fer, quelques aciers. Néanmoins, tous les matériaux réagissent avec un plus grand ou petit degré au champ magnétique. Nous allons voir l'origine du champ magnétique et le phénomène de diamagnétisme, paramagnétisme, ferromagnétisme, antiferromagnétisme et ferrimagnétisme.

1 Concepts basiques.

Afin de comprendre les propriétés magnétiques, il nous devons comprendre quelques concepts basiques :

- **Vecteurs magnétiques :**

Le **champ magnétique** est désigné par H . Il est généré par les bords d'une bobine cylindrique avec N tours sur la quelle on fait passer un courant I . Si longueur de la bobine est l , le champ magnétique généré est :

$$H = \frac{NI}{l}$$

Les unités du champ magnétique sont Amp/ m.

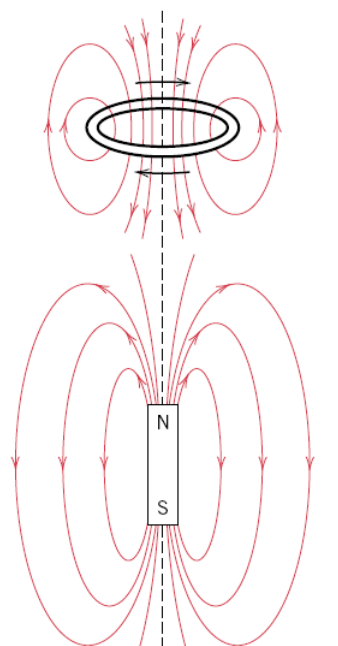
L'induction magnétique ou densité du **flux magnétique**, dénoté par B , représente la magnitude du champ interne dans un matériau qui est exposé à un champ magnétique. Les unités de B sont des Teslas (T).

Les deux, B et H sont des vecteurs, cela veut dire qu'ils ont une valeur et une direction.

B et H sont liés par biais de la perméabilité magnétique μ , qui est une propriété intrinsèque du matériau (milieu). μ_0 est la perméabilité du vide. On peut définir une perméabilité relative μ_r qui est la relation entre la perméabilité du matériau et celle du vide.

Un autre concept important est celui de la **magnétisation** M , qui vient définie par la relation :

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 \mu_r H$$



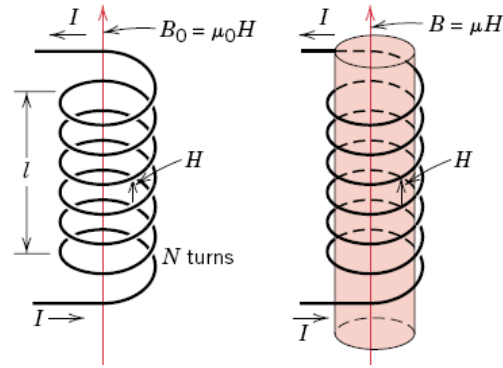
Avec la présence d'un champ H , les moments magnétiques dans un matériau ont tendance à s'aligner avec le champ. Le résultat est qu'ils renforcent l'effet du champ magnétique par le biais des moments magnétiques. La magnitude de M est proportionnel au champ appliqué de la façon suivante :

$$M = \chi_m H$$

Où $\chi_m = \mu_m - 1$, χ_m est la susceptibilité magnétique et μ_m la permittivité magnétique.

On a donc :

$$B = \mu_0(1 + \chi_m)H = \mu_0\mu_m H$$

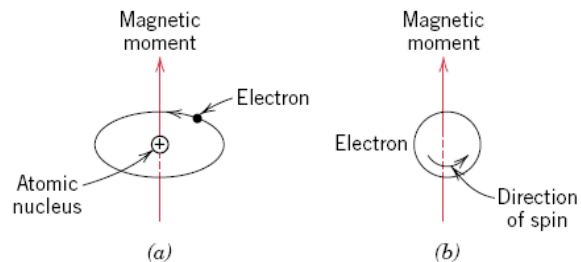


- **Origine des moments magnétiques :**

Dans les matériaux magnétiques on trouve des dipôles au niveau atomique ou moléculaire qui se comportent comme des petits aimants. L'origine de ces moments sont les moments magnétiques associés au spin des électrons de l'atome.

Le moment magnétique le plus fondamental est le magnétron de Bohr, μ_B . Le moment magnétique des électrons est $\pm\mu_B = \pm 9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$.

Pour chaque atome individuel, les moments magnétiques de paires d'électrons sont annulés. Par exemple, le moment magnétique d'un électron spin-up sera annulé par celui d'un électron spin-down.



Pour un atome qui a rempli toutes les coquilles électroniques, le moment magnétique final est zéro et ne peut pas être magnétisé de forme permanente. Les matériaux qui exhibent des fortes propriétés magnétiques devront avoir des atomes qui n'ont pas les coquilles avec des paires d'électrons.

Les types de magnétisme dans les matériaux seront compris par rapport à l'existence ou pas de moments magnétiques au sein du matériau et par rapport à comment ils réagissent au champ magnétique.

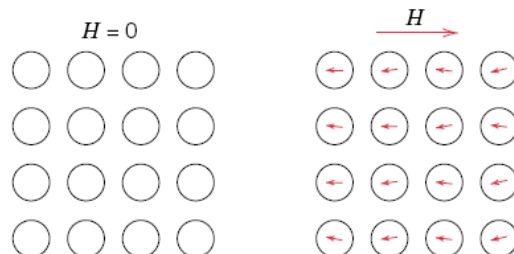
2 Types de magnétisme dans les matériaux.

- **Diamagnétisme :**

Il s'agit d'une forme très faible de magnétisme qui n'est pas permanente et qui existe seulement pendant que le champ est appliqué. Il est présent dans tous les matériaux, mais peut être mesuré spécialement dans des matériaux faits avec des éléments avec les coquilles d'électrons remplies complètement.

Le diamagnétisme est induit par le mouvement des électrons comme réponse au champ magnétique. La magnitude du moment magnétique est extrêmement petite et $\mu_m < 1$. Ceci veut dire que le champ

magnétique dans le matériau est inférieur que dans le vide. Quand ces matériaux sont exposés à un fort champ magnétique, ils ont tendance à bouger dans les zones où le champ est plus faible.

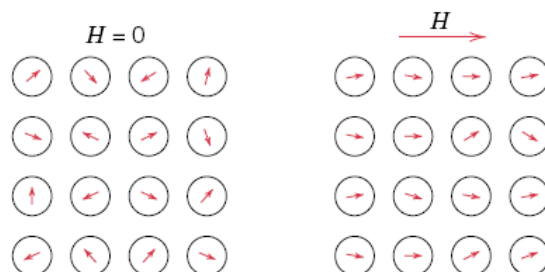


La figure ci-dessus montre les configurations des dipôles magnétiques pour un matériau diamagnétique.

- **Paramagnétisme :**

Quelques atomes possèdent un moment magnétique parce que les électrons ne peuvent pas être regroupés par paires. Ceci veut dire qu'ils ont un petit moment magnétique non-nul. Dans l'absence de champ magnétique externe, les dipôles sont orientés de façon désordonnée car ils n'interagissent pas entre eux. Lorsque l'on applique un champ magnétique, ils peuvent s'aligner ce qui donne lieu à un moment magnétique dans le matériau. Dans ce cas, nous trouvons $\mu_m > 1$. La susceptibilité est relativement petite entre 10^{-5} et 10^{-2} .

Lorsque le champ magnétique est retiré, le matériau perd sa magnétisation.



Les matériaux dia et paramagnétiques sont considérés comme non-magnétiques car ils exhibent une magnétisation seulement que si un champ magnétique est appliqué et que cette magnétisation est extrêmement petite.

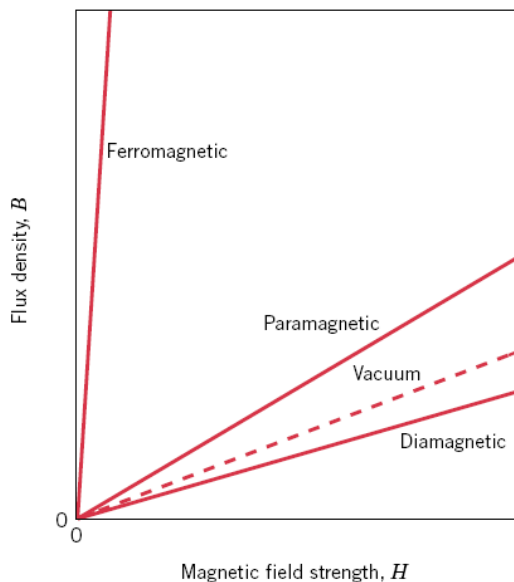
- **Ferromagnétisme :**

Certains matériaux exhibent un moment magnétique permanent dans l'absence de champ magnétique externe. Leur magnétisation est aussi très importante. Il s'agit de métaux de transition comme le fer (dans la phase bcc alpha ferrite), cobalt, nickel, et quelques terres rares comme le gadolinium. Ces matériaux ont des susceptibilités qui peuvent arriver à 10^6 . Ceci veut dire que $H \ll M$ et donc :

$$B \cong \mu_0 M$$

Les moments magnétiques permanents dans les matériaux ferromagnétiques résultent des moments magnétiques du spin des électrons. En plus, les moments magnétiques ont une forte interaction, ce qui fait que les spins s'alignent et donc les moments magnétiques s'additionnent positivement. Les régions du matériau qui montrent le même alignement s'appellent '**domaines**'.

La magnétisation maximale (magnétisation de saturation) correspond à celle que l'on obtient quand tous les moments magnétiques du matériau sont alignés de façon parallèle. La valeur correspond au moment magnétique net par atome fois le nombre d'atomes magnétiques dans les matériaux.



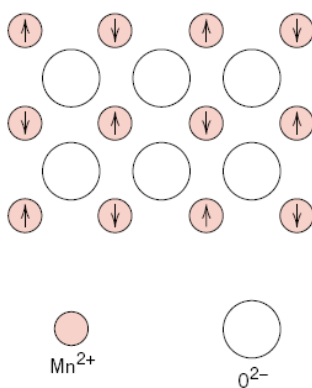
La figure de la droite montre la réponse des matériaux à un champ magnétique H . La réponse plus forte vient de la part des ferromagnétiques, dont la forte magnétisation donne lieu à une forte densité de flux B dans le matériau. Les matériaux paramagnétiques arrivent à se magnétiser un peu, ce qui donne que B dans le matériau est plus élevée que dans le vide (même si très faible). Enfin les diamagnétiques ont un effet un peu contraire et ils ont un B en réponse à H qui est légèrement plus faible que dans le vide (ils écrantent un peu le champ magnétique).

- **Antiferromagnétisme et ferrimagnétisme :**

Ici il s'agit de matériaux dans le quel les moments magnétiques peuvent s'aligner de façon antiparallèle, ce qui annule ou rend plus petite la magnétisation totale.

Dans le cas d'antiferromagnétisme, les moments magnétiques arrivent à s'annuler complètement parce que les moments magnétiques des atomes s'alignent avec la direction opposée des atomes adjacents.

Exemple : MgO . Il s'agit d'un matériau ionique formé par les ions O^{2-} et Mn^{2+} . Les ions d'oxygène n'ont pas de moment magnétique net, mais les ions de manganèse ont un moment magnétique net. Dans le cristal, les ions Mn^{2+} sont alignés de façon que ceux qui sont adjacents sont alignés de façon antiparallèle comme le montre la figure.



Le ferrimagnétisme se ressemble à l'antiferromagnétisme. Ici, les moments magnétiques adjacents s'alignent aussi de façon antiparallèle. La différence est que la magnitude des moments est différente, ce qui ne résulte pas en une cancellation totale.

Un exemple de ce type de matériaux est les ferrites cubiques. La formule chimique de ce matériau est MFe_2O_4 , où M représente un élément métallique quelconque. Le prototype est Fe_3O_4 .

Ce matériau est formé par des ions Fe^{2+} et Fe^{3+} et O^{2-} . Les ions Fe^{2+} et Fe^{3+} ont un moment magnétique de 4 et 5 μ_B , respectivement. Quand ils s'alignent de façon antiparallèle, le moment magnétique total est bien inférieur que s'ils s'alignaient de façon parallèle mais pas zéro.

Autres exemples de ferrites cubiques : $Mn, MgFe_2O_4$.

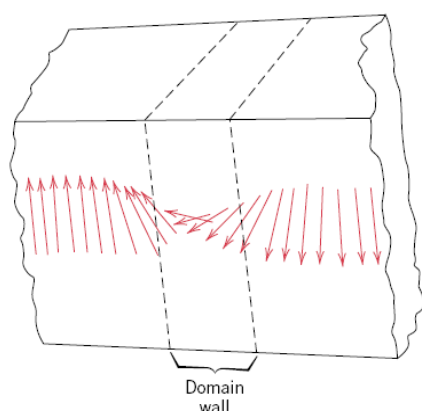
Autres exemples de matériaux ferrimagnétiques.

Les ferrites hexagonales : $AB_{12}O_{19}$, A est un élément divalent comme le Ba, Pb, B est élément trivalent comme le Al, Ga, Cr...

Les garnets : $M_3Fe_5O_{12}$ (M= terre rare, Eur, Gd Sa...)

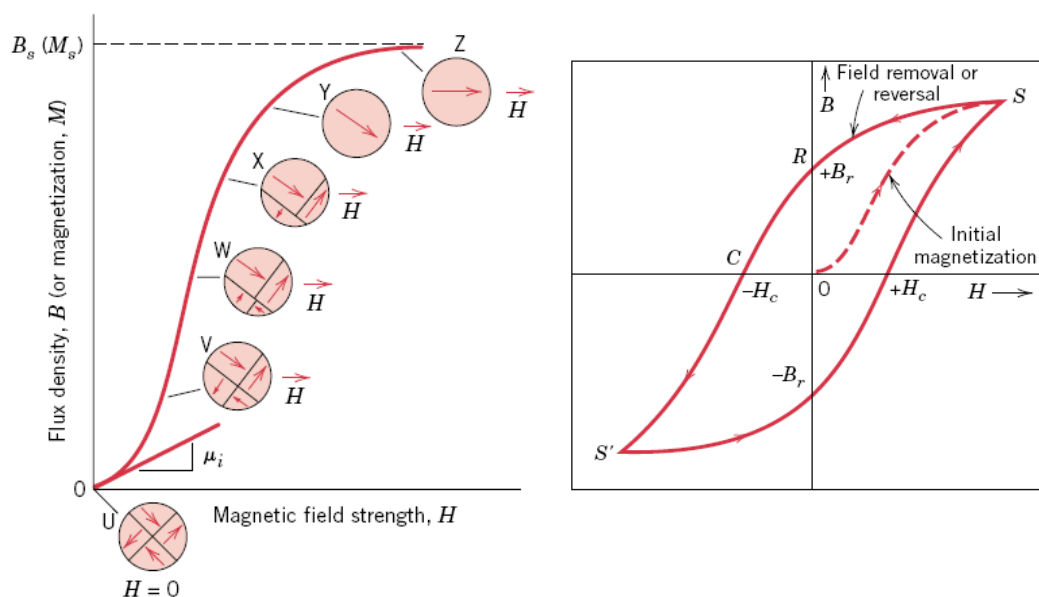
3 Domaines magnétiques et hystérèse

Pour des températures en dessous de la température de Curie (nous verrons plus tard ce que c'est), les moments magnétiques sont organisés en domaines. Il s'agit de régions où les moments magnétiques ont la même direction. La séparation entre domaines s'appelle paroi. Cette paroi a une certaine épaisseur caractérisée par le changement progressif de magnétisation.



Normalement, ces domaines ont une taille micrométrique et ne doivent pas suivre la microstructure du matériau nécessairement. En fait dans un grain cristallin d'un matériau polycristallin, ils peuvent y avoir plusieurs domaines. La magnétisation totale du matériau est donc la somme des magnétisations de tous les domaines. Lorsque nous appliquons un champ magnétique, B et H ne sont pas proportionnels

En effet, lorsque H augmente on arrive à aligner les domaines de mieux en mieux et donc B augmente de façon non linéaire. Ceci peut se voir dans la figure suivante, où nous montrons comment la magnétisation du matériau augmente en fonction de H et nous montrons en même temps l'image microscopique.

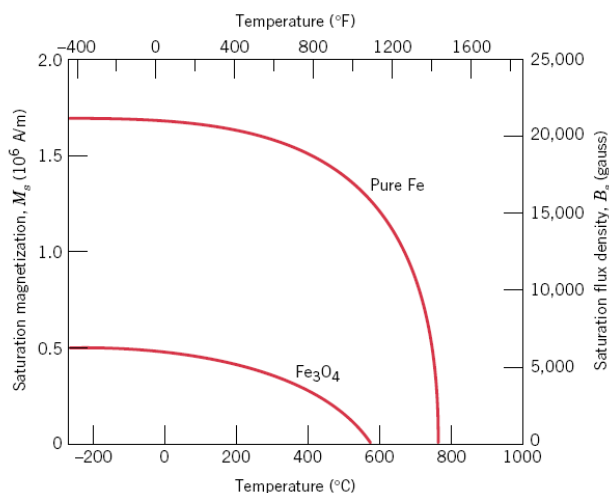


Lorsque l'on diminue H , la réponse du matériau est de désaligner les domaines. Néanmoins, il faut appliquer une certaine valeur de H pour arriver à annuler complètement H (champ coercitif H_c). Ceci

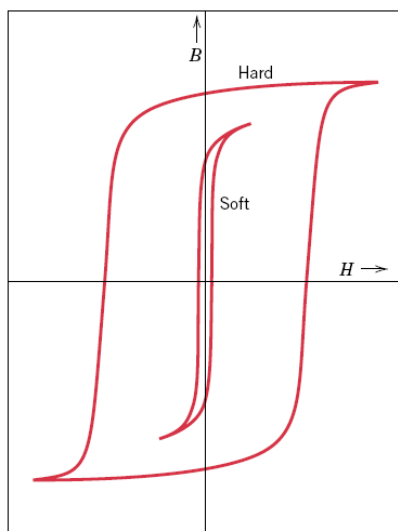
est montré dans la figure suivante. Ce genre de courbes s'appelle courbes d'hystérèse et caractérisent les propriétés magnétiques des ferromagnets.

NOTE : Tout cela s'applique aussi aux ferrimagnets.

Température de Curie : Lorsque l'on augmente la température, les moments magnétiques ont plus de mal à s'aligner en direction du champ magnétique ou de façon parallèle entre les atomes voisins. Ceci résulte en une démagnétisation. La température en dessous de laquelle le matériau ne peut plus être magnétisé s'appelle température de Curie.



4 Matériaux magnétiques durs et mous.



Comme on l'a dit ci-dessus, la forme du cycle d'hystérèse est un 'fingerprint' du matériau. Selon la largeur et la hauteur du cycle, les matériaux peuvent être classés en 'mous' ou en 'durs'.

Les matériaux magnétiques mous sont utilisés pour des dispositifs où il faut changer le signe de la magnétisation souvent et où il est nécessaire de ne pas trop dépenser d'énergie à chaque cycle. Ceci est le cas des aimants dans les transformateurs.

Les matériaux magnétiques durs ont une grande rémanence et des cycles très larges. Les applications sont celles qui ont besoin d'une magnétisation importante et relativement permanente. Un exemple sont les moteurs pour des appareils comme les perforateurs,

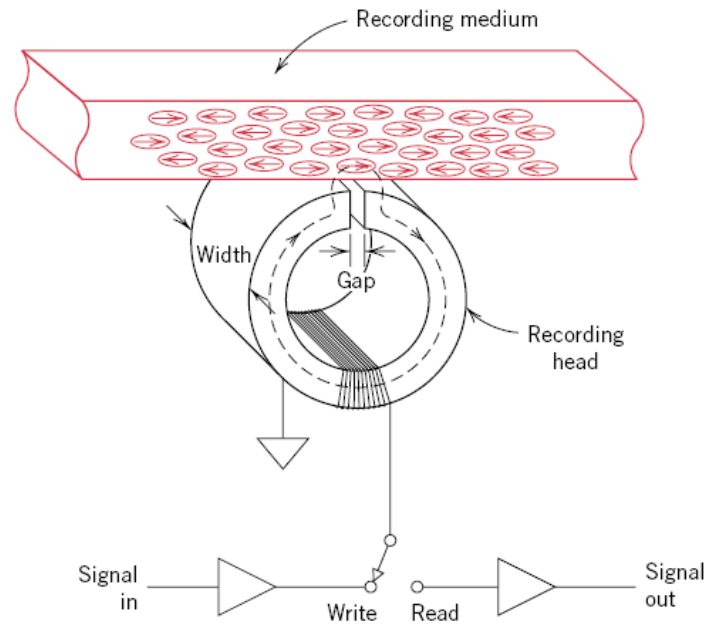
enregistreurs audio et vidéo, haut-parleurs et montres. Exemples : $SmCo_5$, $Nd_2Fe_{14}B$

NOTE : Enregistrement magnétique de l'information

Depuis des décennies, les matériaux magnétiques sont utilisés pour enregistrer l'information. Des exemples typiques sont les bandes magnétiques des cartes de crédit, tickets métro, vidéo etc. Sur ces bandes, le matériau est déposé en forme de couche mince composée par des grains. Les grains sont alignés de façon qu'il est facile de les magnétiser dans une direction ou celle opposée. Pour ceci ils ont une forme allongée.

Matériaux typiques : particules de CrO_2 ou $\gamma-Fe_2O_3$, souvent enrobées dans une couche polymérique. Chaque particule constitue un domaine magnétique.

L'écriture et lecture se fait par une petite bobine qui est capable bien de créer un champ magnétique locale ou de le lire (lorsque la bobine s'approche d'un domaine magnétique, un courant est généré). L'information est enregistrée par le biais de la magnétisation. La direction de magnétisation est interprétée par le lecteur comme des 1 ou des 0.



Dans la dernière décade, une nouvelle manière d'enregistrer l'information a été découverte. Cette manière est faite par des empilements de couches minces. Un avantage est que, depuis la découverte de la magnétoresistivité géante (prix Nobel 2009), l'information peut être lue par un lecteur résistif. Le fait que l'information est enregistrée sur des nanoparticules magnétiques de quelque dizaine de nm en largeur permet d'emmagasiner une grande densité d'information.

Matériaux typiques dans les couches minces : alliages comme le CoPtCr ou CoCrTa. Les épaisseurs typique oscillent entre 10 et 50 nm. Le substrat est souvent du Cr ou alliage de Cr. Les couches sont polycristallines avec une taille de grain entre 10 et 30 nm. Chaque grain est un domaine magnétique. Il est souhaitable que la taille et forme des domaines soit homogène.