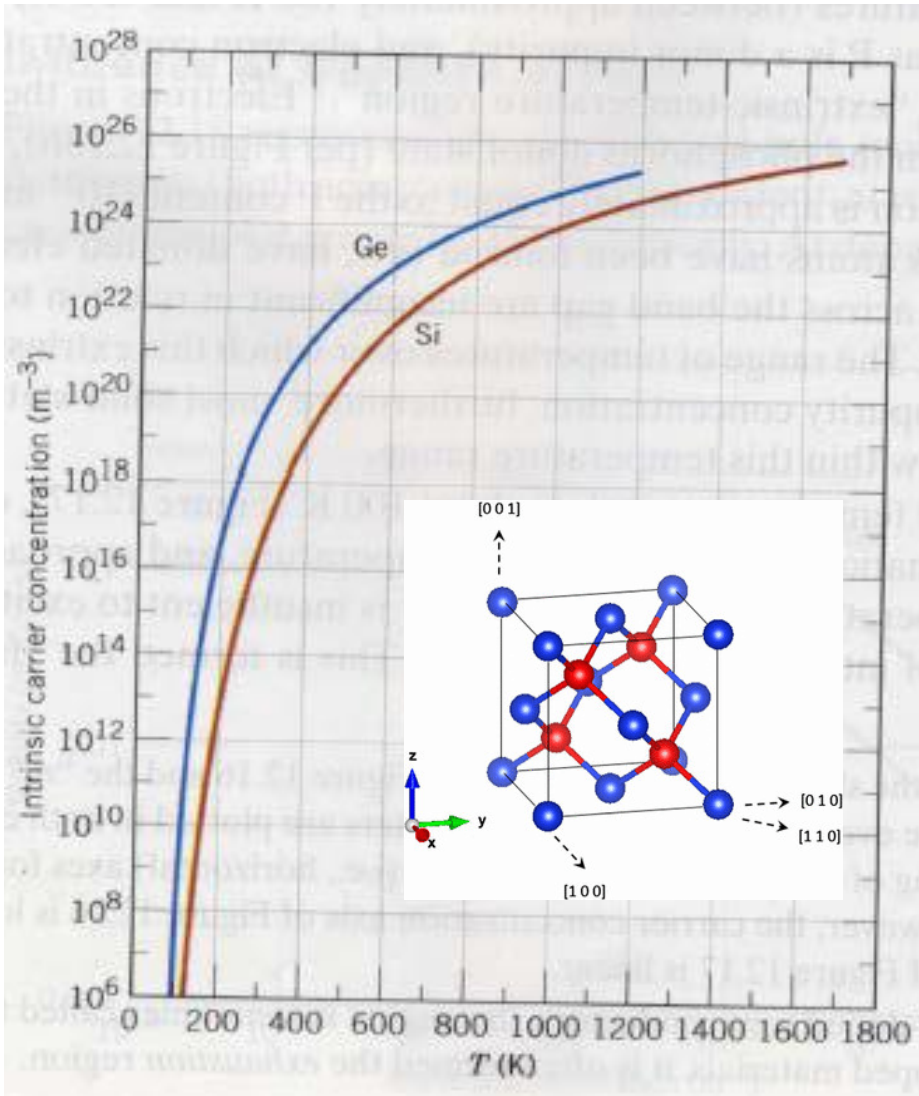


Exercice dopage (10 minutes)



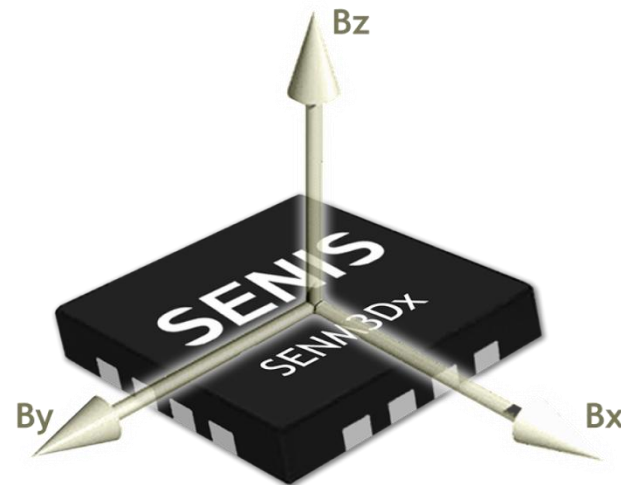
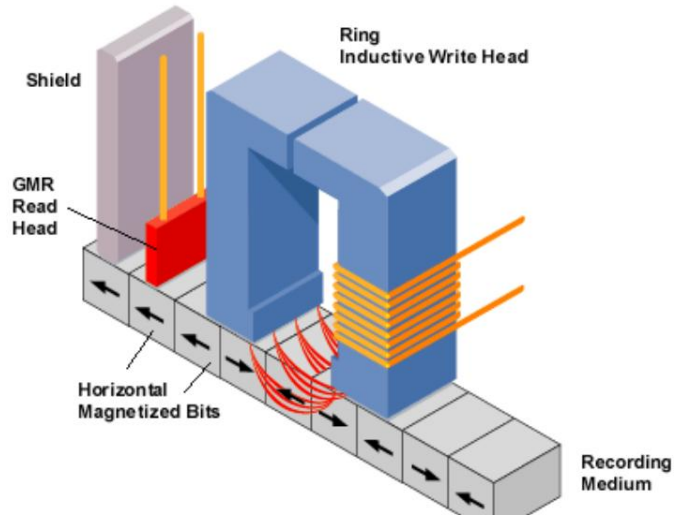
Le cellule primitive du silicium est cubique à faces centrées avec un taille de 0.54 nm. La concentration intrinsèque de porteur dans le Si est de 10^{10} cm^{-3} .

Calculez le degré de pureté d'un échantillon de Si dopé nécessaire pour augmenter la conductivité d'un factor 1'000'000.

Propriétés magnétiques

- Concepts basiques
- Type de magnétisme dans les matériaux
- Domaines magnétiques et hystérèse
- Matériaux magnétiques durs et mous
- Application: Enregistrement Magnétique et Mémoires Magnétiques

Où on trouve le magnétisme?



Prix Nobel 2007

The Nobel Prize in Physics 2007

The Nobel Prize in Physics is awarded to ALBERT FERT and PETER GRÜNBERG for their discovery of Giant Magnetoresistance. Applications of this phenomenon have revolutionized techniques for retrieving data from hard disks. The discovery also plays a major role in various magnetic sensors as well as for the development of a new generation of electronics. The use of Giant Magnetoresistance can be regarded as one of the first major applications of nanotechnology.



Fert



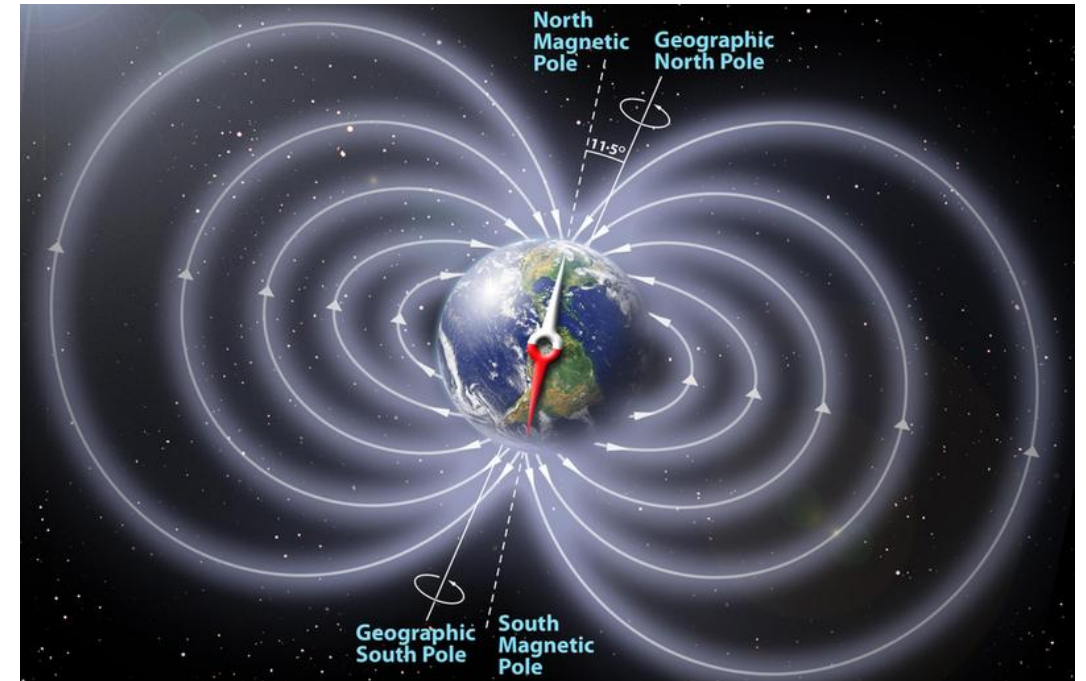
Grünberg



Albert Fert et Peter Grünberg, prix Nobel pour la physique 2007 pour la découverte de la magnétorésistance géante

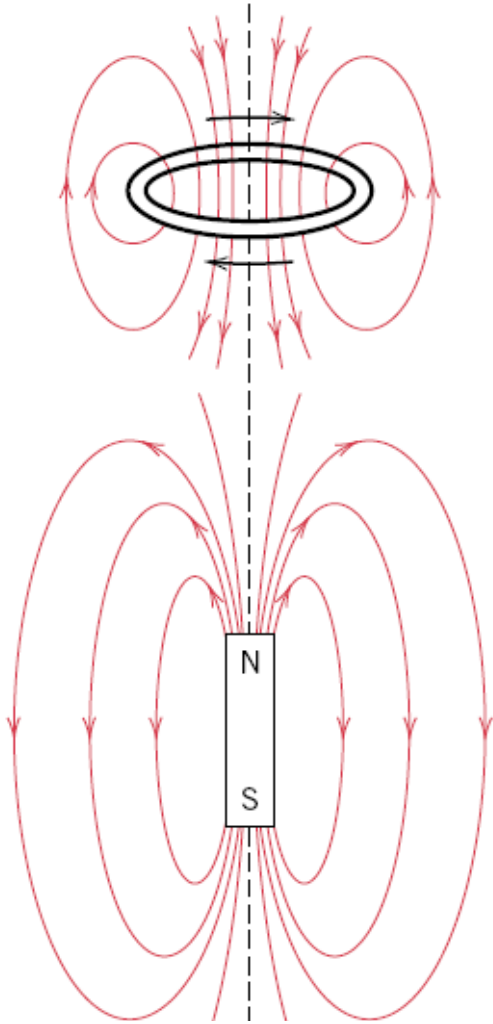
Magnétisme dans l'histoire et dans la nature

Le phénomène du magnétisme, c'est-à-dire l'attraction mutuelle de deux morceaux de fer ou de minerai de fer, était sûrement connu du monde antique. Les anciens Grecs auraient expérimenté avec cette force « mystérieuse ». On dit que le terme magnétisme vient d'une région en Turquie appelée Magnésie, qui était riche en minerai de fer.



Cette force est la réponse à un champ magnétique, qu'il soit naturel ou induit. Par exemple, le champ magnétique terrestre, également appelé champ géomagnétique, s'étend de l'intérieur de la Terre jusqu'à l'espace. Ce champ est généré par des courants électriques créés par le mouvement de courants de convection d'un mélange de fer et de nickel en fusion dans le noyau externe de la Terre.

Champs magnétique



Le **champ magnétique** est désigné par H (mesuré par A/m). Il est généré par les biais 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 :

$$\vec{H} = \frac{N}{L} \vec{I}$$

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

$$\vec{B} = \mu_r * \mu_0 * \vec{H} = \mu_0 * \vec{H} + \mu_0 * \vec{M}$$

B et H sont liés par biais de la perméabilité magnétique μ , qui est une propriété intrinsèque du matériau (milieu). μ_0 est la permittivité du vide. On peut définir une perméabilité relative μ_r qui est la relation entre la perméabilité du matériau et celle du vide. \vec{M} est le **vecteur de magnetization**.

Les coefficients magnétiques

Champ magnétique

Densité de flux magnétique

$$\vec{H} = \frac{N}{L} \vec{I}$$

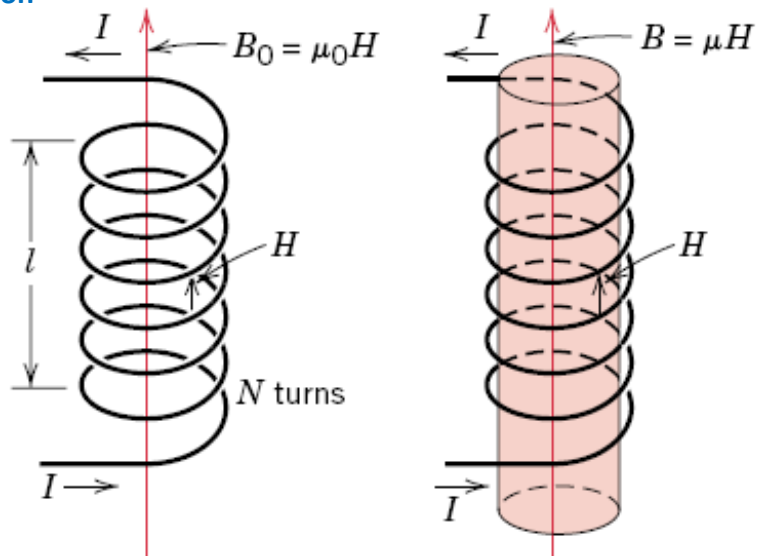
Perméabilité magnétique (vide et relative)

$$\vec{B} = \frac{\vec{\Phi}}{A} = \mu_r * \mu_0 * \vec{H} = \mu_0 * \vec{H} + \mu_0 * \vec{M}$$

Susceptibilité

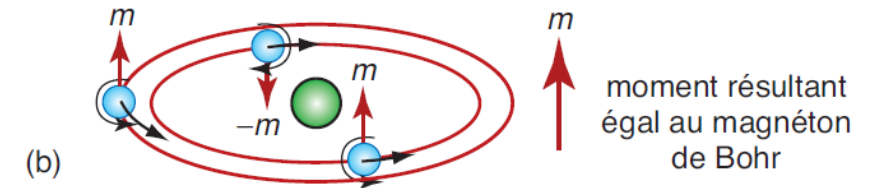
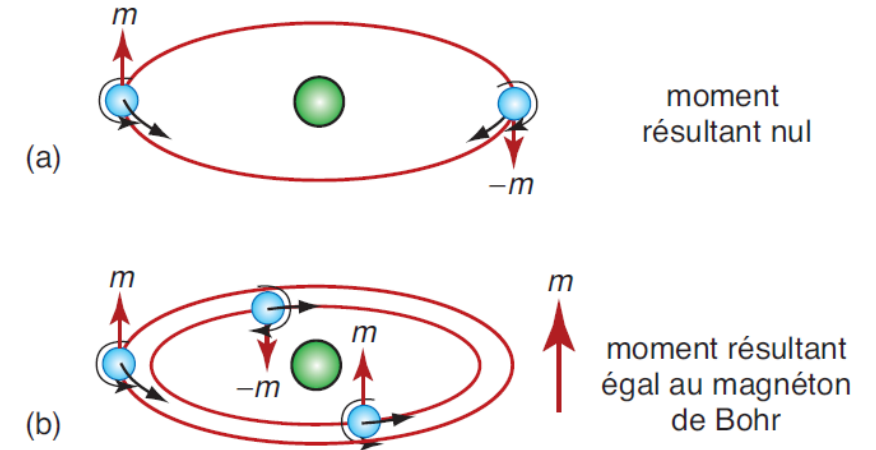
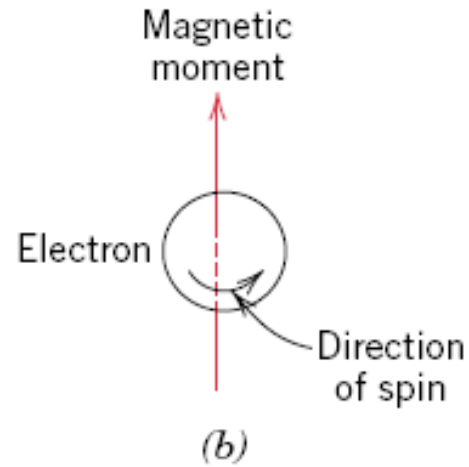
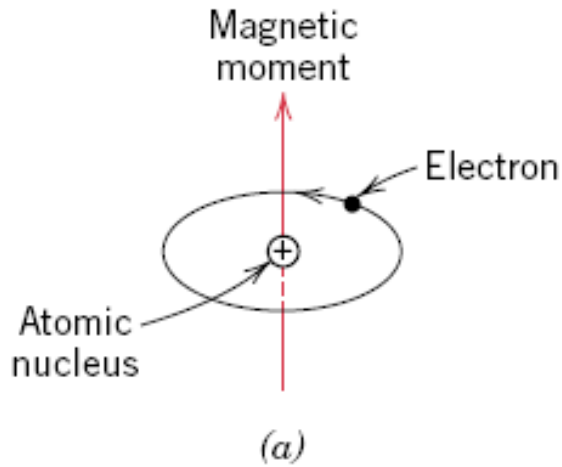
Magnétisation

$$\vec{M} = (\mu_r - 1) * \vec{H} = \chi_m * \vec{H}$$



Pouvez-vous penser à un phénomène décrit de manière similaire ?

Vision atomistique du magnétisme



La vision classique de l'atome est celle d'un noyau autour auquel gravitent des électrons.

Des charges électriques qui tournent impliquent un courant, et un courant électrique dans une boucle fermée crée un moment magnétique. Il y a donc un **moment dipolaire magnétique** associé à chaque électron d'une orbitale.

De plus, chaque électron porte un moment magnétique intrinsèque : son moment de spin— qui est en fait grand.

Le moment magnétique total d'un atome est la somme vectorielle de toutes ces contributions, liées aux orbites et aux spins.

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. Le diamagnétisme est induit par le mouvement des électrons comme réponse au champ magnétique.

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.

Ferromagnétisme

Certains matériaux exhibent un moment magnétique permanent dans l'absence de champ magnétique externe. Les moments magnétiques permanents dans les matériaux ferromagnétiques résultent des moments magnétiques du spin des électrons.

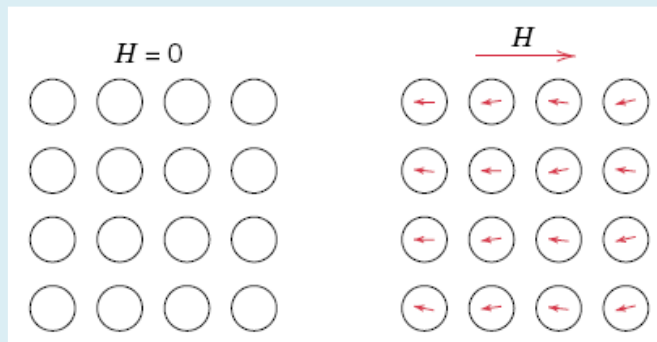
Antiferromagnétisme et ferrimagnétisme

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.

Types de magnétisme dans les matériaux

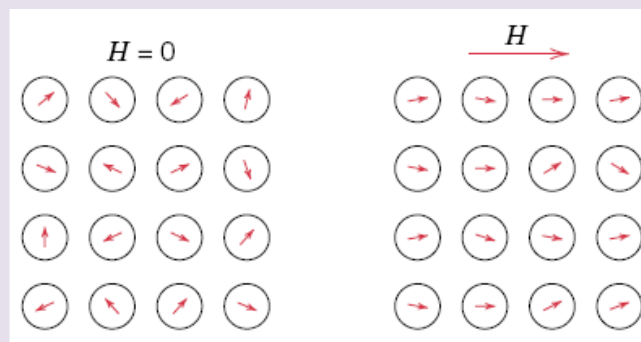
Diamagnétisme

La magnitude du moment magnétique est extrêmement petite et $\mu < 1$ ($\chi < 0$). Quand ces matériaux sont exposés à un fort champ magnétique, ils ont tendance à bouger dans les zones où le champ est plus faible.



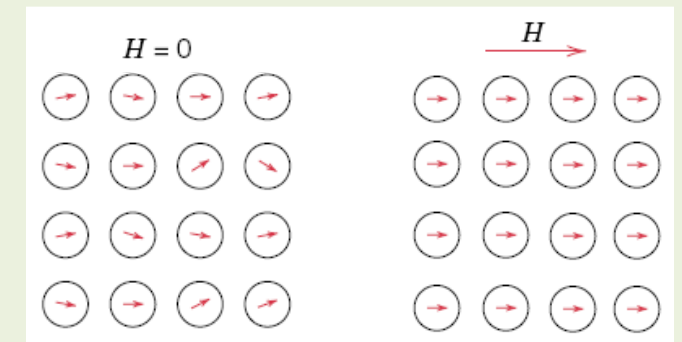
Paramagnétisme

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.

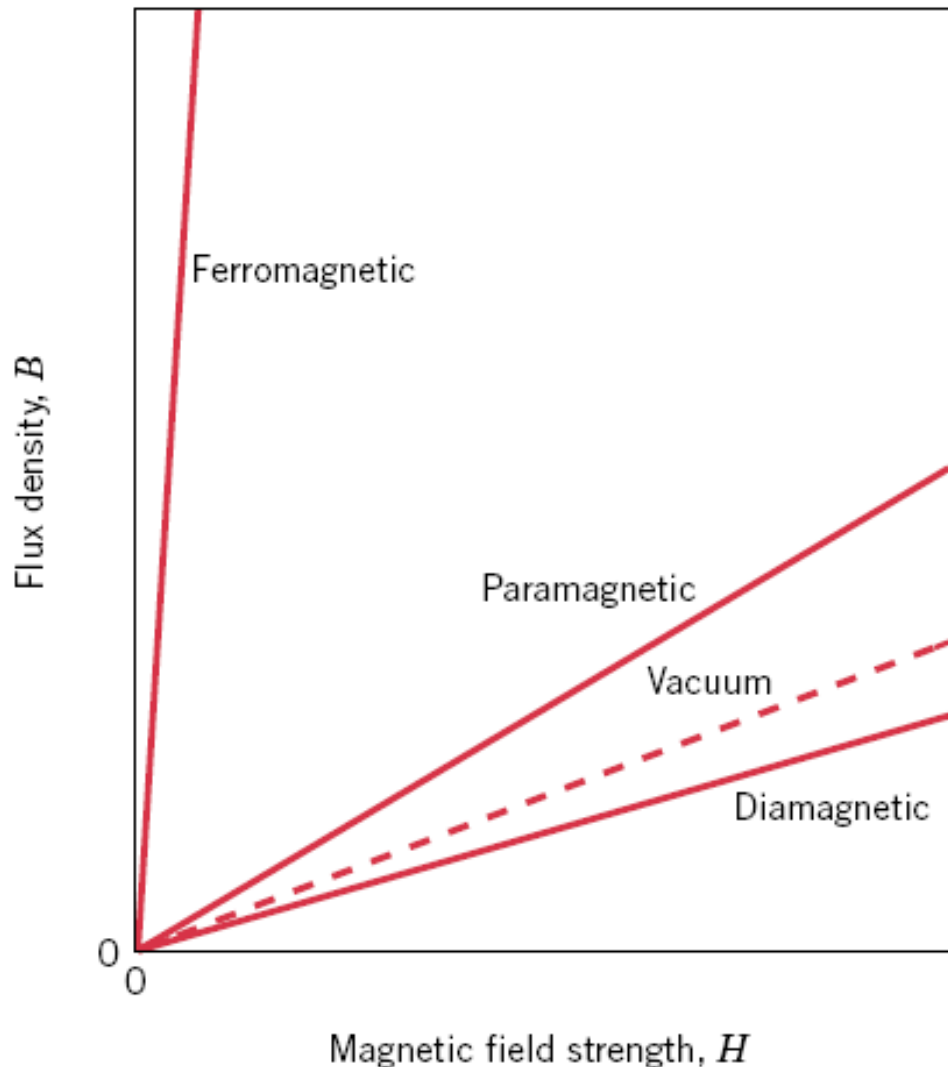


Ferromagnétisme

Les moments magnétiques ont une forte interaction: les spins s'alignent et donc les moments magnétiques s'additionnent positivement. La magnétisation maximale correspond à celle que l'on obtient quand tous les moments magnétiques du matériau sont alignés de façon parallèle.



Types de magnétisme dans les matériaux

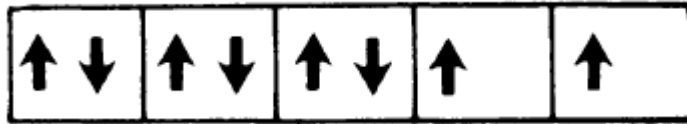
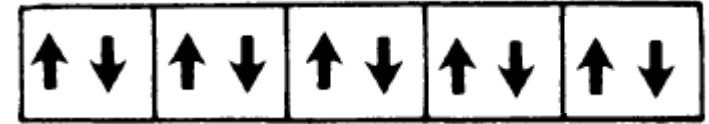


La réponse plus forte vient de la part des ferromagnétiques, dont la forte magnétisation donne lieu à une forte densité de flux B dans le matériau.

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.

Si un solide possède des bandes électroniques complètement remplies, il y a autant d'électrons avec un spin vers le haut que de spin vers le bas. Cela entraîne une annulation des moments de spin, et aucun paramagnétisme net de spin n'est attendu. Ces matériaux sont donc diamagnétiques.



Dans les matériaux ayant des bandes partiellement remplies, les spins des électrons sont arrangés, selon la « règle de Hund », de manière à maximiser le moment de spin total. Par exemple, dans un atome avec huit électrons de valence d, cinq des spins sont orientés, disons, vers le haut, et trois spins vers le bas, ce qui donne un total net de deux spins vers le haut. L'atome est alors censé avoir deux unités de (para-)magnétisme.

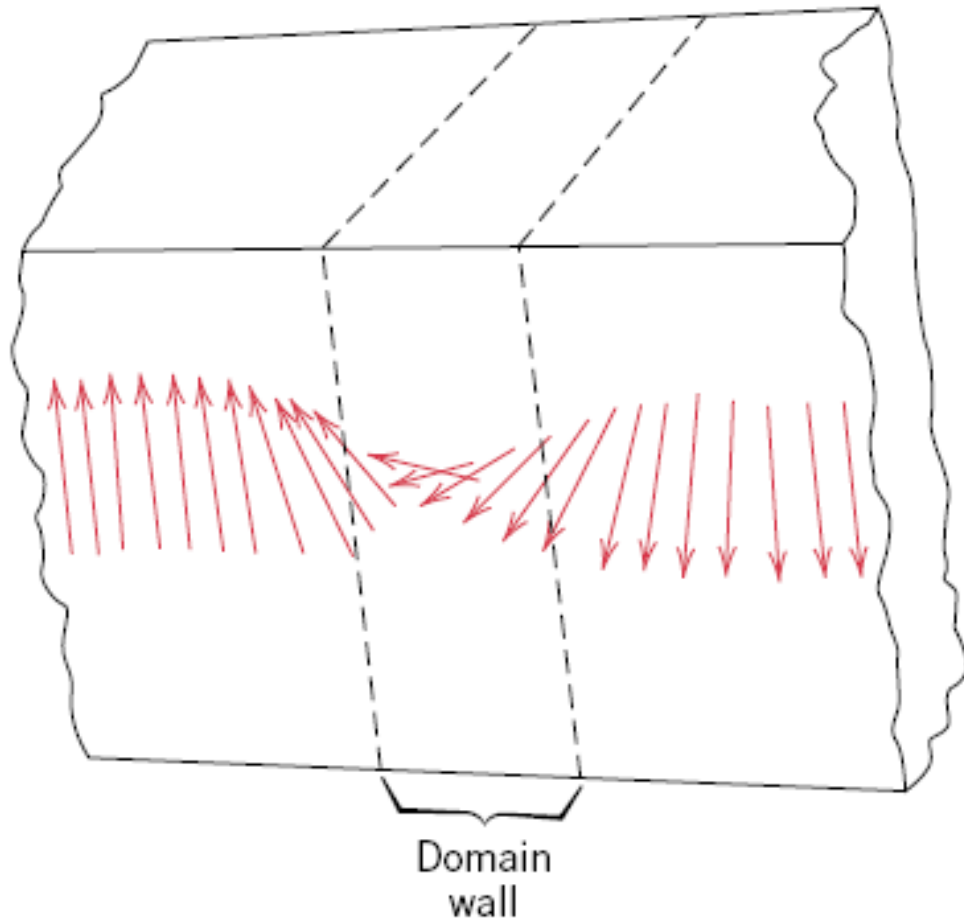
Exercice (10 minutes)

Déterminez si les éléments/composés suivants sont paramagnétiques ou diamagnétiques, et classez-les en fonction de leur susceptibilité magnétique

Pt W Cu Na NaCl H₂O Al Ag

Pause (5 minutes)

Domaines magnétique dans les ferromagnétisme



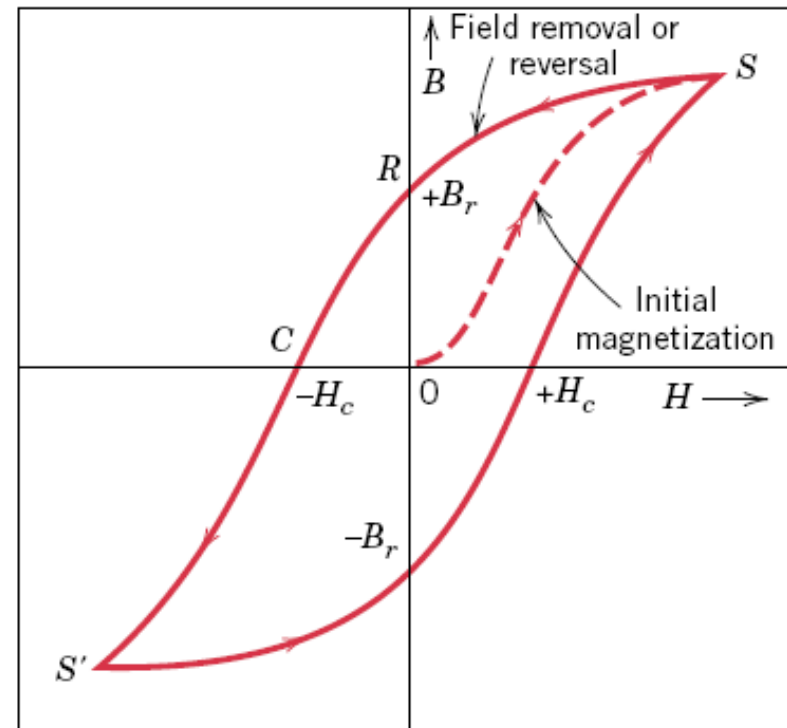
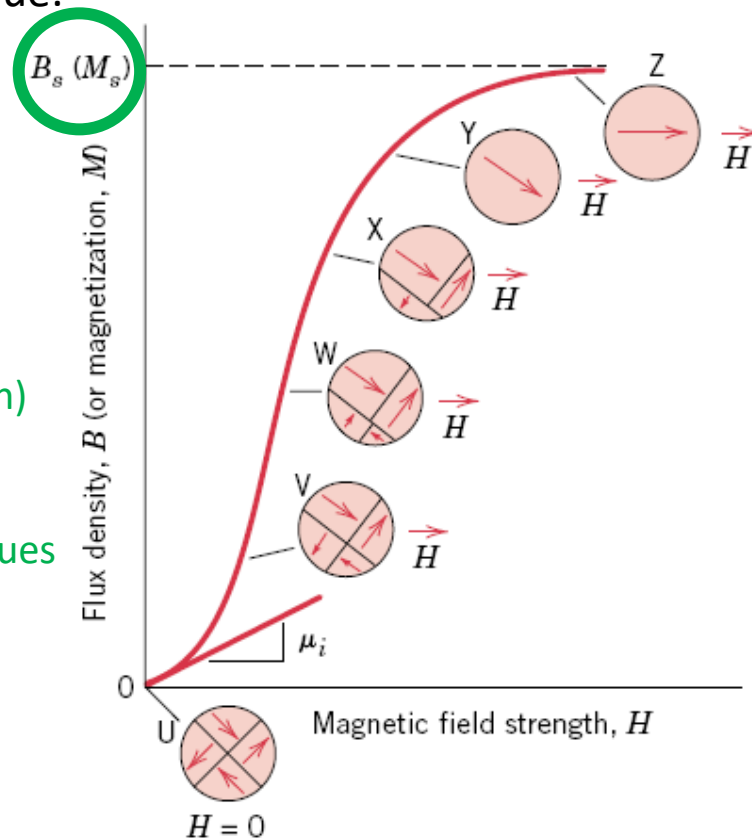
Pour des températures en dessous de la température de Curie (nous verrons plus tard ce que c'est), les moments magnétiques sont organisés en domaines. Il s'agit de régions où les moments magnétiques ont la même direction. La séparation entre domaines s'appelle paroi. Cette paroi a une certaine épaisseur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

Magnétisation de matériaux

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 comme la magnétisation du matériau augmente en fonction de H et nous montrons en même temps l'image microscopique.

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.



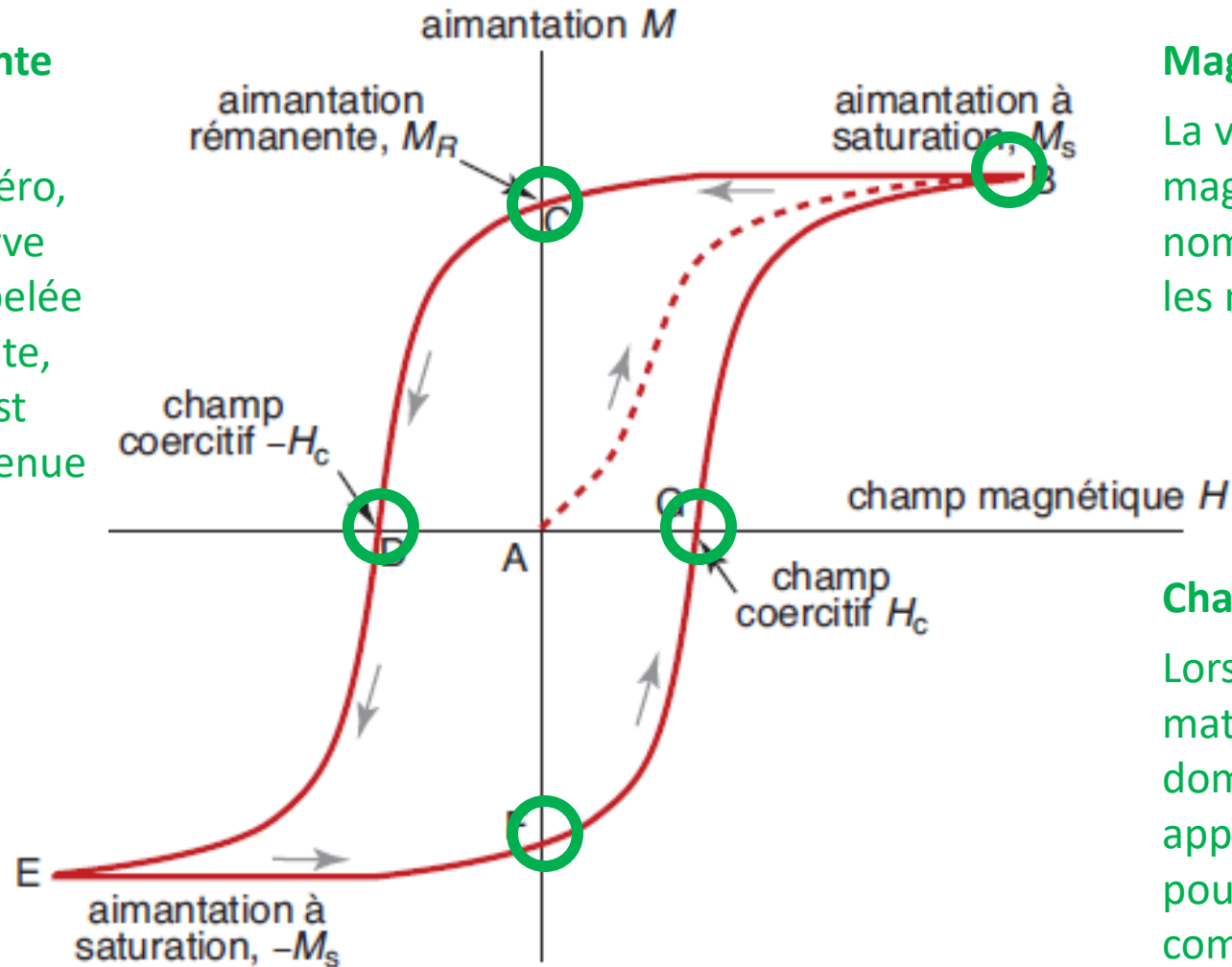
Ce genre de courbes s'appelle courbes d'hystérèse et caractérisent les propriétés magnétiques des ferromagnets.

Courbe d'hystérèse magnétique

Magnétisation rémanente

M_r

Lorsque H est réduit à zéro, la magnétisation conserve une valeur positive, appelée magnétisation rémanente, ou rémanence, M_r . C'est cette magnétisation retenue qui est utilisée dans les aimants permanents.



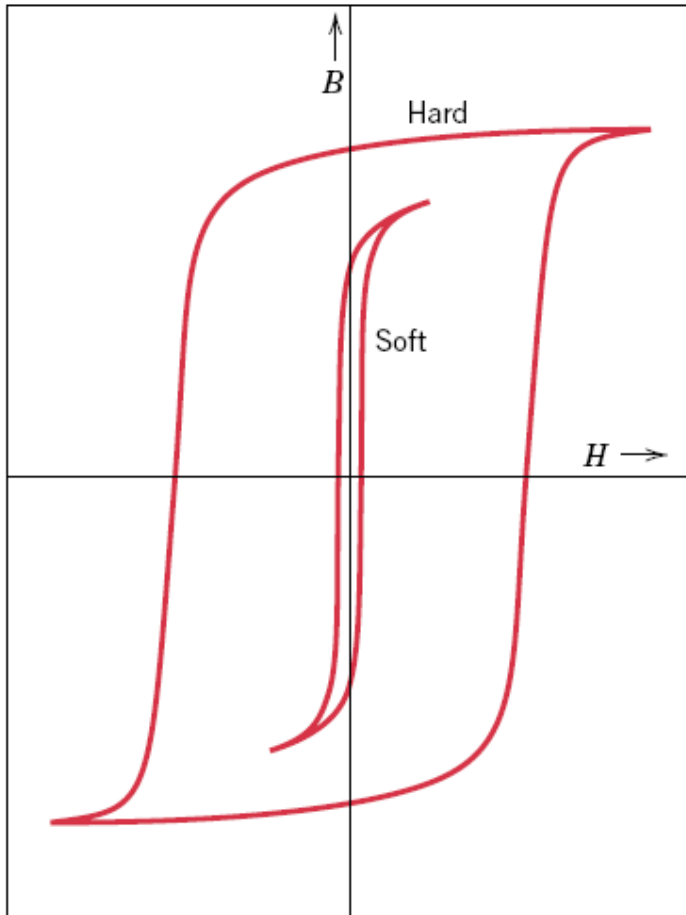
Magnétisation maximale M_s

La valeur correspond au moment magnétique net par atome (μ_B) fois le nombre d'atomes magnétiques dans les matériaux.

Champ coercitif H_c

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 la magnétisation.

Matériaux magnétiques durs et mous



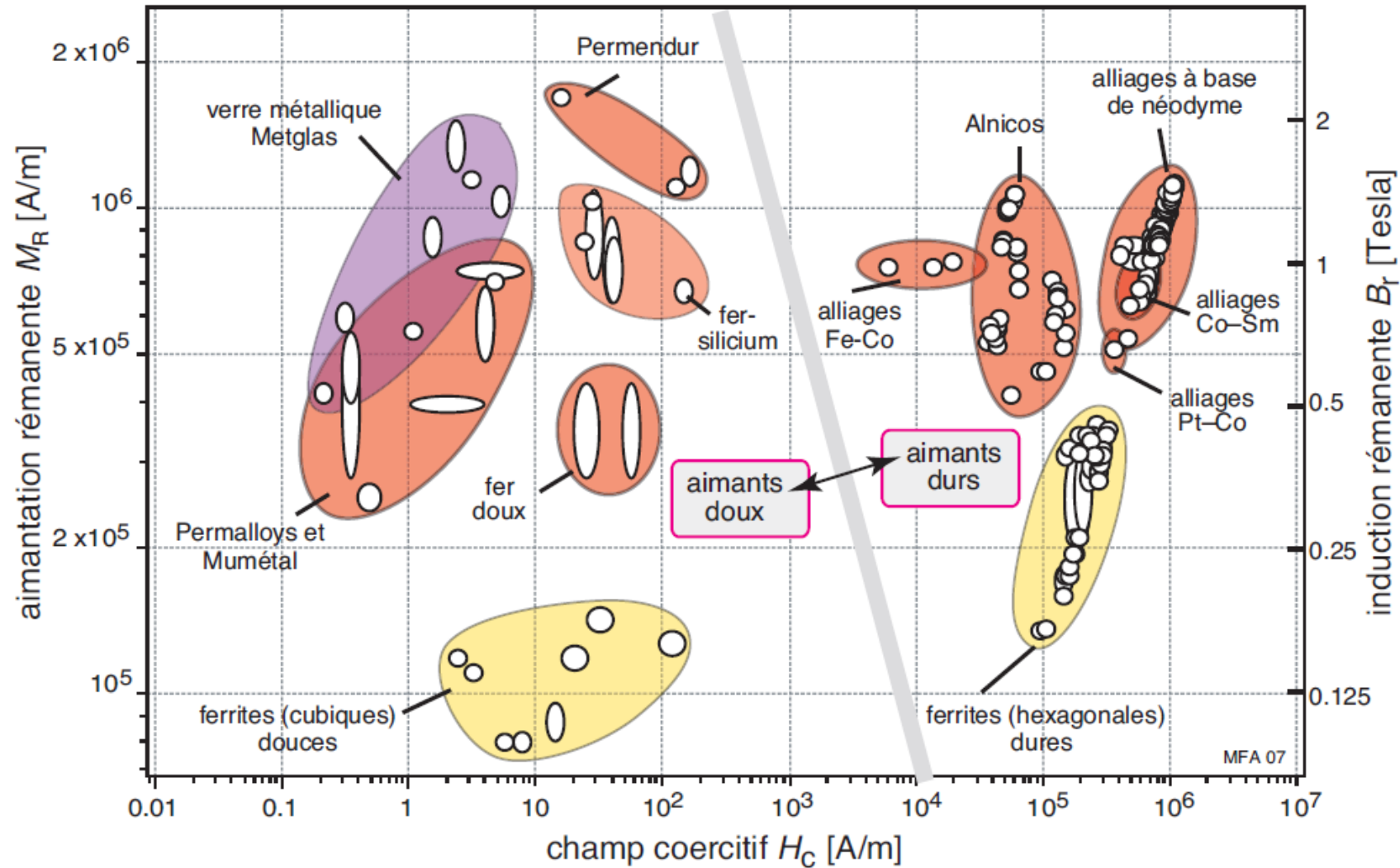
La surface dans l'hystérèse définit l'énergie nécessaire pour aligner les dipôles magnétiques dans le matériau. La forme de la courbe et les paramètres caractéristiques sont donc essentiels pour définir les applications possibles de ces matériaux.

Selon la largeur et 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.

Matériau ferromagnétique



Les bulles rouges et violettes entourent les matériaux conducteurs, les jaunes indiquent les isolants

Température de Curie

Lorsque l'on augmente la température, les vibrations du réseau deviennent plus énergétiques et 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.

aimantation à saturation, M_s (A/m)

