

!!!!!! ATTENTION !!!!!!

Interdiction Formelle de reproduire

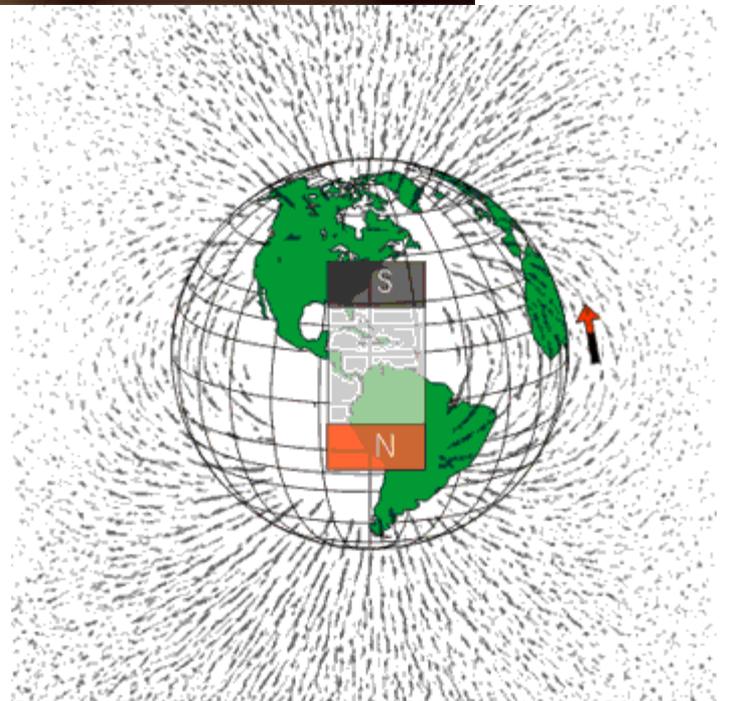
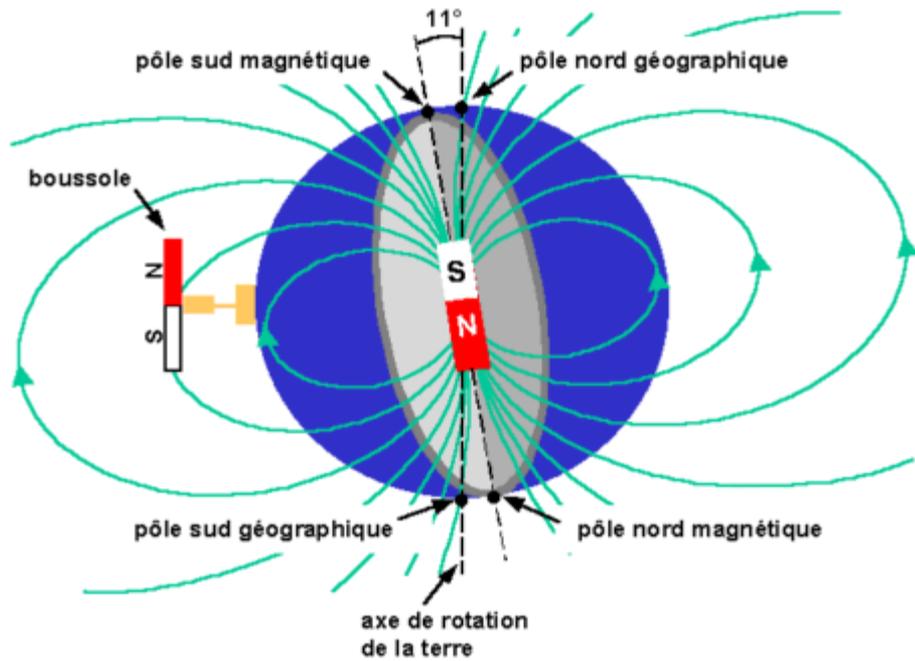
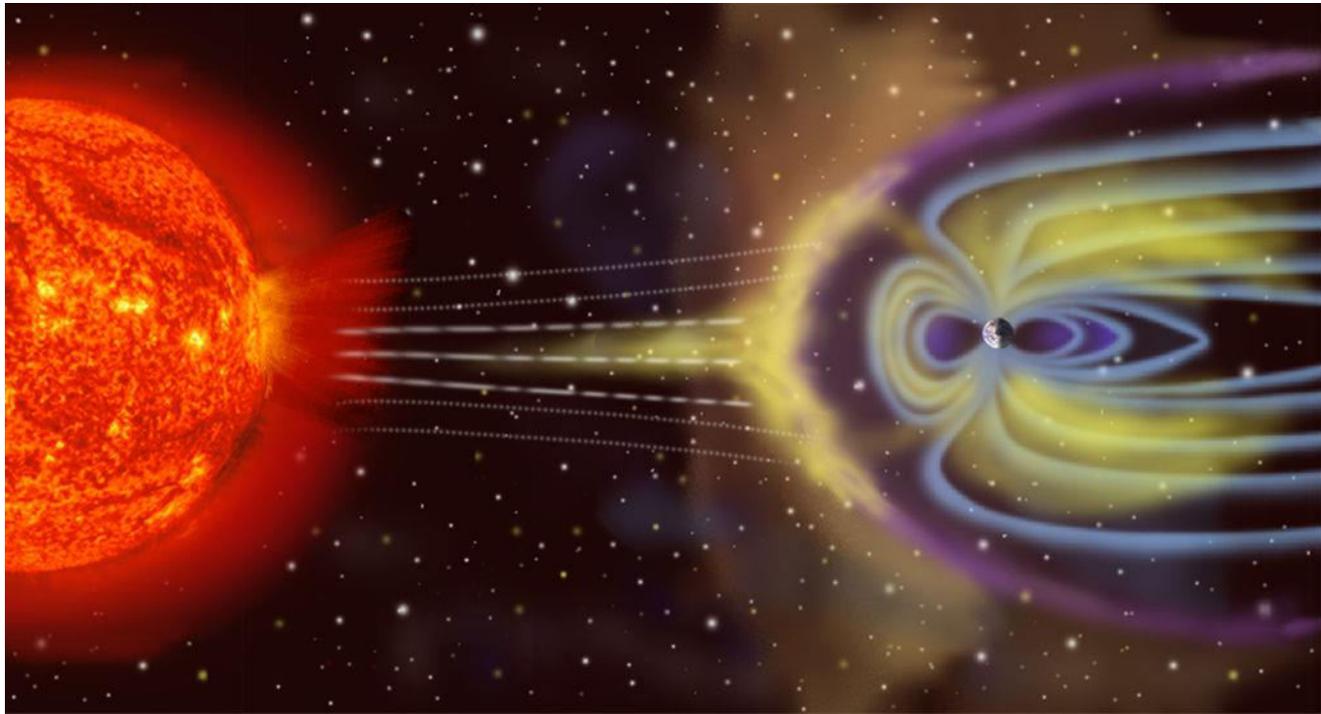
(Désolé , je n'ai pas eu le temps de mettre la bibliographie utilisée!!)

- Ce document est un support du cours que je donne et non pas un cours en lui-même.

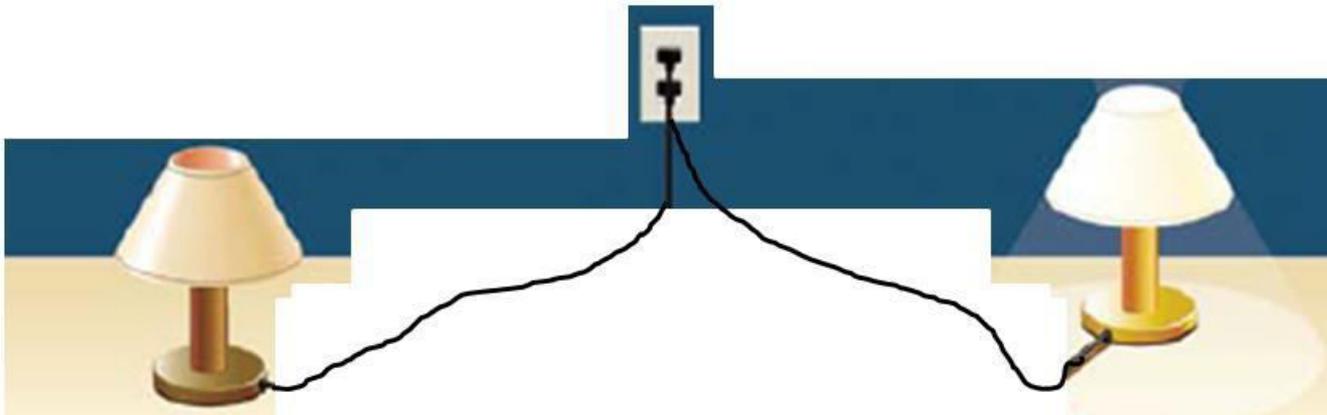
(Quelques!)

Propriétés électriques et magnétiques

Questions ?



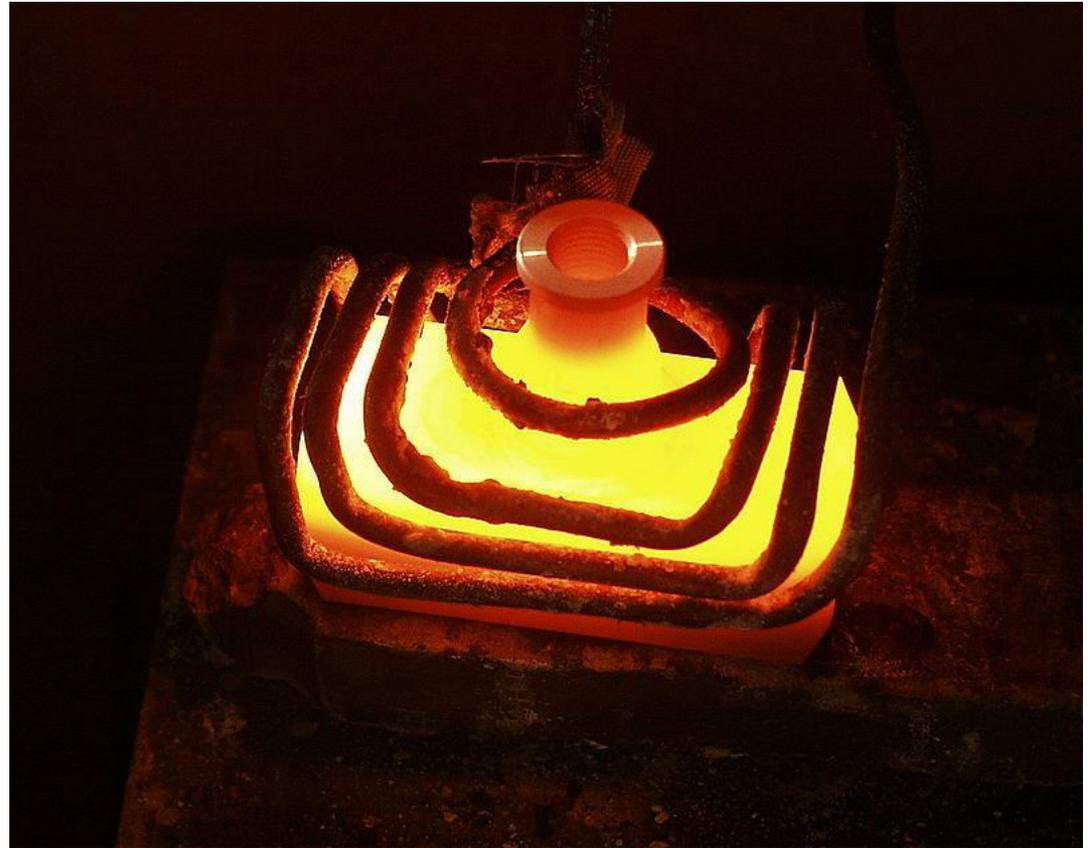
Existences de champs électrique ou magnétique ?

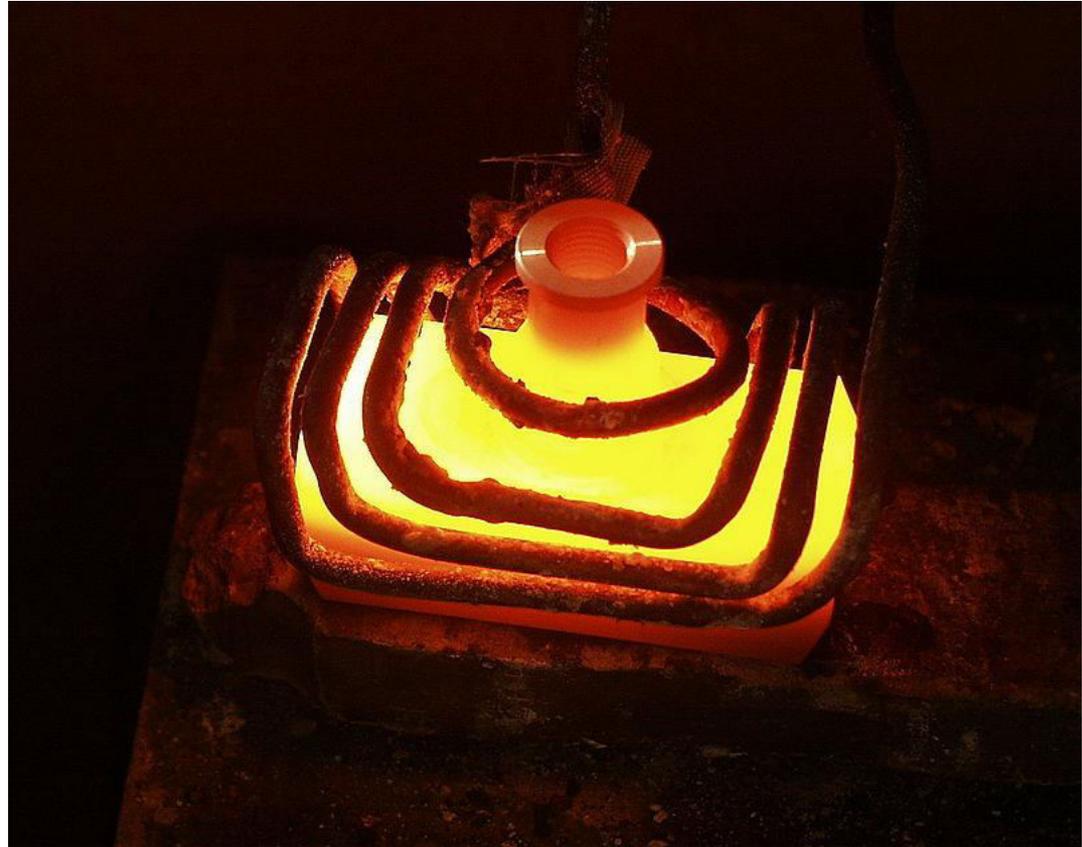


Force ?



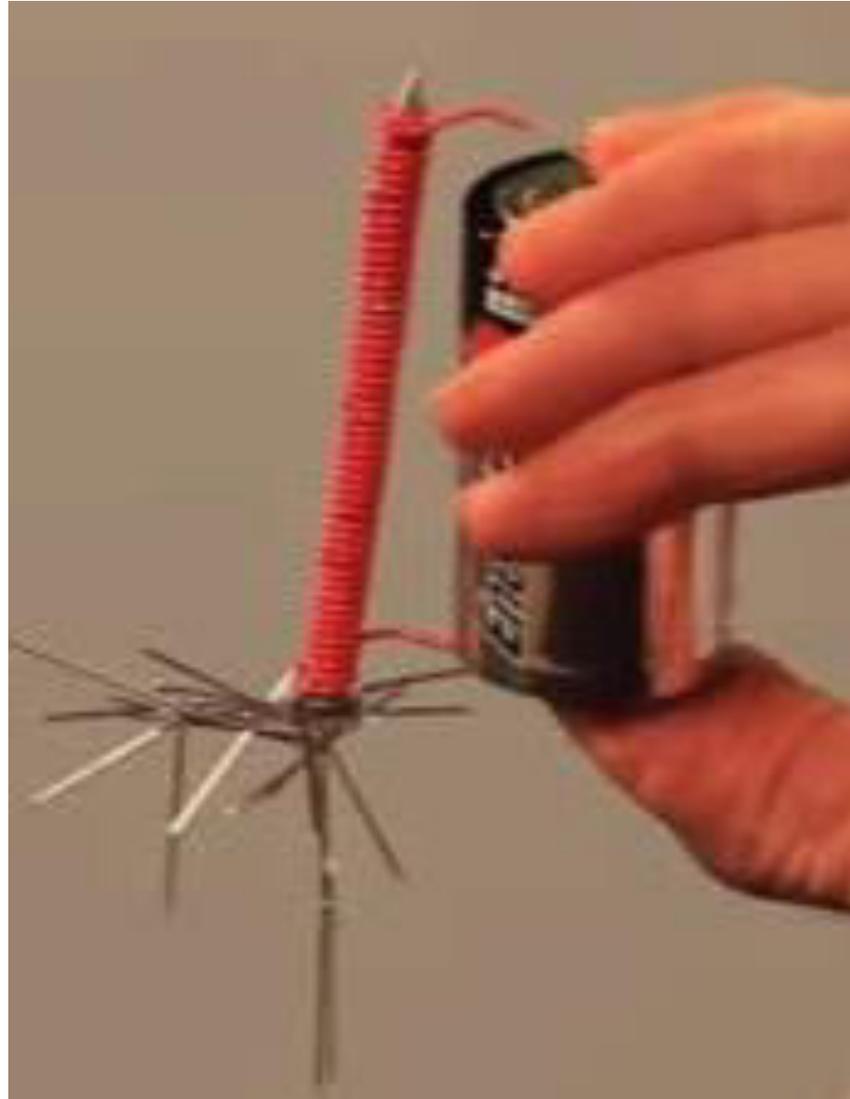
Phénomène ?





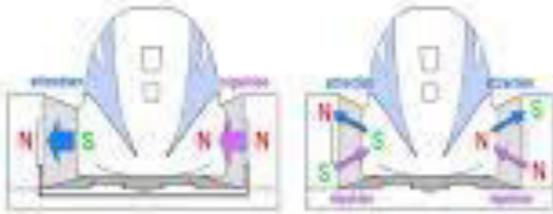
Chauffage par induction magnétique d'une bouteille en métal : la variation d'un champ magnétique induit des courants dans le corps de l'objet, qui échauffent celui-ci par effet Joule.

Phénomène ?



Phénomène ?

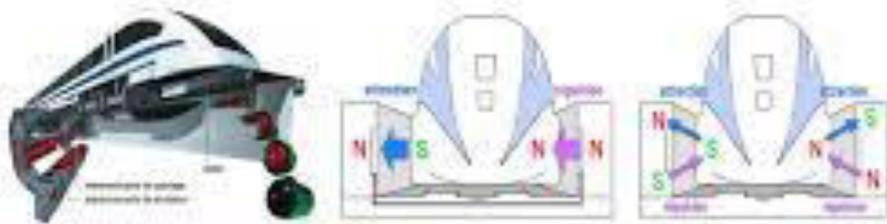
Train à sustentation magnétique



Eveil-delaconscience.com



Train à sustentation magnétique



Trains à lévitation magnétique



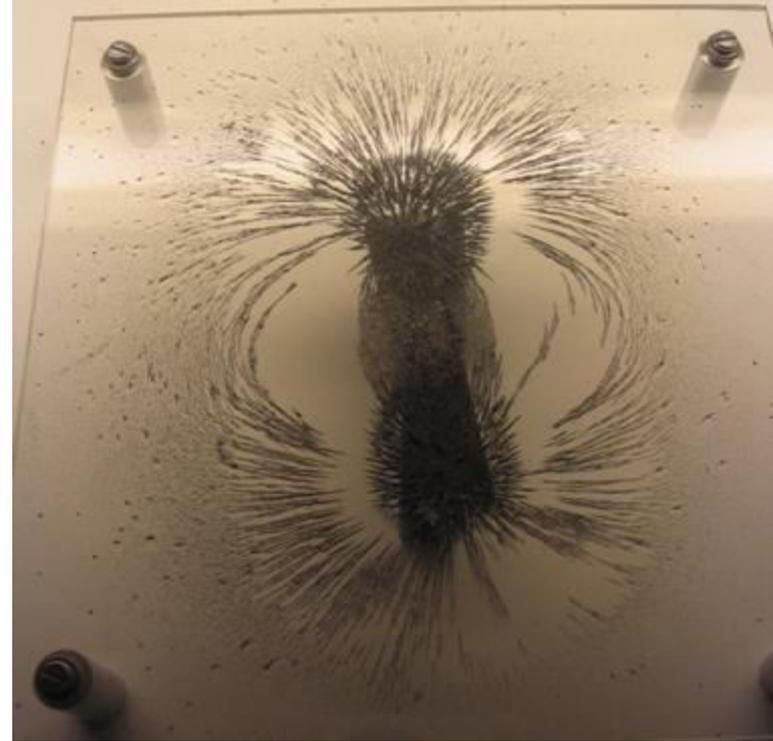
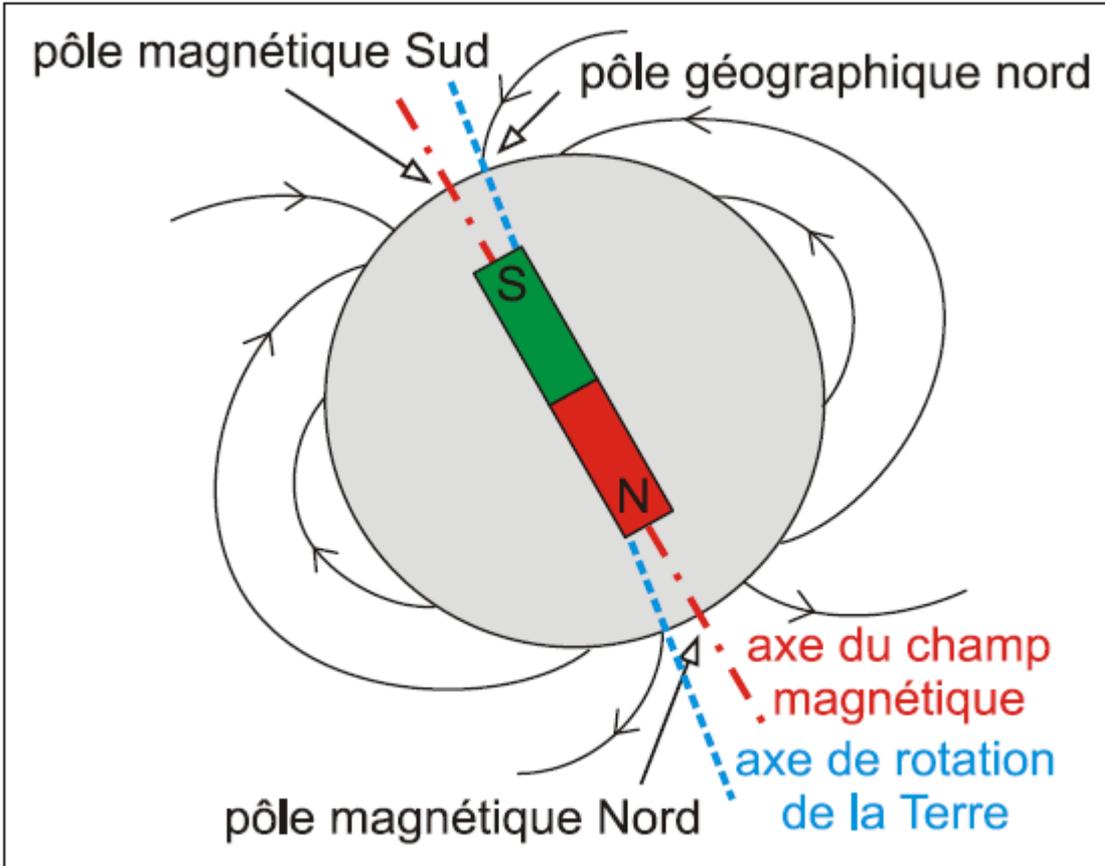
L'effet Meissner résulte de l'expulsion des champs magnétiques par un matériau supraconducteur.

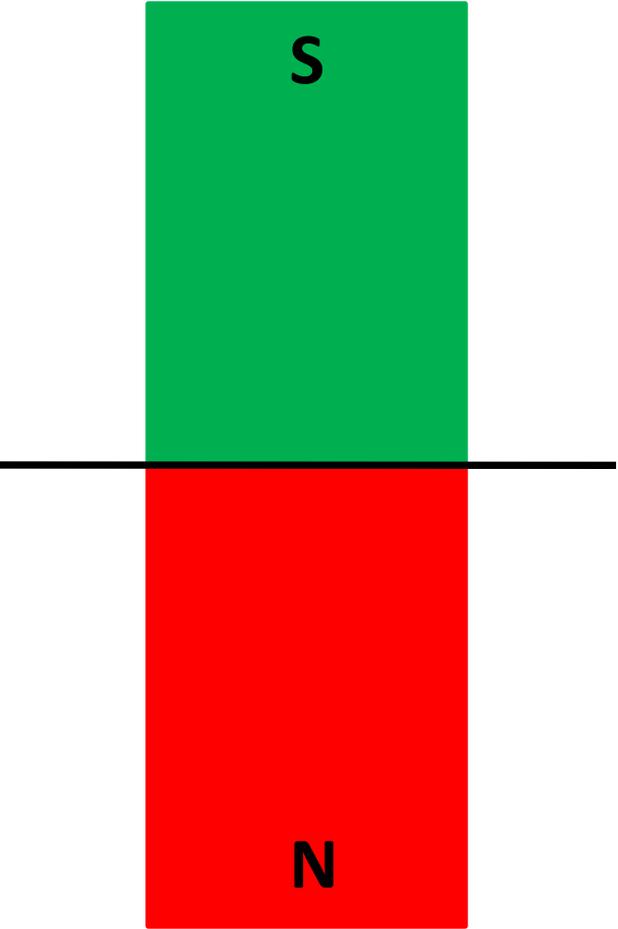
Les Propriétés **Electriques** et **Magnétiques**

- Champs électrique et champs magnétique?
- Origines?
- Est-ce que champ électrique et le champ magnétique sont-ils atténués par les objets (arbres, les clôtures ou les Bâtiments)?
- Influence sur l'humain?
- Ordre de grandeurs?
- Matériaux magnétiques? (naturels ou non)

- équations de maxwell
- le potentiel vecteur magnétique
- champ d'induction magnétique B
- champ d'excitation magnétique H
- flux magnétique
- force de Lorentz
- force de Laplace
- force électromotrice (tension induite)
- propriétés de la matière
- les aimants

Lignes de champs



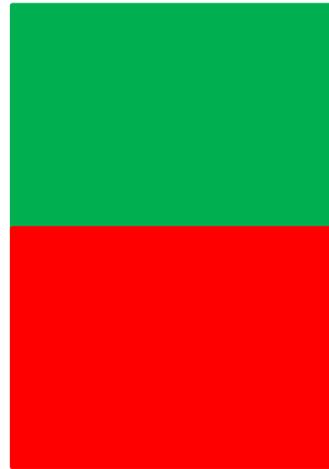
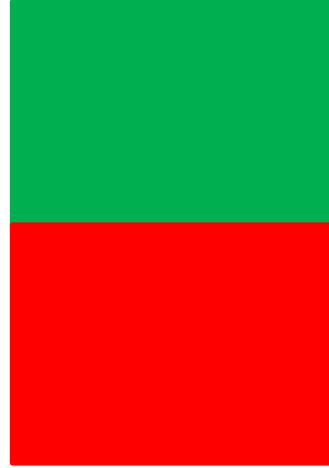


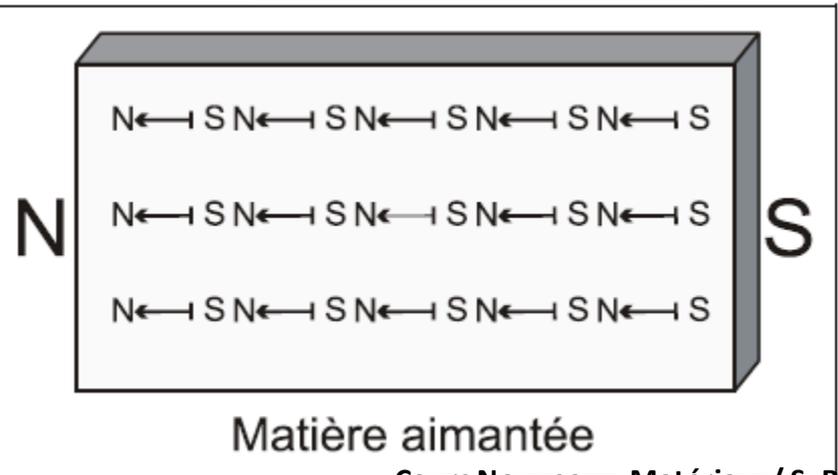
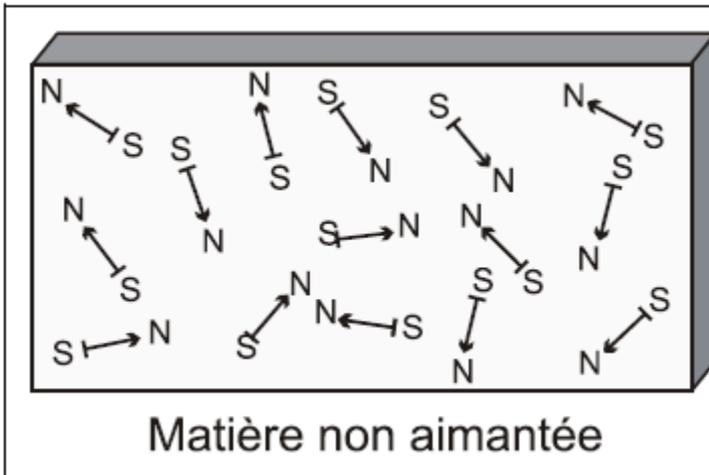
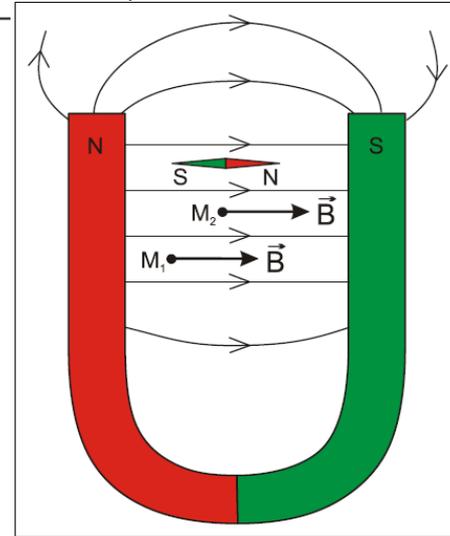
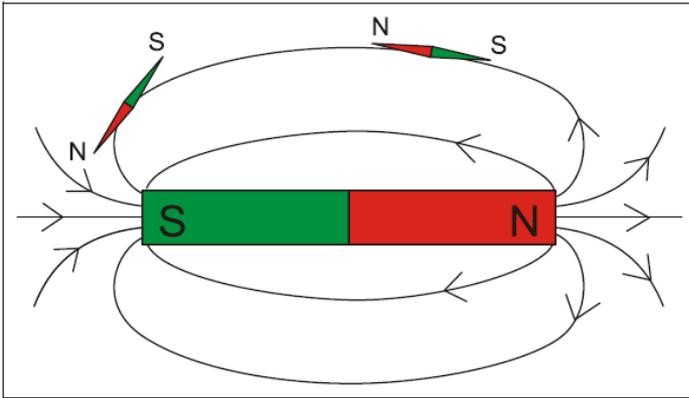
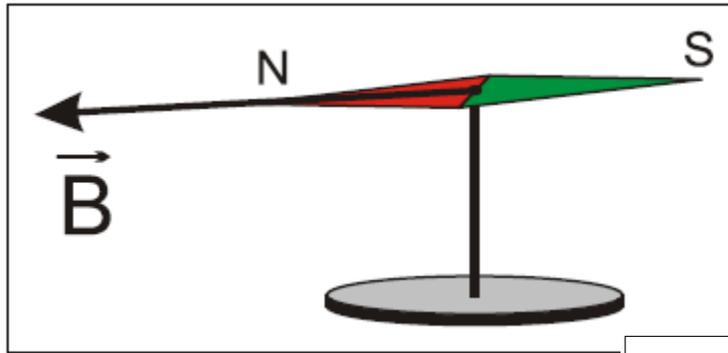
S

N

S

N





Certains matériaux
sont des aimants

Les trombones, attirés par un aimant,

- sont aimantés **temporairement** (ils attirent d'autres trombones tant que l'aimant est là).
- Ils restent **un peu aimantés** lorsqu'on a enlevé l'aimant.

- Les aimants ont des propriétés magnétiques **permanentes**

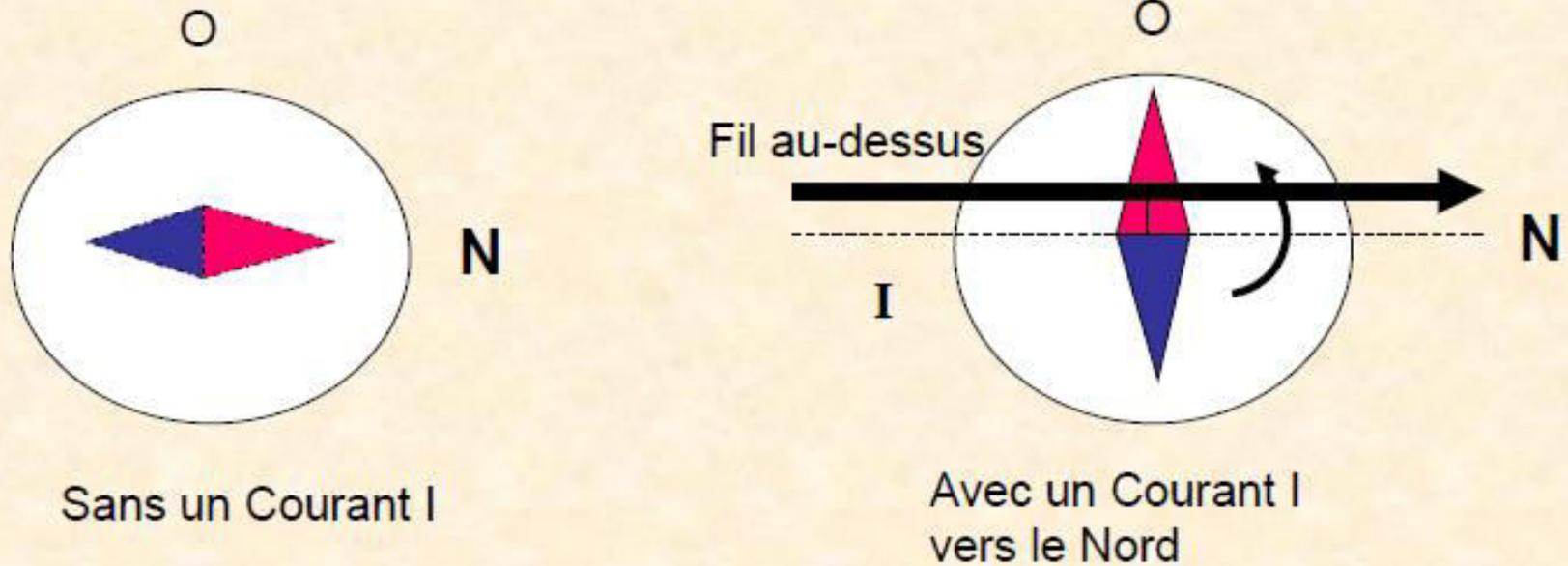
- Le fer a des propriétés magnétiques **temporaires**
- Le papier, l'alu, le verre n'ont **pas de propriétés magnétiques** notables

Un aimant n'attire pas et ne repousse pas

le papier, le bois, le verre, l'aluminium...

explications \Leftrightarrow physico-**chimie**
--> structure électronique et organisation cristalline

Expérience de Oersted (1820)

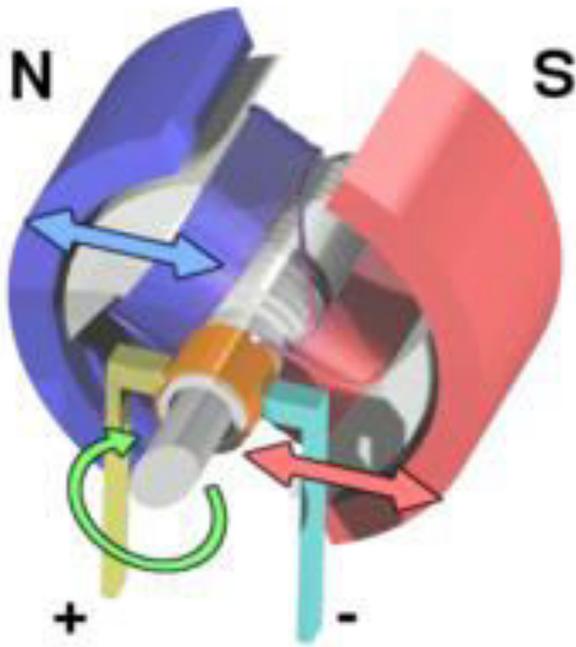


Oersted venait de découvrir qu'un courant électrique pouvait produire un effet magnétique. (Méthode artificielle)

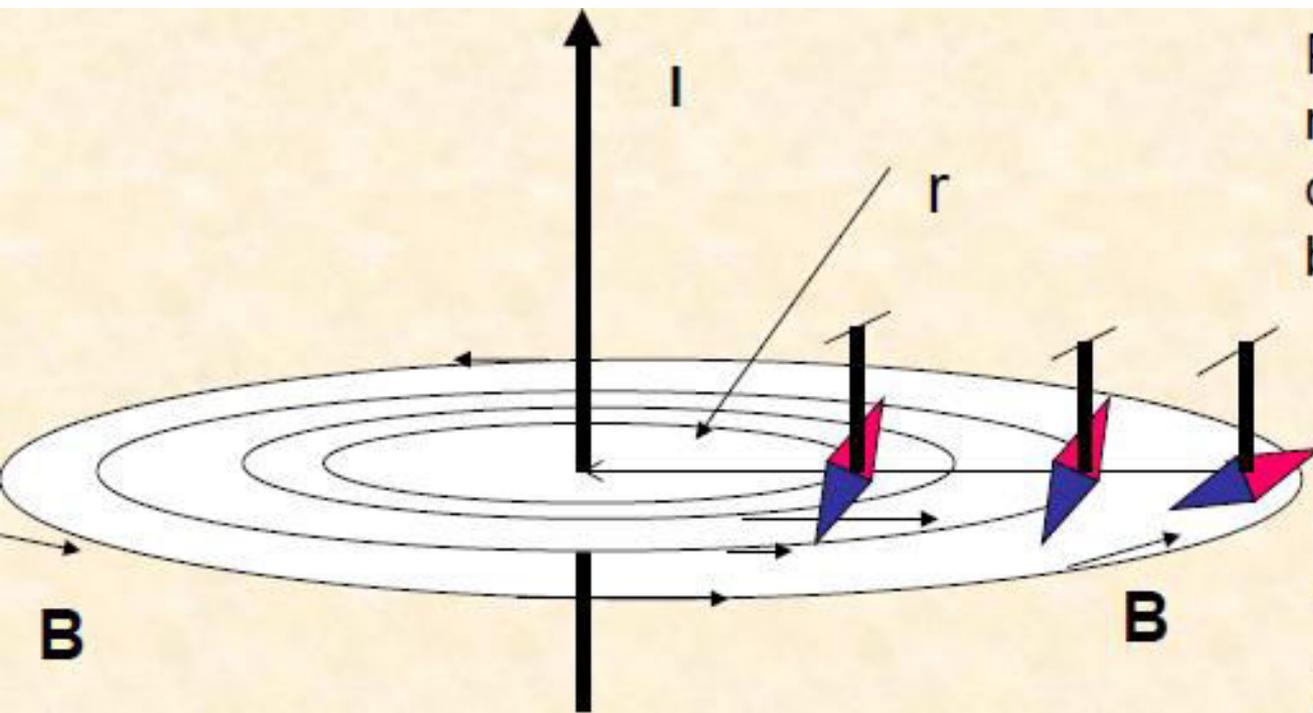
Semaines après la publication des travaux de Oersted, plusieurs physiciens dont Biot, Savart et Ampère entreprirent à leur tour une série d'expériences afin de montrer comment on pouvait produire un champ magnétique en faisant passer du courant dans un fil.

Moteur électrique

La découverte de Oersted est la base de fonctionnement du moteur électrique



Expérience Biot-Savart (1821)



Premières
mesures sur la
déviaton de la
boussole

$$B \propto I$$

$$B \propto 1/r$$

Aujourd'hui, dans
le système SI, on
écrit l'expression
de B comme suit:

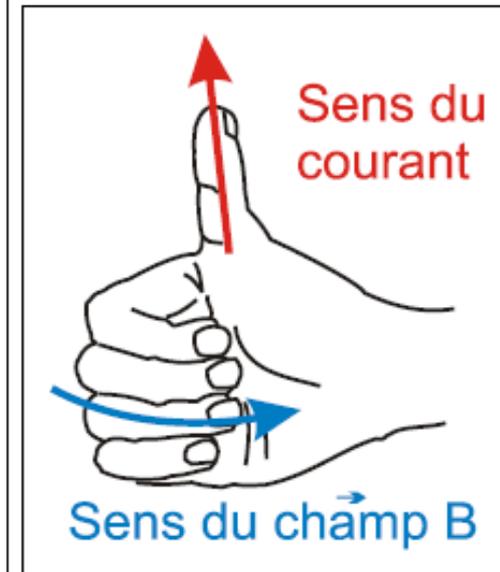
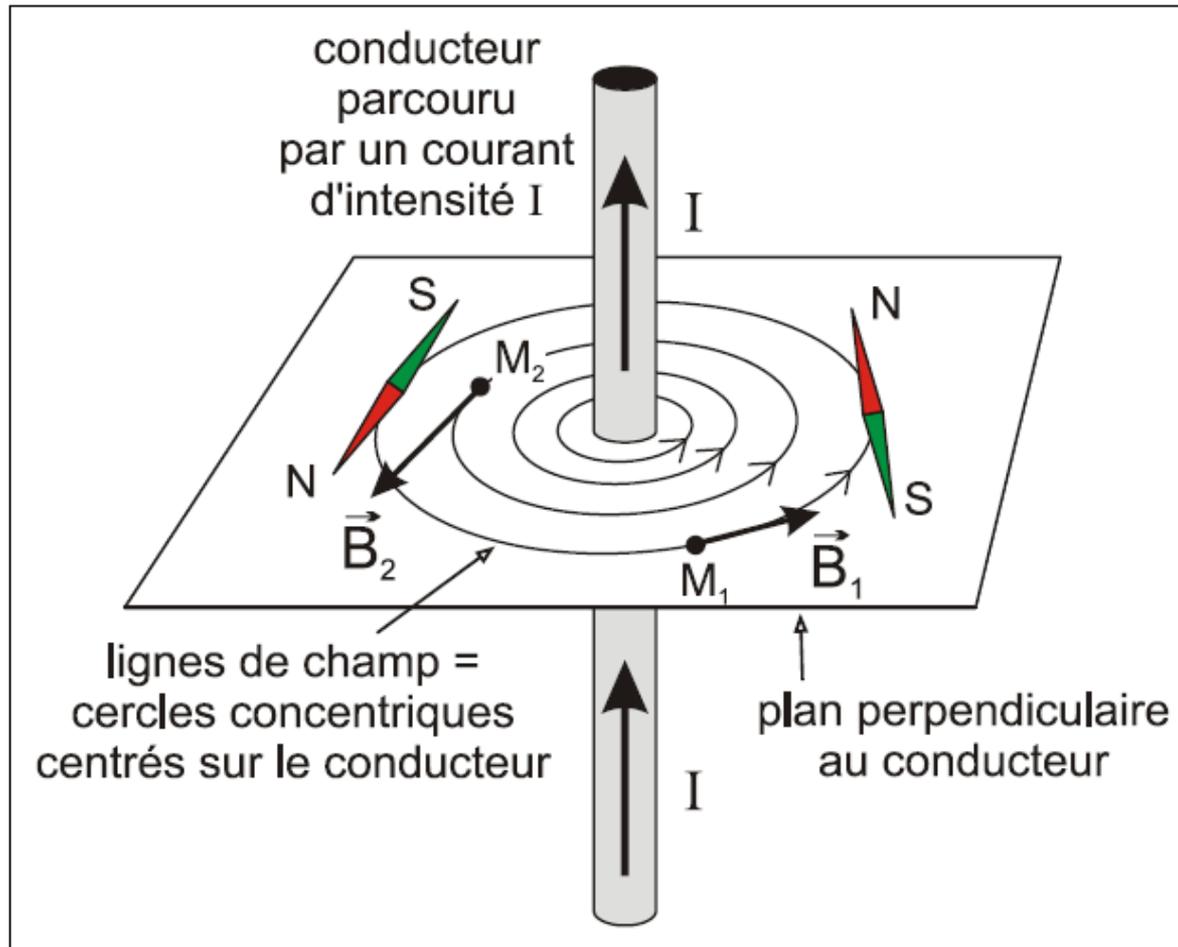
Résultat
$$\mathbf{B} = \mu_0 I / 2 \pi r \quad \mathbf{T}$$

Où μ_0 , appelée constante de perméabilité du vide, elle possède par définition la valeur de :

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$$

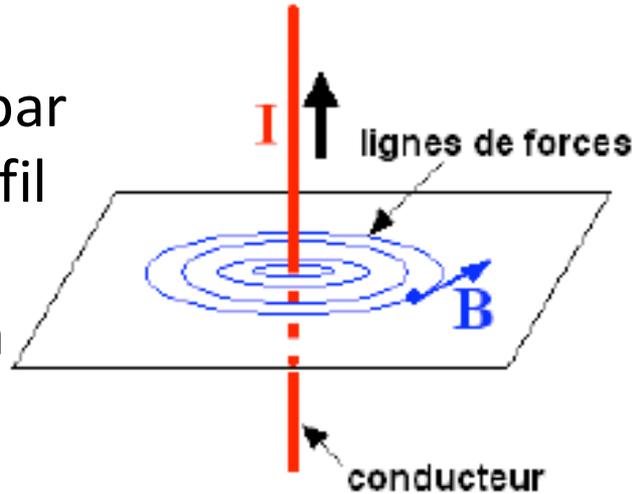
Cette constante représente les propriétés magnétiques du milieu

Champ créé par un conducteur rectiligne parcouru par le courant



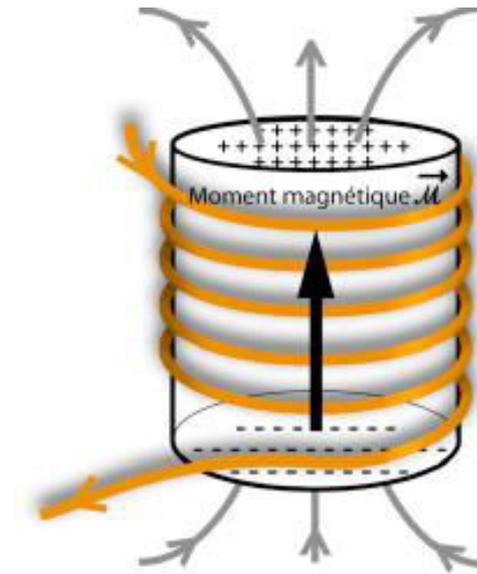
- Le **sens** de B dépend du sens de I .
- L'**intensité** B du champ augmente avec l'intensité de courant et diminue avec la distance au conducteur.

Champ magnétique créé par un fil très long, à **1 cm** du fil parcouru par un courant **$I = 5,0 \text{ A}$** : **$B = 0,0001 \text{ tesla}$** à **1 cm** du fil

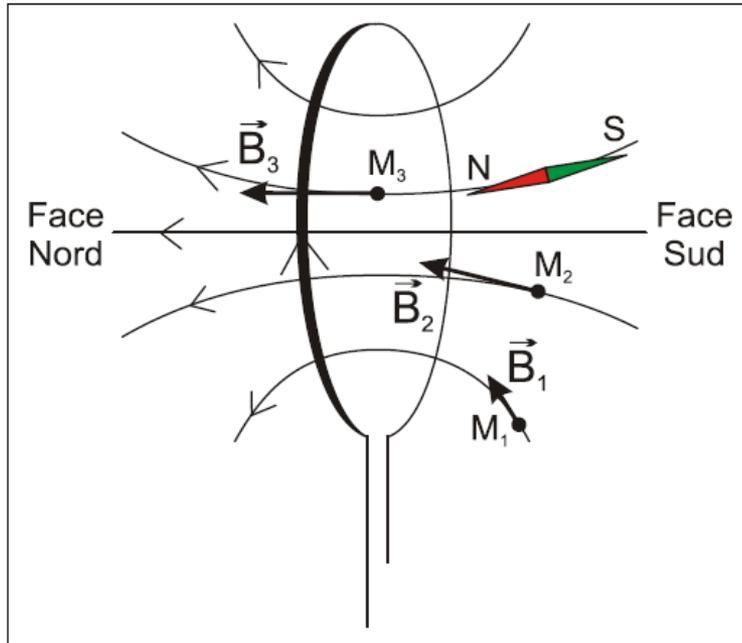


Comment créer des champs magnétiques plus forts ?

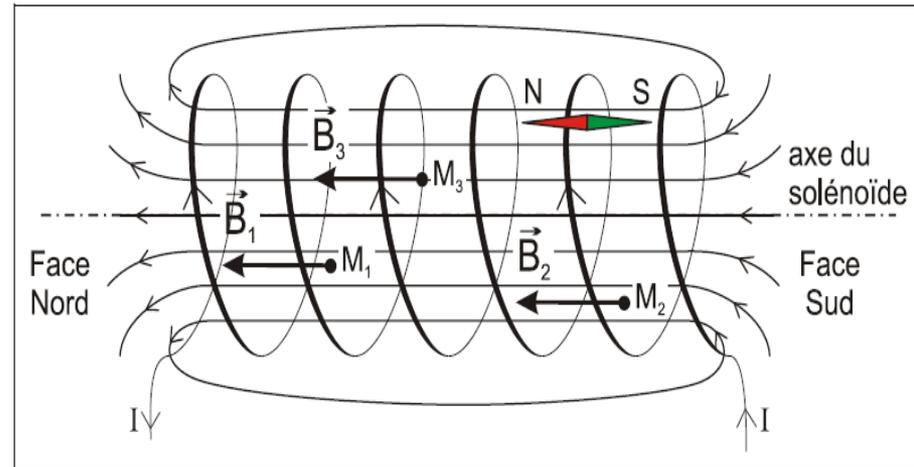
Champ magnétique créé en son centre par une bobine plate de diamètre **5 cm**, comportant **1000 spires**, parcourue par un courant **$I = 5,0 \text{ A}$** : environ **$B = 0,1 \text{ tesla}$**



Champ créé par un conducteur circulaire (bobine plate) parcouru par le courant



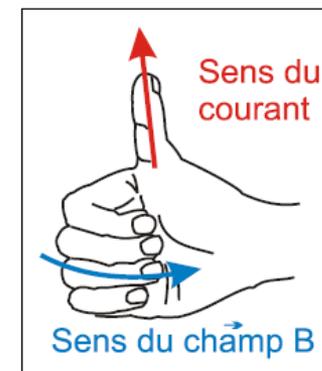
Champ créé par un solénoïde (bobine longue) parcouru par le courant



-Toutes les lignes sortent par une face appelée **face nord (N)** et entrent par l'autre face appelée **face sud (S)**.

-Le sens de B dépend du sens de I .

-Le champ au centre est d'autant plus important que l'intensité de courant est plus élevée et que le rayon est plus petit.



Les phénomènes électriques et magnétiques ont tout d'abord été étudiés séparément par plusieurs physiciens de renom:

Franklin (1706 – 1790)

Coulomb (1736 – 1806)

Oested (1775 – 1851)

Ampère (1775 – 1836)

Gauss (1777 – 1855)

Faraday (1791 – 1867)

C'est cependant à **Maxwell (1831 – 1879)** que l'on doit la formulation la plus complète des relations liant entre elles les grandeurs électriques et magnétiques.

Charges électriques

- Nous savons aujourd'hui que beaucoup des propriétés physiques et chimiques de la matière, de l'atome au solide et à la matière vivante, sont liées aux « **forces électriques** », c'est à dire aux interactions entre « **charges électriques** ».
- L'électrisation des corps à longtemps été perçue comme un phénomène extraordinaire et sujet de nombreuses controverses (*existence ou non de l'éther?*). Sa compréhension, ainsi que celle du lien entre électricité et magnétisme, est due aux savants du XIX^e siècle.



- J.C. Maxwell donna une description synthétique de l'**électromagnétisme**, et des physiciens et chimistes du début du XX^e siècle élucidèrent la nature atomique de la matière.

Les équations de Maxwell

Forme locale

Forme globale

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{B} dV = \oint_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{B} dA = 0 : \text{Conservation du flux magnétique}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

$$\int_S \mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{H} dA = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint_S \mathbf{n} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) dA : \text{Loi d'ampère}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\int_S \mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{E} dA = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_S \mathbf{n} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} dA : \text{Loi d'induction de Faraday}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{D} dV = \oint_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{D} dA = 0 : \text{Conservation de la charge}$$

Les équations de Maxwell

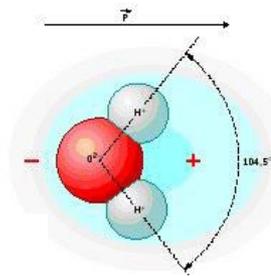
$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}$	\mathbf{B} :	<i>Vecteur champ d'induction magnétique [T]</i>
	\mathbf{H} :	<i>Vecteur champ magnétique [A/m]</i>
	μ_0 :	<i>Perméabilité absolue du vide ($4\pi 10^{-7}$) [Vs/(Am)]</i>
	μ_r :	<i>Perméabilité relative d'un matériau [1]</i>

$\mathbf{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \mathbf{E}$	\mathbf{D} :	<i>Vecteur déplacement électrique [As/m²]</i>
	\mathbf{E} :	<i>Vecteur champ électrique [V/m]</i>
	ε_0 :	<i>Permittivité absolue du vide (8.85410^{-12}) [As/(Vm)]</i>
	ε_r :	<i>Permittivité absolue du vide [1]</i>

$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}$	\mathbf{E} :	<i>Vecteur champ électrique [V/m]</i>
	\mathbf{J} :	<i>Vecteur densité de courant [A/m²]</i>
	ρ :	<i>Conductivité électrique [A/(Vm)]</i>

Charges électriques

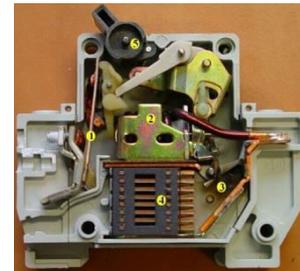
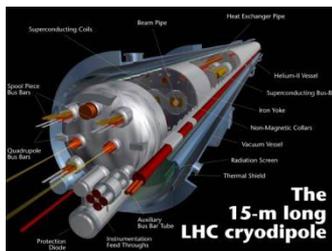
Electrostatique ...



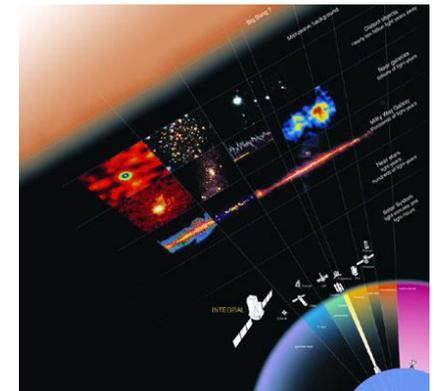
Induction électromagnétique ...



Aimants supraconducteurs ...



Ondes électromagnétiques ...



Charges électriques

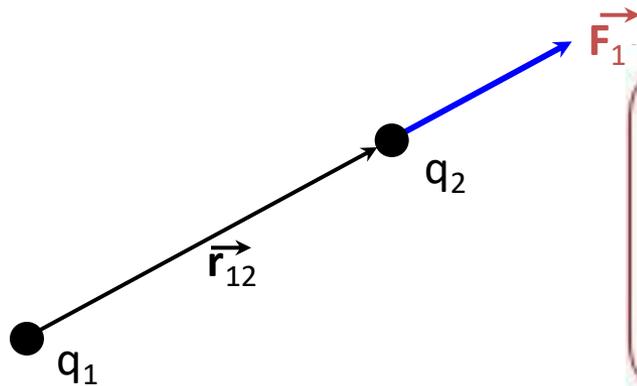
- La **charge électrique**, comme la masse, est une propriété de la matière. Deux corps « chargés » interagissent, soit en « **s'attirant** » soit en « **se repoussant** ». Ceci a conduit à séparer les particules chargées en deux catégories, les charges « **positives** » et « **négatives** ». Deux corps qui se repoussent appartiennent à la même classe.
- La charge électrique est une **propriété des particules élémentaires**. Elle est **conservée** et **quantifiée**. La charge « -e » est la charge de l'électron, où la valeur de « e » est voisine de **1.602×10^{-19}** .

La charge électrique totale d'un système isolé reste toujours constante. Elle est donnée par la somme algébrique des charges positives et négatives des particules élémentaires constituant le système à un instant donné.

Loi de Coulomb

• De façon similaire à la gravité, la **force s'exerçant entre deux corps stationnaires chargés**, de charges respectives q_1 et q_2 est **proportionnelle au produit des charges** q_1q_2 et **inversement proportionnelle au carré de la distance** séparant les deux charges. La force est parallèle au segment joignant les deux charges et **orientée**, compte tenu du signe des charges. Il s'agit de la **loi de Coulomb**. La force de Coulomb **agit à distance**.

• Nous devons donc calculer la force (vecteur) s'exerçant par la particule **2** sur la particule **1** en se référant au vecteur \vec{r}_{12} qui va de **1** à **2** (ou vice versa). Si les deux charges sont de même signe, les particules se repoussent et la force résultante est dirigée dans le même sens que \vec{r}_{12} .



$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_{12}|^2} \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|}$$

- Dans le système international (SI), les charges s'expriment en *Coulombs* (C) et les distances en *mètres*. La constante k vaut $8.9875 \cdot 10^9$ (SI). Elle vaut 1 dans le système d'unité CGS (système d'unités « électrostatiques » qui fixe les dimensions de la charge électrique et la valeur de l'unité de charge en fonction d'autres grandeurs fondamentales). Nous essaierons, dans la mesure du possible de nous limiter au système international d'unités.
- Pour des raisons qui apparaîtront (peut-être plus claires) plus loin où dans votre progression dans le monde de l'électromagnétisme (et de la relativité), la constante de proportionnalité k est mise sous la forme:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

- ϵ_0 est appelée ***permittivité du vide*** et vaut $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ (SI)

Les champs électriques se manifestent en présence de charges positives ou négatives. Ils caractérisent l'influence qu'une charge peut exercer sur une autre charge.

Le champ magnétique caractérise l'influence d'une charge électrique en mouvement et exerce son action sur les charges en mouvement.

Champ statique et champ variable

Un Champ Statique: reste constant au cours du temps. On appelle courant continu un courant qui ne se déplace que dans un seul sens. Dans un appareil alimenté par une pile ou une batterie, le courant va du générateur à l'appareil puis revient vers le générateur. Ce courant crée **un champ magnétique statique. Le champ magnétique terrestre est aussi un champ statique.**

Champ Variable: En revanche, un **courant alternatif va créer un champ variable dans le temps. Un courant** alternatif change de sens à intervalles réguliers. Dans la plupart des pays européens, ce changement de sens s'opère avec une fréquence de 50 Hertz, soit 50 cycles par seconde. De même, le champ magnétique engendré par ce courant oscille à raison de 50 cycles par seconde.

Champs

Si nous considérons que la charge q_1 est une « charge test », et que la charge q_2 (ou toute autre répartition de charges autres que q_1) est la « source » de la force électrostatique agissant sur la charge test située à la position \vec{r} , alors la force agissant sur la charge test peut s'écrire:

$$\vec{F} = q_1 \frac{kq_2}{|\vec{r}_{12}|^2} = \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|} q_1 \vec{E}(\vec{r}) \quad \rightarrow \rightarrow$$

Dès lors qu'il n'y a plus ambiguïté entre la charge « test » (système considéré) et les charges « sources » (système extérieur), l'indice sur la charge test peut être enlevé et la force s'exerçant sur la charge test s'écrit:

$$\vec{F}(\vec{r}) = q \vec{E}(\vec{r}) \rightarrow$$

$\vec{E}(\vec{r})$ est le **champ électrique** (champ de vecteur électrique). Il règne en tous points de l'espace. **Il agit localement sur la charge test.**

La conséquence de **charges sources en mouvement**, est qu'elles exercent sur une charge test, elle même en mouvement, une force supplémentaire. Le champ agissant sur la charge test possède alors une composante supplémentaire - qui donne naissance à la **force de Lorentz**. Il s'agit du **champ magnétique \vec{B}** . La théorie montre qu'il y a une relation entre E et cB pour l'amplitude de l'effet des champs électrique et magnétique où **c** est la vitesse de la lumière (effet de B beaucoup plus faible que l'effet de E).

$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

force colinéaire à \vec{E} ———— ↗

————— ↖ *force perpendiculaire à \vec{v} et \vec{B}*

Charges dans la matière: conducteurs / isolants

Dans la matière, les charges électriques peuvent être « libres » (ou quasiment), ou alors « liées » (électron lié à un ion, particule chargée adsorbée, etc.). On distingue au point de vue du comportement électrique trois états de la matière:

- **conducteur** (ou métallique),

- **semi-conducteur**

- **isolant** (ou diélectrique),

conducteur: dans un conducteur (électronique ou ionique) des charges électriques q à une certaine concentration n (nombre par unité de volume) sont libres (plus ou moins) de se mouvoir sous l'action d'un champ électrique \vec{E} . Elles acquièrent alors une vitesse \vec{v} proportionnelle au champ (**loi d'Ohm**): $\vec{v} = \mu_q \vec{E}$. La quantité μ_q s'appelle la mobilité électrique.

Le produit $nq\vec{v}$ a les dimensions $[CT^{-1}L^{-2}]$, c'est à dire d'un courant (débit de charges par unité de temps) divisé par une surface. On parle alors de densité de courant \vec{j} « **de conduction** ».

$$\vec{j} = nq\vec{v} = nq\mu_q \vec{E} = \sigma \vec{E}$$

Charges dans la matière: conducteurs / isolants

à une dimension: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ → donne: $j = \sigma E$

Or pour un conducteur de section S et de longueur L on a:

$$R = \rho \frac{L}{S} = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S} \quad \text{et} \quad U = LE = RI = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S} jS \quad \text{soit} \quad U = RI \Leftrightarrow j = \sigma E$$

isolant: dans un isolant, les charges électriques ne peuvent bouger sous l'action d'un champ électrique, *que d'une toute petite distance* autour des « attracteurs » auxquels elles sont liées par une force de rappel (qui les empêche de se déplacer librement).

Aucun courant continu ne peut ainsi être généré et seuls les « déplacements » infimes des charges liées, *où les barycentres des charges positives et négatives ne coïncident pas tout le temps* peuvent donner naissance à un « **courant de polarisation** » en régime variable dans le temps (e.g. alternatif) .

En résumé:

- dans l'univers il y a des **charges électriques** qui interagissent entre elles.
- des charges **en mouvement** génèrent des **courants électriques**.
- ces charges engendrent des **champs électrique et magnétique**.
- toutes ces grandeurs, plus quelques **constantes fondamentales** (c , ϵ_0 , μ_0), sont reliées entre elles par un **ensemble cohérent d'équations** :

la théorie électromagnétique

— **structure & propriétés de la matière** (*physique, chimie, vivant...*)

— **électrotechnique** : production & acheminement d'énergie,
conversion énergie mécanique \leftrightarrow électromagnétique

— **télécommunication** : stockage et transmission de l'information

Les équations de Maxwell

<i>Forme locale</i>	<i>Forme globale</i>
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\int_V \nabla \cdot \mathbf{B} dV = \oint_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{B} dA = 0$: Conservation du flux magnétique
$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$	$\int_S \mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{H} dA = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{n} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) dA$: Loi d'ampère
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\int_S \mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{E} dA = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_S \mathbf{n} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} dA$: Loi d'induction de Faraday
$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	$\int_V \nabla \cdot \mathbf{D} dV = \oint_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{D} dA = 0$: Conservation de la charge

$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}$	\mathbf{B} :	Vecteur champ d'induction magnétique [T]
	\mathbf{H} :	Vecteur champ magnétique [A/m]
	μ_0 :	Perméabilité absolue du vide ($4\pi 10^{-7}$) [Vs/(Am)]
	μ_r :	Perméabilité relative d'un matériau [1]

$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}$	\mathbf{D} :	Vecteur déplacement électrique [As/m ²]
	\mathbf{E} :	Vecteur champ électrique [V/m]
	ϵ_0 :	Permittivité absolue du vide (8.85410^{-12}) [As/(Vm)]
	ϵ_r :	Permittivité absolue du vide [1]

$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}$	\mathbf{E} :	Vecteur champ électrique [V/m]
	\mathbf{J} :	Vecteur densité de courant [A/m ²]
	ρ :	Conductivité électrique [A/(Vm)]

PROPRIÉTÉS ELECTRIQUES

Résistivité électrique

Conductibilité électrique

Densité de courant

Champ électrique

Résistance électrique

Permittivité électrique

permittivité relative

susceptibilité électrique

Résistivité électrique ρ ($\Omega \cdot m$)

inverse de la

Conductibilité électrique σ ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$),

traduit la mobilité des électrons de conduction créant une

Densité de courant J (ampères/m²)

dans un

Champ électrique E (volt/m) :

$$E = \rho \cdot J = J/\sigma$$

Elle conditionne la

Résistance électrique R (Ω)

d'un conducteur de longueur l et de section S :

$$R = \rho \cdot (l/S)$$

Matériau	Résistivité à 20 °C ($\Omega \cdot m$)
Métaux et alliages	
Acier au carbone	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Acier inoxydable	$7 \cdot 10^{-7}$
Aluminium, pureté commerciale	$2,65 \cdot 10^{-8}$
Aluminium, alliage 2024	$3,4 \cdot 10^{-8}$
Argent, pureté commerciale	$1,47 \cdot 10^{-8}$
Cuivre, pureté commerciale	$1,71 \cdot 10^{-8}$
Cuivre, alliage Cu-45 % Ni (Constantan)	$4,9 \cdot 10^{-7}$
Étain, pureté commerciale	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Étain, alliage de brasure 60 % Sn-40 % Pb	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Fer, pureté commerciale	$9,7 \cdot 10^{-8}$
Laiton Cu-20 % Zn	$5,4 \cdot 10^{-8}$
Nickel, pureté commerciale	$7 \cdot 10^{-8}$
Or, pureté commerciale	$2,35 \cdot 10^{-8}$
Platine, pureté commerciale	$10,6 \cdot 10^{-8}$
Titane, pureté commerciale	$5 \cdot 10^{-7}$
Tungstène, pureté commerciale	$5,65 \cdot 10^{-8}$
Zinc, pureté commerciale	$6,2 \cdot 10^{-6}$
Semi-conducteurs (résistivité intrinsèque)	
Arséniure de gallium GaAs	10^6
Germanium	10^2
Silicium	$2,5 \cdot 10^3$
Céramiques et minéraux	
Alumine Al_2O_3 (99,9 %)	$> 10^{13}$
Carbure de silicium SiC	1 à 10^9
Diamant (synthétique)	$1,5 \cdot 10^{-2}$

Les valeurs de la **résistivité** couvrent plusieurs ordres de grandeur, Depuis

10^{-8} ($\Omega \cdot m$) pour les métaux

jusqu'à

10^{+17} ($\Omega \cdot m$) pour les polymères.

Matériau	Résistivité à 20 °C ($\Omega \cdot m$)
Céramiques et minéraux	
Diamant (naturel)	10^{10} à 10^{11}
Graphite	10^{-5} à $2 \cdot 10^{-5}$
Fibre de carbone	10^{-5} à $2 \cdot 10^{-5}$
Fibre de verre	$4 \cdot 10^{14}$
Nitruure de silicium SiN	$> 10^{12}$
Silice SiO ₂	$> 10^{18}$
Verre sodocalcique	10^9 à 10^{11}
Zircone yttrée (ZrO ₂ 3 % mol. Y ₂ O ₃)	10^{10}
Polymères et élastomères	
Élastomère butadiène-acrylonitrile	$3,5 \cdot 10^8$
Élastomère styrène-butadiène (SBR)	$6 \cdot 10^{11}$
Élastomère silicone	10^{13}
Époxyde	10^{10} à 10^{13}
Mélamine	10^{10}
Nylon (Polyamide 6 - 6)	10^{12} à 10^{13}
Polycarbonate (PC)	$2 \cdot 10^{14}$
Polychlorure de vinyle (PVC)	10^9 à 10^{14}
Polyéthylène (PE)	10^{14} à 10^{18}
Polymétacrylate de méthyle (PMMA)	$> 10^{12}$
Polypropylène (PP)	10^{13} à 10^{15}
Polystyrène (PS)	$> 10^{14}$
Polytétrafluoréthylène (PTFE)	10^{17}
Composites	
Béton (sec)	10^9
Bois (sec)	10^{14} à 10^{16}

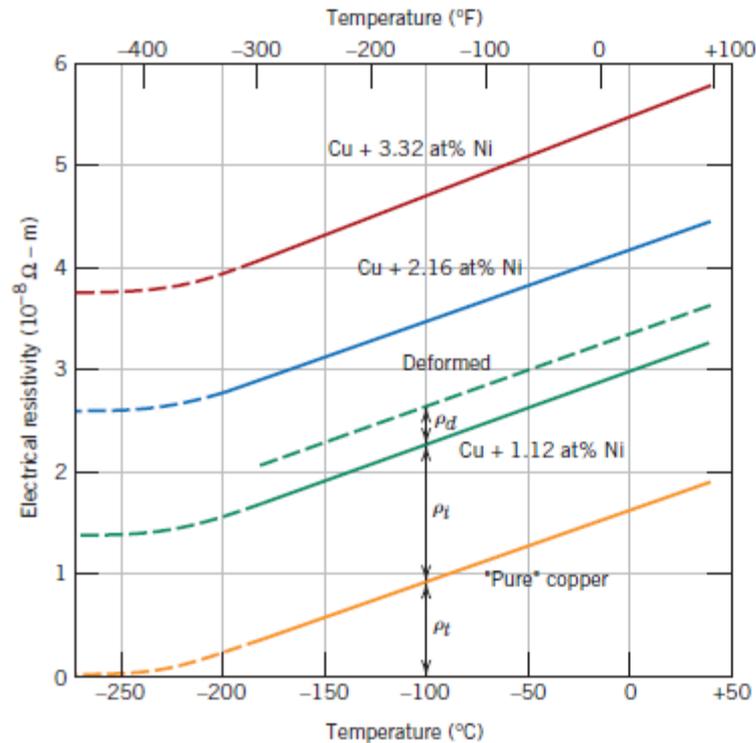


Figure 18.8 The electrical resistivity versus temperature for copper and three copper–nickel alloys, one of which has been deformed. Thermal, impurity, and deformation contributions to the resistivity are indicated at -100°C . [Adapted from J. O. Linde, *Ann. Physik*, 5, 219 (1932); and C. A. Wert and R. M. Thomson, *Physics of Solids*, 2nd edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.]

$$\rho_{\text{total}} = \rho_t + \rho_i + \rho_d$$

in which and represent **the individual thermal, impurity, and deformation** resistivity contributions, respectively.

Permittivité électrique

Un matériau sans électrons de conduction (diélectrique, à résistivité élevée) contient néanmoins des charges électriques localisées (électrons, protons ou ions) susceptibles de se déplacer à courte distance sous l'effet d'un champ électrique extérieur E , *provoquant ainsi une **polarisation*** du matériau. La **permittivité électrique ϵ (F/m)** caractérise cette polarisabilité.

Un condensateur dont les deux plaques d'aire A sont séparées par une épaisseur e de vide, de permittivité de référence $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m, possède une capacité

$$C = \epsilon_0 \cdot A/e.$$

Un condensateur dont les deux plaques sont séparées par un matériau diélectrique de permittivité ϵ voit sa capacité augmentée dans le rapport

$$\epsilon / \epsilon_0 = \epsilon_r = (1 + \chi).$$

ϵ_r :est la **permittivité relative ou constante diélectrique**,
 χ est la **susceptibilité électrique du matériau**.

En cas de champ électrique alternatif, la permittivité varie avec la fréquence d'oscillation par dissipation d'énergie sous forme thermique lors du déplacement des charges à chaque cycle. Cette proportion d'énergie dissipée est caractérisée par un **facteur de perte**.

La permittivité électrique

caractérise

la **polarisabilité des matériaux.**

Matériau	Permittivité relative ϵ_r (à 10^6 Hz)	Facteur de perte	Tension de claquage (10^6 V/m)
Milieus de référence			
Vide élevé	1	0	100
Air sec (p_{atm})	1	$< 10^{-5}$	2
Hexafluorure de soufre SF_6 (p_{atm})	1,1	$< 10^{-5}$	7
Eau	80	$\approx 0,1$	
Hydrocarbures chlorés	4 à 6	$1 \text{ à } 4 \cdot 10^{-5}$	50 à 100
Céramiques et minéraux			
Alumine Al_2O_3	4,5 à 9	$2 \cdot 10^{-3}$	6
Mica	7	10^{-3}	40
Porcelaine	6 à 8	$3 \cdot 10^{-3}$ à $2 \cdot 10^{-2}$	3 à 50
Titanates	15 à 12 000	$2 \cdot 10^{-3}$	2 à 12
Verre sodocalcique	7	10^{-2}	300 à 500
Zircone ZrO_2	7 à 10	$3 \cdot 10^{-3}$ à $2 \cdot 10^{-2}$	3 à 50
Polymères et élastomères			
Caoutchouc naturel	3 à 4	10^{-2} à 10^{-3}	12 à 24
Nylon (Polyamide 6-6)	3 à 4	10^{-2} à 10^{-3}	10 à 20
Polychlorure de Vinyle (PVC)	3 à 9	10^{-1} à 10^{-2}	5 à 40
Polyéthylène (PE)	2,3	10^{-4}	16 à 40
Polytétrafluoréthylène (PTFE)	2 à 3	10^{-4}	16
Résine époxyde (EP)	3,6	$2 \cdot 10^{-2}$	18

<i>Quantity</i>	<i>Symbol</i>	<i>SI Units</i>	
		<i>Derived</i>	<i>Primary</i>
Electric potential	V	volt	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2\cdot\text{C}$
Electric current	I	ampere	C/s
Electric field strength	\mathcal{E}	volt/meter	$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2\cdot\text{C}$
Resistance	R	ohm	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}\cdot\text{C}^2$
Resistivity	ρ	ohm-meter	$\text{kg}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{C}^2$
Conductivity	σ	$(\text{ohm}\cdot\text{meter})^{-1}$	$\text{s}\cdot\text{C}^2/\text{kg}\cdot\text{m}^3$
Electric charge	Q	coulomb	C
Capacitance	C	farad	$\text{s}^2\cdot\text{C}^2/\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Permittivity	ϵ	farad/meter	$\text{s}^2\cdot\text{C}^2/\text{kg}\cdot\text{m}^3$
Dielectric constant	ϵ_r	ratio	ratio
Dielectric displacement	D	farad-volt/m ²	C/m ²
Electric polarization	P	farad-volt/m ²	C/m ²

Le Magnétisme

- Les **substances magnétiques** sont les substances qui peuvent être à la fois attirées et repoussées par un aimant.

- Une **substance ferromagnétique** est une substance qui est attirée par un aimant mais qui ne peut pas être repoussée par ce dernier. De plus, les substances ferromagnétiques ne s'attirent pas entre elles.

- Exemple: Une clé est attirée par un aimant, mais elle n'est jamais repoussée par lui. Les clés ne s'attirent pas entre elles non plus.

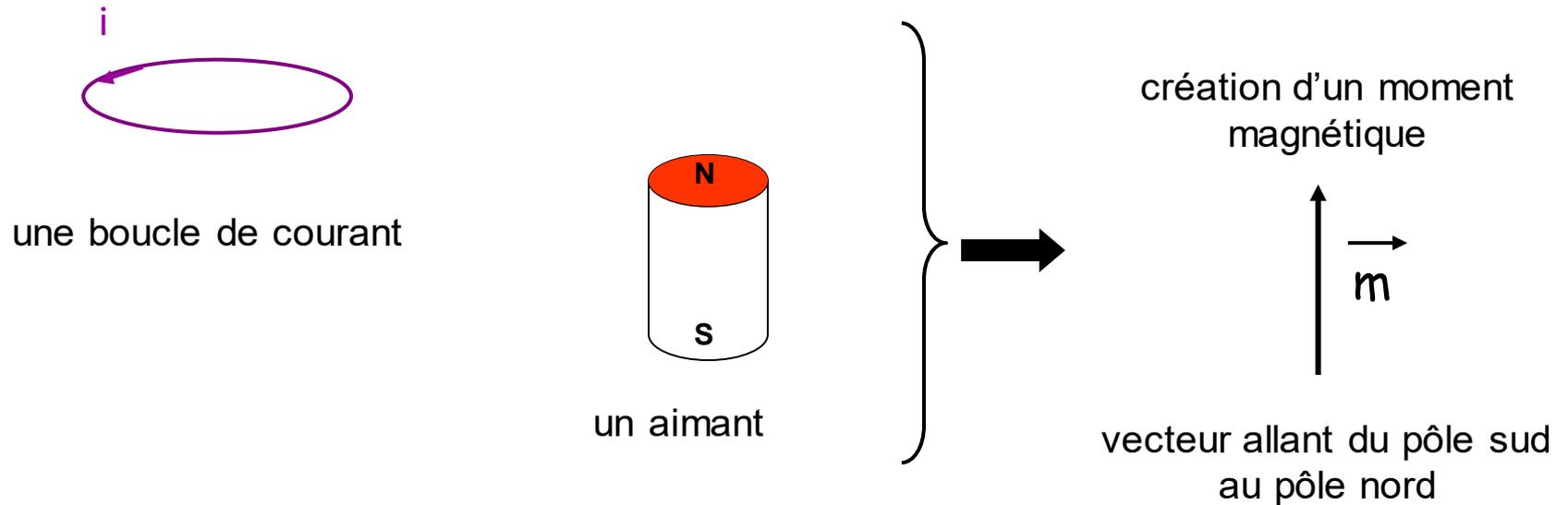
- La **rémanence** est un phénomène qui se produit lorsqu'une substance ferromagnétique garde temporairement les propriétés de l'aimant après avoir subi l'influence de ce dernier.

- Une substance **non magnétique** est une substance qui ne subit aucune influence de l'aimant. Plusieurs métaux, dont l'aluminium et le cuivre, sont non magnétiques.

- On serait porté à croire que tous les métaux sont attirés par l'aimant, mais c'est faux. Seuls le **Fe**, le **Ni**, le **Co** et le **Gd** réagissent à l'aimant. Tous les autres métaux sont donc non magnétiques.

La matière et le magnétisme

- dipôle magnétique

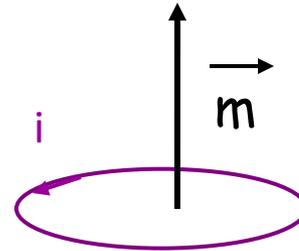


C'est le moment magnétique qui produit le champ magnétique \vec{B}

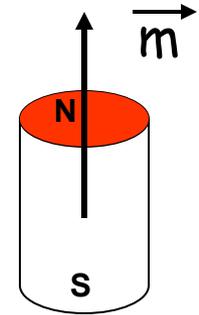
La matière et le magnétisme

- dipôle magnétique

moment magnétique \vec{m}

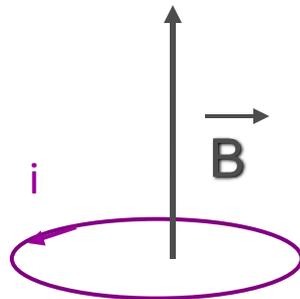


une boucle de courant

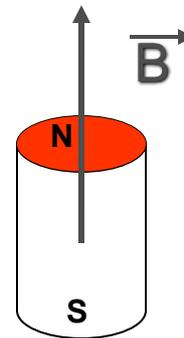


un aimant

le champ magnétique \vec{B}



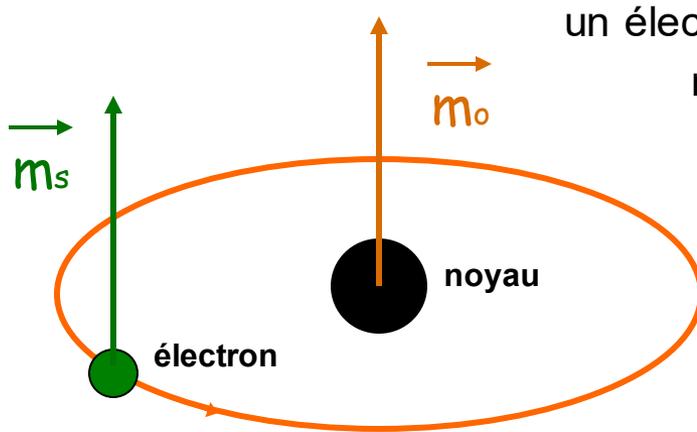
une boucle de courant



un aimant

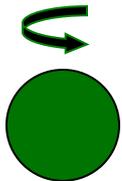
La matière et le magnétisme

- au niveau atomique

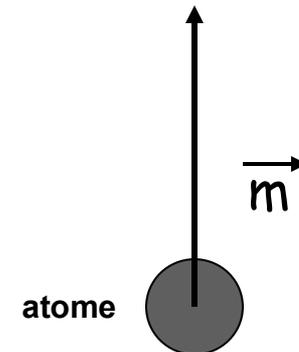


un électron tournant autour du noyau crée un moment magnétique orbital: \vec{m}_o

un électron tournant sur lui-même (spin) crée un moment magnétique de spin : \vec{m}_s



Le moment magnétique (atomique) \vec{m}
tient compte des deux contributions:

$$\vec{m} = \sum \vec{m}_o + \sum \vec{m}_s$$


La matière et le magnétisme

- Tous les atomes ont-ils un moment magnétique ?

 Non, pas tous !

Il est nécessaire d'avoir des couches non saturées : les gaz rares sont donc exclus.

En effet, pour simplifier, les e- se regroupent par paires de spin opposés et lorsque la couche est complète par ex: Neon: K(2)L(8) cela donne $\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow$

 Mais ...

Si les atomes possèdent des couches incomplètes alors ils possèdent un moment magnétique atomique.

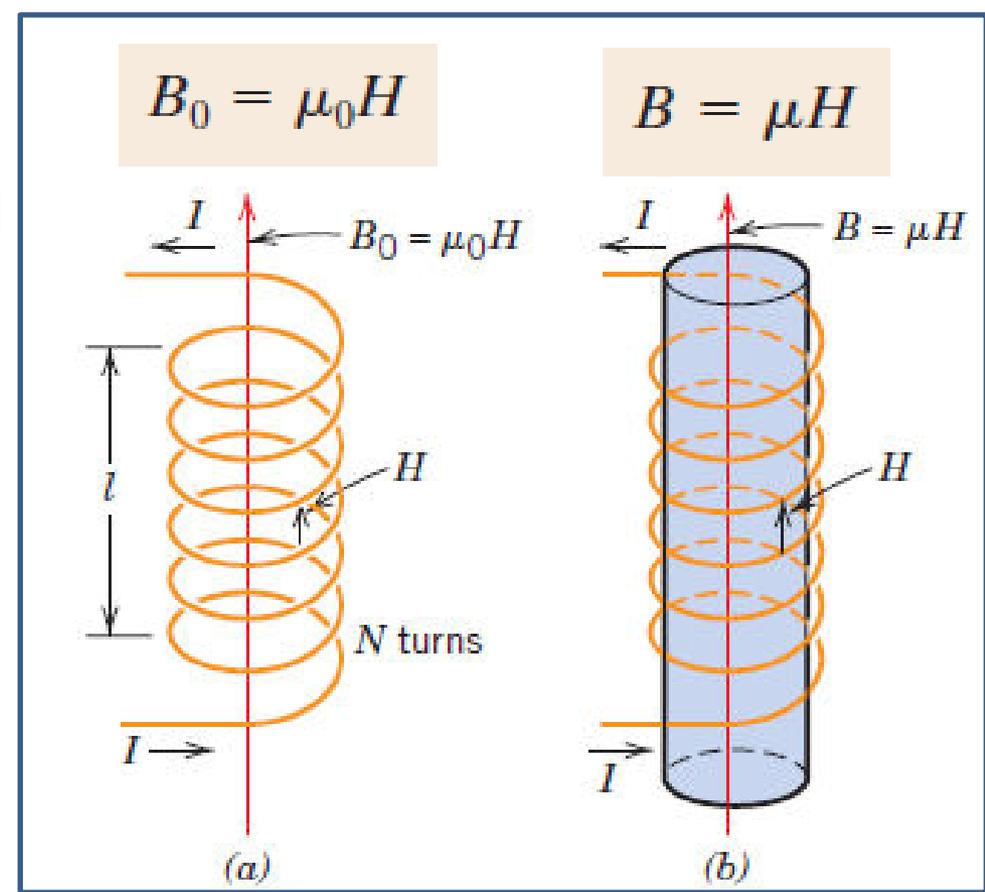
Le remplissage des couches électroniques devient complexe après les 18 premiers éléments et en particulier pour les métaux de transition: Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu ... Ils possèdent des couches incomplètes.

Le champ magnétique **H** généré par une bobine cylindrique dépend de:

- le courant **I**,
- le nombre de tours **N** et
- la longueur de bobine **l**,

selon l'équation:

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



(a) la densité de flux magnétique **B₀** dans le vide est égale:
μ₀: est la perméabilité du vide.

$$B_0 = \mu_0 H$$

(b) La densité de flux magnétique **B** dans un solide est égal:
μ: est la perméabilité du matériau solide.

$$B = \mu H$$

La perméabilité (μ): est une propriété spécifique du milieu à travers lequel passe le champ H et dans lequel B est mesuré.

Dans le vide

$$B = \mu H$$

Dans un solide

$$B_0 = \mu_0 H$$

-**L'aimantation du solide M** , est le total des moments magnétiques par unité e volume, elle est donnée dans l'expression

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

En présence d'un champ H , les moments magnétiques au sein d'un matériau ont tendance à devenir aligné avec le champ et le renforcer grâce à leurs champs magnétiques;

-La magnitude de M est proportionnelle au champ appliqué comme suit:

$$M = \chi_m H \quad \chi_m: \text{ est appelée la } \mathbf{susceptibilité magnétique}.$$

-La **susceptibilité magnétique** est le rapport entre l'aimantation et le champ appliqué.

-La susceptibilité magnétique et **la perméabilité relative** sont liées :

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES

En référence à la **perméabilité magnétique du vide**

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb/ (A} \cdot \text{m)},$$

on définit la **perméabilité magnétique relative**

$$\mu_r = \mu / \mu_0 = (1 + \chi)$$

où χ est la susceptibilité magnétique :

$\mu_r \leq 1$ pour les matériaux diamagnétiques;

$\mu_r \geq 1$ pour les matériaux paramagnétiques;

$\mu_r \gg 1$ pour les matériaux ferromagnétiques.

TYPE DE MAGNÉTISME

Le magnétisme moléculaire est provoqué par le mouvement des **électrons** et des **noyaux**. Ce dernier est 1000 fois plus faible que le magnétisme dû au mouvement des électrons

Sur le plan macroscopique :

$$\chi = \frac{\partial \vec{M}}{\partial \vec{H}} \quad \vec{M} = \chi \vec{H}$$

Diamagnétisme



pas de moment magnétique
(χ négative et très faible)

Paramagnétisme

T ↗

paramagnétisme
(χ positive et faible)

ferro, →

χ positive et très fort

antiferro, →

χ positive et fort

ferri, →

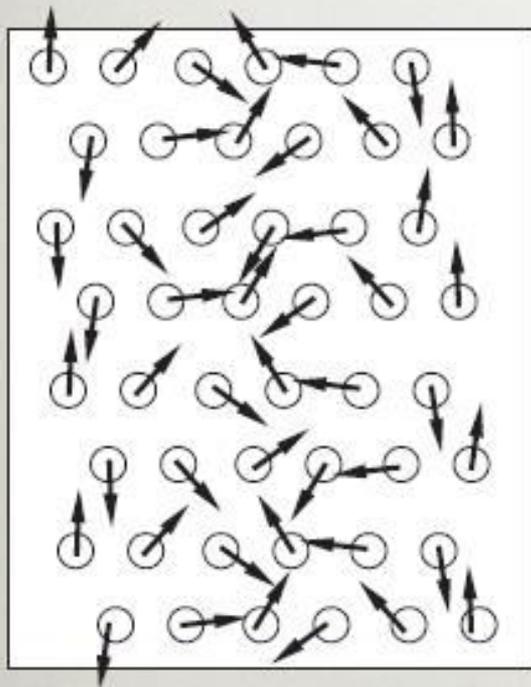
χ positive et très fort

complexe, →
etc.

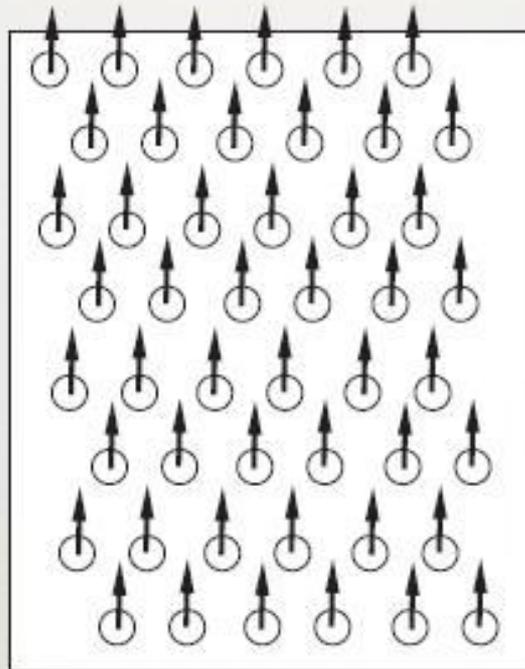
spécifique

<i>Diamagnetics</i>		<i>Paramagnetics</i>	
<i>Material</i>	<i>Susceptibility</i> χ_m (volume) (SI units)	<i>Material</i>	<i>Susceptibility</i> χ_m (volume) (SI units)
Aluminum oxide	-1.81×10^{-5}	Aluminum	2.07×10^{-5}
Copper	-0.96×10^{-5}	Chromium	3.13×10^{-4}
Gold	-3.44×10^{-5}	Chromium chloride	1.51×10^{-3}
Mercury	-2.85×10^{-5}	Manganese sulfate	3.70×10^{-3}
Silicon	-0.41×10^{-5}	Molybdenum	1.19×10^{-4}
Silver	-2.38×10^{-5}	Sodium	8.48×10^{-6}
Sodium chloride	-1.41×10^{-5}	Titanium	1.81×10^{-4}
Zinc	-1.56×10^{-5}	Zirconium	1.09×10^{-4}

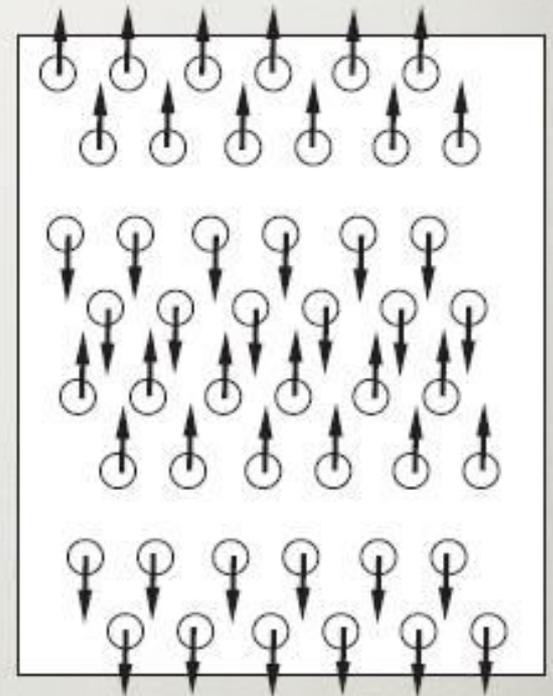
para

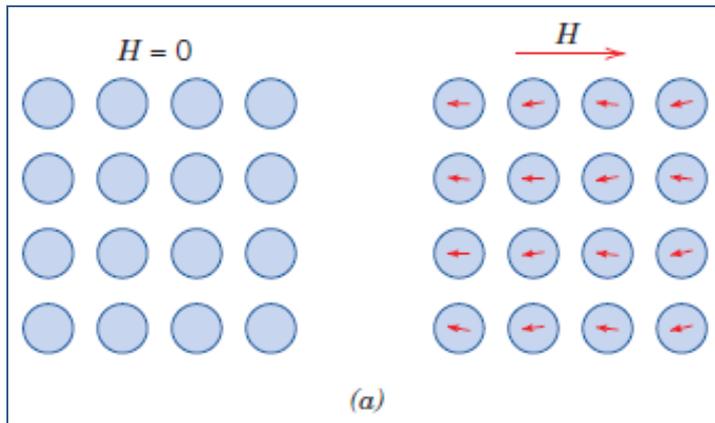


ferro



antiferro



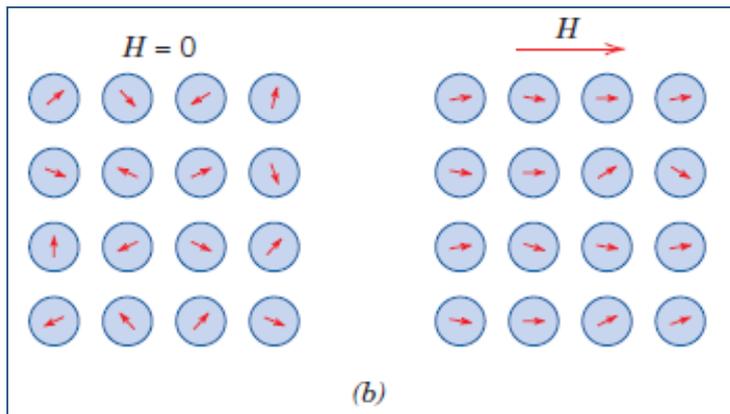


(a) Matériau diamagnétique

absence de champ extérieur, aucun dipôle n'existe;

présence d'un champ, les dipôles sont induit qui sont alignés en opposition de direction.

les flèches représentent les moments dipolaires atomiques



(b) Matériau paramagnétique

absence de champ extérieur, dipôle dans tous les sens;

présence d'un champ, les dipôles sont induit et alignés dans la direction du champ.

c) Matériau ferromagnétisme

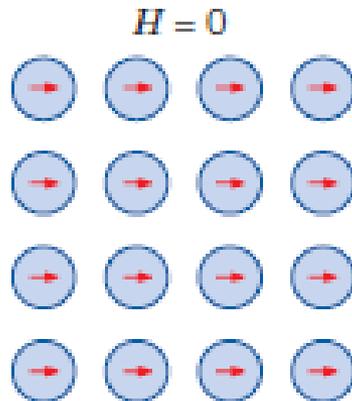
Certains matériaux métalliques possèdent un moment magnétique permanent en l'absence d'un champ externe et manifestent des aimantations très importantes et permanentes ($H \ll M$).

$$\cancel{B = \mu_0 H + \mu_0 M} \quad \longrightarrow \quad B \cong \mu_0 M$$

Des susceptibilités magnétiques très élevées.

Exemple: dans

[fer (ferrite BCC), cobalt, nickel et certains des métaux des terres rares comme le gadolinium (Gd)].



Alignement des dipôles pour un matériau ferromagnétique, qui existera même en absence de champ magnétique externe.

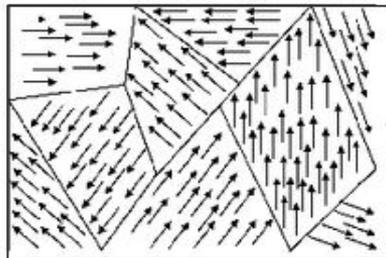
La matière et le magnétisme

- Les matériaux ferromagnétiques

➔ Par exemple : un clou ...

Lorsque l'on regarde, au niveau microscopique la structure de la matière d'un matériau ferromagnétique, on remarque l'existence de petits domaines d'aimantation homogène c'est à dire des lieux où les moments atomiques « jouent » collectifs, ils sont orientés dans une même direction. On appelle ces domaines les domaines de Weiss.

Pierre Weiss (1865-1940) , physicien, membre de l'académie des sciences .

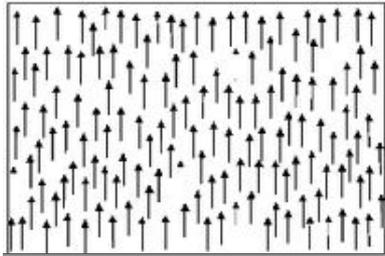


La matière et le magnétisme

- Les matériaux ferromagnétiques

➔ l'aimant droit:

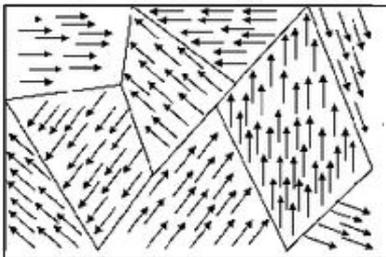
C'est un aimant permanent: un corps ferromagnétique qui, une fois aimanté, conserve un état très ordonné des moments magnétiques atomiques.



Le moment magnétique permanent macroscopique:
 $\vec{m} = \sum \vec{m}_{\text{atomiques}}$ (qui sont tous parallèles)

➔ Le clou:

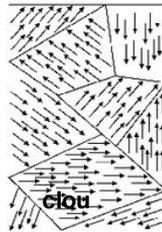
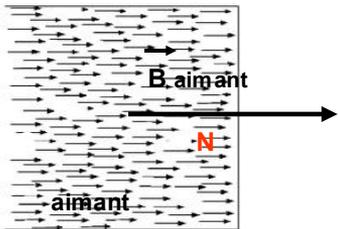
C'est un corps ferromagnétique qui peut s'aimanter.



Le moment magnétique macroscopique:
 $\vec{m} = \sum \vec{m}_{\text{atomiques}} = 0$

La matière et le magnétisme

Si l'aimant s'approche du clou ...

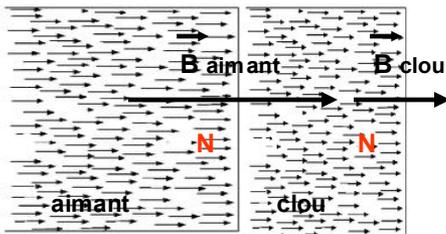
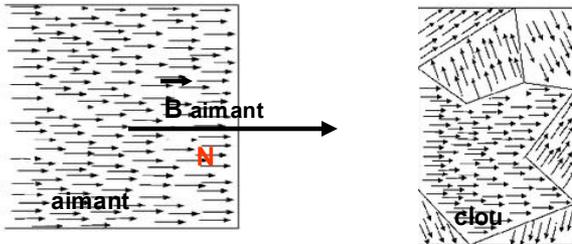


L'aimant droit « excite » le clou:

Le champ magnétique produit par l'aimant devient une excitation magnétique.

Les moments magnétiques des atomes du clou s'ordonnent parallèlement à l'excitation magnétique. Le clou s'aimante, il produit alors lui aussi son propre champ magnétique.

Des pôles nord et sud sont apparus sur le clou, il y a attraction.



Au final, le champ magnétique créé par l'ensemble est la somme vectorielle des deux champs.

Diamagnétisme et paramagnétisme

Le diamagnétisme résulte de changements dans le mouvement orbital des électrons induits par un champ externe. L'effet est extrêmement faible et en opposition avec le champ appliqué.

Tous les matériaux sont diamagnétiques. Les matériaux paramagnétiques sont ceux qui ont un dipôle atomique, qui sont traités individuellement et sont alignés dans le sens de un champ extérieur. Étant donné que les aimantations sont relativement petites et ne persistent que pendant un champ appliqué est présent, les matériaux diamagnétiques et paramagnétiques sont considérés être non magnétique.

Ferromagnétisme

Des aimantations importantes et permanentes peuvent être établies dans le champ ferromagnétique métaux (Fe, Co, Ni). Les moments dipolaires magnétiques atomiques sont d'origine spin, qui sont couplé et mutuellement alignés avec des moments d'atomes adjacents.

Antiferromagnétisme et ferrimagnétisme

On trouve le couplage antiparallèle des moments de spin cationiques adjacents pour certains matériaux ioniques.

Ceux dans lesquels il y a annulation totale des moments de spin sont appelés antiferromagnétiques. Avec le ferrimagnétisme, une aimantation permanente est possible car l'annulation du moment de rotation est incomplète. Pour les ferrites cubiques, la magnétisation nette résulte des ions divalents (par exemple, Fe²⁺) qui résident sur des sites de réseau octaédriques, le moments de rotation dont tous sont mutuellement alignés.

L'influence de la température sur le comportement magnétique

Avec l'augmentation de la température, l'augmentation des vibrations thermiques a tendance à contrer les forces de couplage dans les matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques. Par conséquent, l'aimantation de saturation diminue progressivement avec la température, jusqu'à la température de Curie, à quel point elle tombe à près de zéro; au-dessus de ces matériaux sont paramagnétiques.

Anisotropie magnétique

Le comportement M (ou B) contre H pour un monocristal ferromagnétique est anisotrope -c'est-à-dire, en fonction de la direction cristallographique le long de laquelle le champ magnétique est appliqué. La direction cristallographique pour laquelle est atteinte au plus bas le champ H est une direction de magnétisation facile; pour Fe, Ni et Co, les directions faciles sont, respectivement, $[100]$, $[111]$ et $[0001]$.

ANTIFERROMAGNETISME

Un couplage de moment magnétique entre atomes ou ions adjacents se produit dans des matériaux autres que ceux qui sont ferromagnétiques. Dans un tel groupe, ce couplage entraîne un alignement antiparallèle, des atomes ou des ions voisins dans des directions exactement opposées, sont appelés antiferromagnétisme.

le solide dans son ensemble ne possède aucun moment magnétique net.

FERRIMAGNETISME

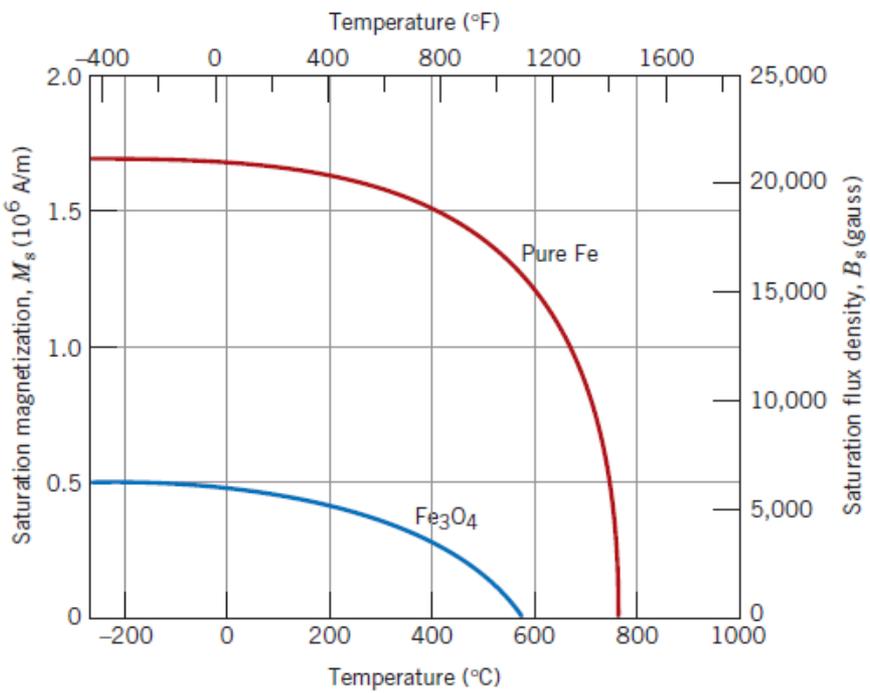
Certaines céramiques présentent également une aimantation permanente, appelée ferrimagnétisme.

les caractéristiques magnétiques macroscopiques des ferromagnétiques et des ferrimagnétiques sont similaires;

la distinction réside dans la source des moments magnétiques nets.

Aimantation à saturation/ Température de Curie Tc

L'aimantation à saturation est maximale à 0 K, température à laquelle les vibrations thermiques sont minimales. Avec l'augmentation de la température, l'aimantation de saturation diminue progressivement puis retombe brusquement à zéro à ce qu'on appelle la température de Curie.



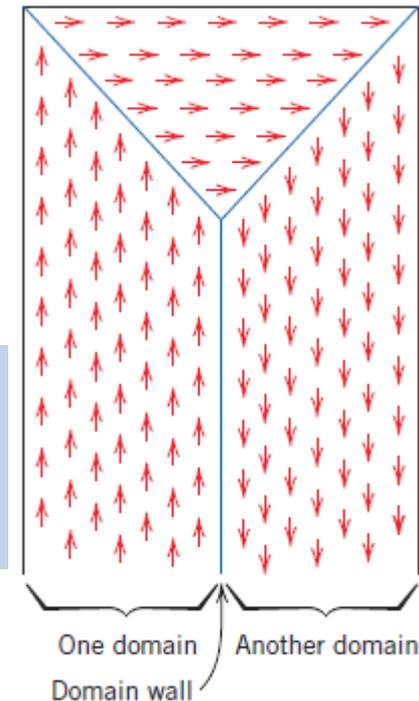
Domaines et Hystérésis

-**Tout matériau** ferromagnétique ou ferrimagnétique se trouvant à une température inférieure à T_c est composé de régions de petit volume dans lesquelles il y a un alignement dans la même direction de tous les moments dipolaires magnétiques qui est appelé un domaine, et chacun est magnétisé à sa magnétisation de saturation.

-**Normalement**, les domaines sont microscopiques, et pour un polycristallin, chaque grain peut être composé de plus d'un seul domaine. Ainsi, dans un morceau de matériau macroscopique, il y aura un grand nombre de domaines, et tous peuvent avoir des orientations de magnétisation différentes.

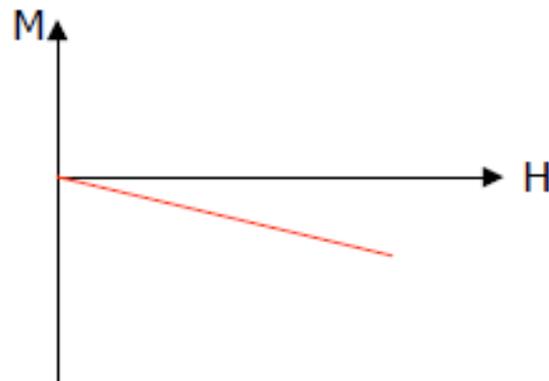
-**La magnitude** du champ M pour l'ensemble du solide est la somme vectorielle des aimantations de tous les domaines.

-**Pour un échantillon** non magnétisé, le vecteur correctement pondéré la somme des aimantations de tous les domaines est nulle.



• Matériaux diamagnétiques :

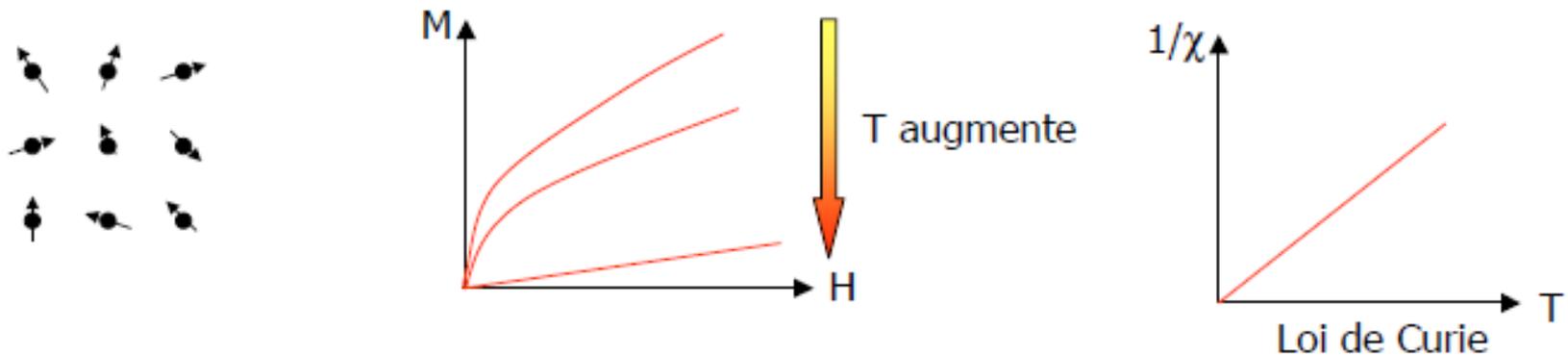
- Matériaux qui ne comportent que des atomes non magnétiques, aimantation induite par le champ qui disparaît lorsque ce champ est nul
- origine de ce magnétisme induit : modification du mouvement orbital des électrons sous l'effet du champ appliqué
- aimantation macroscopique colinéaire au champ excitateur mais de sens opposé. Le courant induit sous l'action du champ extérieur crée un champ qui s'oppose au champ extérieur.
- aimantation et champ excitateur faiblement proportionnels (comportement linéaire, $\chi < 0$ et faible)
- χ indépendante de la température
- tous les corps sont diamagnétiques, mais ce phénomène est peu important et n'est visible que si les atomes ou molécules ne possèdent pas de moment magnétique individuel intrinsèque qui masquerait l'effet



Exemples : cuivre, zinc, or, argent, silicium, plomb, alumine,...

• Matériaux paramagnétiques :

- les atomes portent un moment magnétique permanent dont l'orientation est aléatoire. Les distances interatomiques ou intermoléculaires sont suffisamment importantes pour que les moments n'exercent aucune interaction mutuelle
⇒ en l'absence de champ extérieur, ils ne sont soumis qu'à l'agitation thermique et l'aimantation globale est nulle
- sous l'effet d'un champ magnétique, l'orientation moyenne des moments change sous l'effet du couple qui les ramène suivant la direction et le sens du champ
⇒ apparition d'une aimantation induite parallèle au champ
- champ et aimantation de même sens ($\chi > 0$ et faible mais ~ 10 à 1000 fois plus grande que pour les matériaux diamagnétiques)
- χ décroît avec la température car l'agitation thermique qui gêne l'orientation des dipôles suivant le champ croît
- comportement d'autant plus linéaire que T est grande



Exemples : aluminium, platine, manganèse, sodium, ...

• Matériaux ferromagnétiques :

- Les atomes ou molécules possèdent chacun un moment magnétique individuel et ils sont en interaction avec leurs plus proches voisins => alignement collectif sur des domaines de l'ordre du micromètre.

=> existence de domaines spontanément aimantés : domaines de Weiss

Mais direction de l'aimantation variable d'un domaine à l'autre du fait de l'agitation thermique => aimantation totale nulle

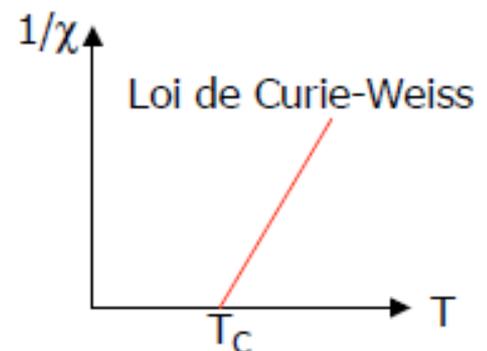
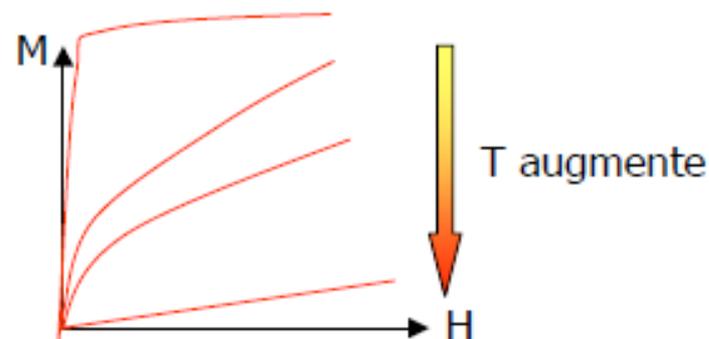
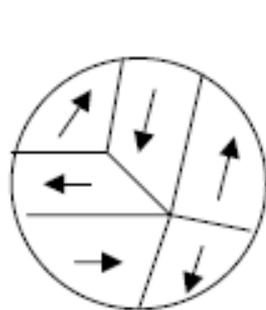
- modification des domaines sous l'effet d'un champ magnétique
=> apparition d'une aimantation induite parallèle au champ

- champ et aimantation de même sens ($\chi > 0$ et élevée)

- χ décroît avec la température car l'agitation thermique croît

- comportement essentiellement non linéaire (χ non constant avec H)

- si on supprime le champ, les domaines reprennent partiellement leur indépendance, mais les interactions magnétocristallines résiduelles font que les moments de chaque domaine restent partiellement alignés sur le champ initial => aimantation remanente. Qui disparaît si la température augmente ou si on applique un nouveau champ de sens opposé.



Exemples : fer, cobalt, nickel et leurs alliages

• Matériaux ferrimagnétiques et antiferromagnétiques :

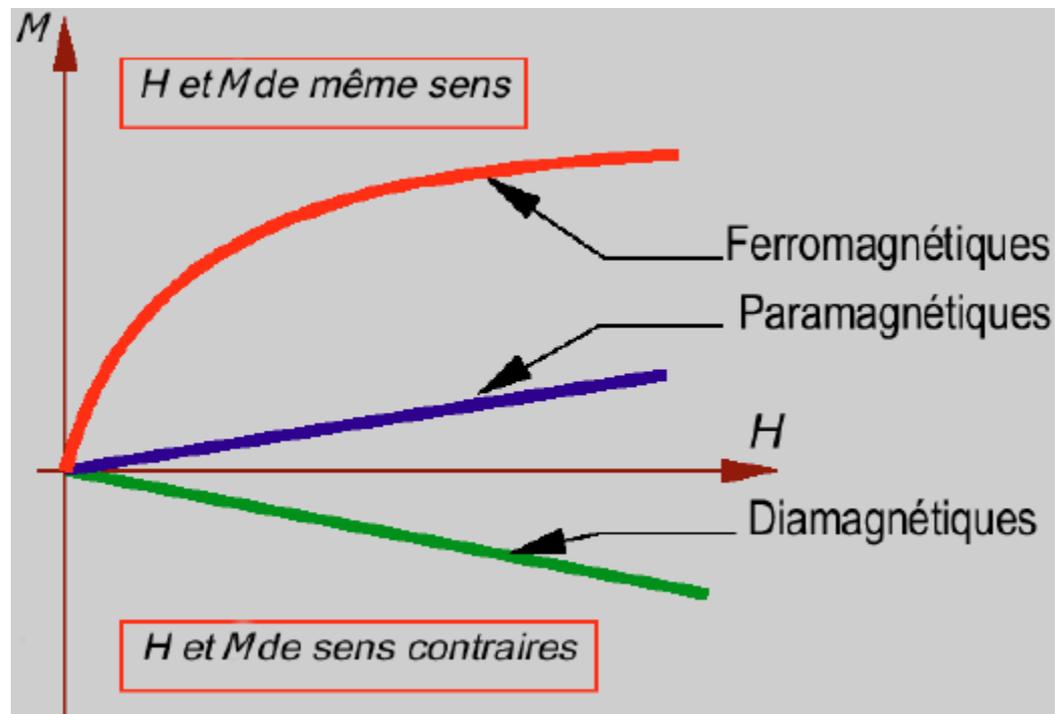
- Pour certains cristaux ioniques, dont la maille contient au moins deux espèces chimiques différentes, chaque ion possède un moment permanent différent et n'interagit pas de la même manière avec ceux de son espèce et avec les autres.

=> corps ferromagnétiques mais domaines d'aimantation modérée parce que les différents dipôles prennent des orientations opposées et se neutralisent partiellement. C'est comme si il existait deux sous réseaux d'aimantation opposée : ferrimagnétisme.

Exemple : Fe_3O_4 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CoO}$, ...

- Lorsque les deux sous réseaux se neutralisent parfaitement : antiferromagnétisme

Exemple : Fe_3O_4 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CoO}$, ...



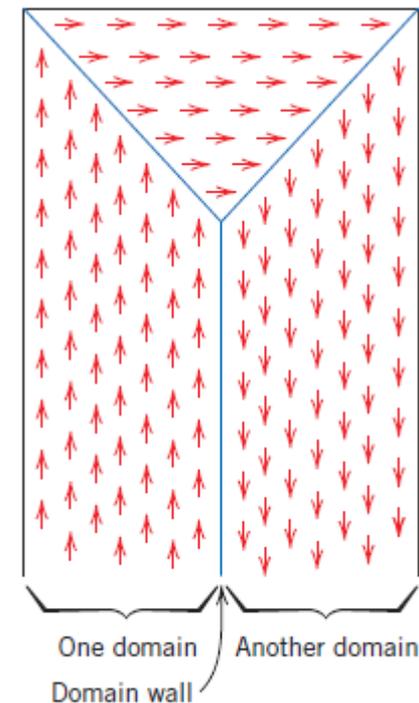
Domaines et Hystérésis

-**Tout matériau** ferromagnétique ou ferrimagnétique se trouvant à une température inférieure à T_c est composé de régions de petit volume dans lesquelles il y a un alignement dans la même direction de tous les moments dipolaires magnétiques qui est appelé un domaine, et chacun est magnétisé à sa magnétisation de saturation.

-**Normalement**, les domaines sont microscopique, et pour un spécimen polycristallin, chaque grain peut être composé de plus d'un seul domaine. Ainsi, dans un morceau de matériau macroscopique, il y aura un grand nombre de domaines, et tous peuvent avoir des orientations de magnétisation différentes.

-**La magnitude** du champ M pour l'ensemble du solide est la somme vectorielle des aimantations de tous les domaines.

-**Pour un échantillon** non magnétisé, le vecteur correctement pondéré la somme des aimantations de tous les domaines est nulle.



Cycle d'hystérésis

Le matériau étant magnétisé, on diminue le champ H

⇒ l'aimantation ne repasse pas sur la même courbe

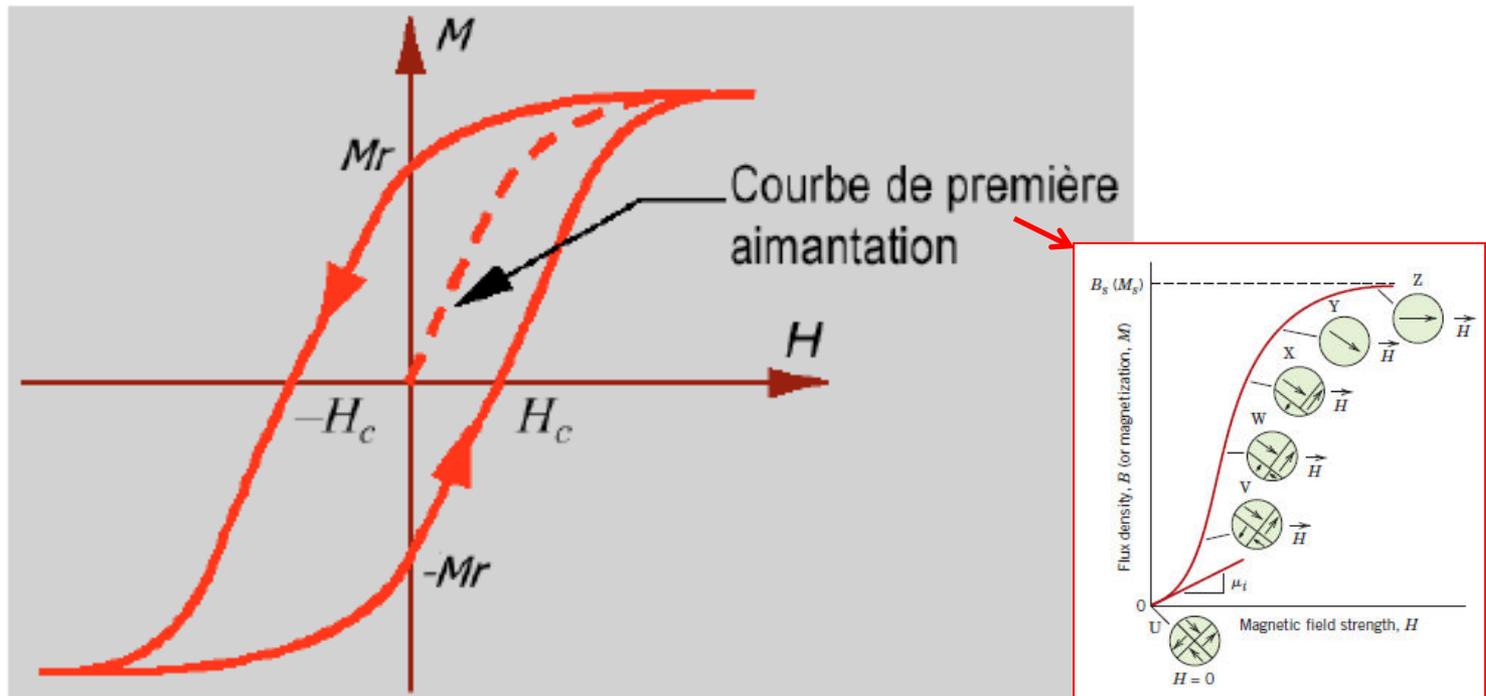
en particulier, pour un champ nul, l'aimantation garde une valeur > 0 :

M_R aimantation rémanente

le champ d'excitation doit s'inverser pour annuler M :

H_C champ coercitif

L'aimantation maximale est finie : aimantation de saturation M_{sat}



Domaines et Hystérésis

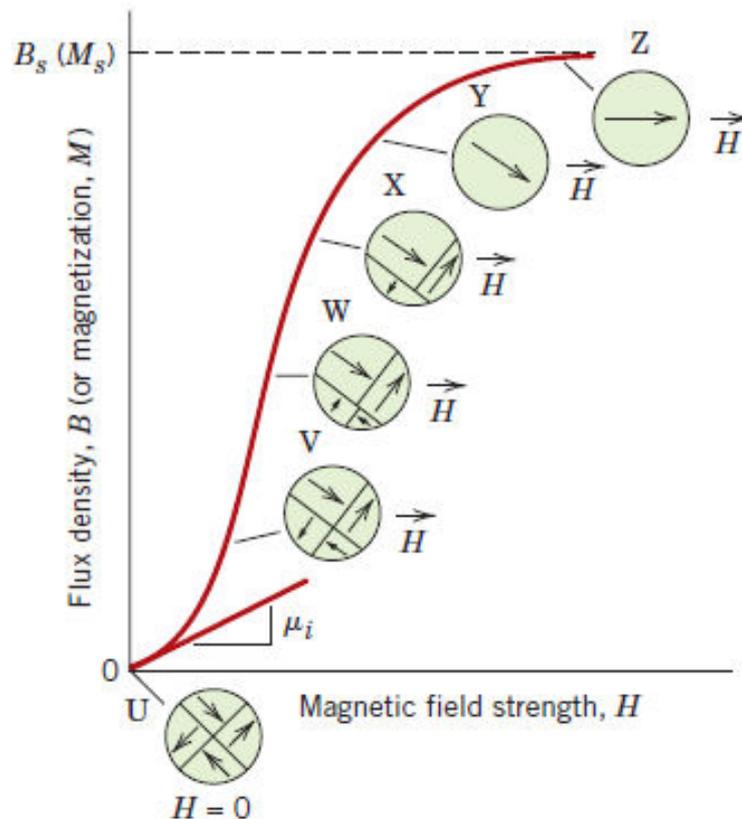


Figure 20.13 The B -versus- H behavior for a ferromagnetic or ferrimagnetic material that was initially unmagnetized. Domain configurations during several stages of magnetization are represented. Saturation flux density B_s , magnetization M_s , and initial permeability μ_i are also indicated. (Adapted from O. H. Wyatt and D. Dew-Hughes, *Metals, Ceramics and Polymers*, Cambridge University Press, 1974.)

Domaines et hystérésis

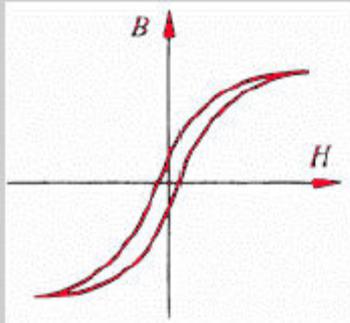
En dessous de sa température de Curie, un matériau ferromagnétique ou ferrimagnétique est composé de domaines — régions de petit volume dans lesquelles tous les moments dipolaires nets sont mutuellement alignés et la magnétisation est saturée.

La magnétisation totale du solide est juste la somme vectorielle correctement pondérée des aimantations de tous ces domaines.

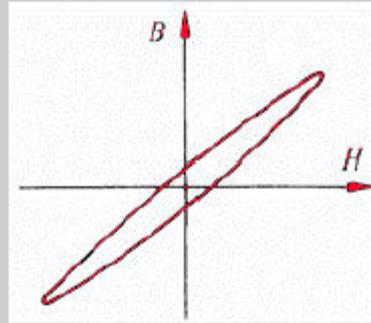
Lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué, les domaines ayant des vecteurs de magnétisation orientés dans le sens du domaine croissent au détriment des domaines qui ont des orientations de magnétisation opposées. À saturation totale, le solide entier est un seul domaine et la magnétisation est alignée avec la direction du champ.

Le changement de structure du domaine avec augmentation ou inversion d'un champ magnétique est réalisée par le mouvement des murs de domaine. Les deux hystérésis (le décalage du champ B derrière le Champ H) ainsi qu'une aimantation permanente (ou rémanence) résultent de la résistance au mouvement de ces murs de domaine.

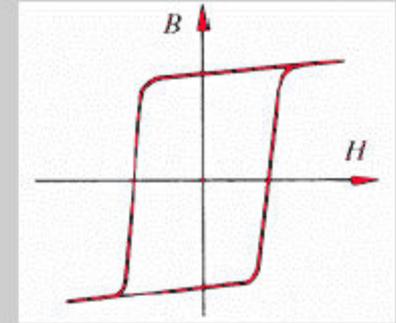
Différents matériaux



Permalloy (Fe-Ni)

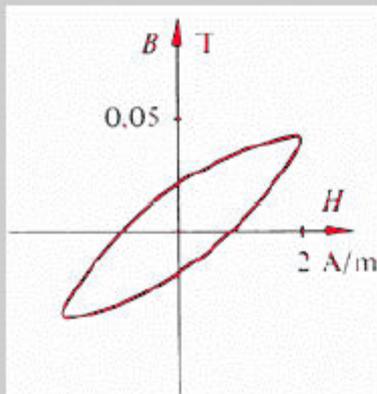


Isoperm (Fe-Ni)

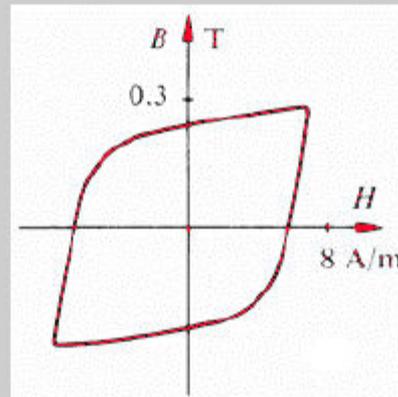


Alnico (Fe - Ni - Cu - Co)

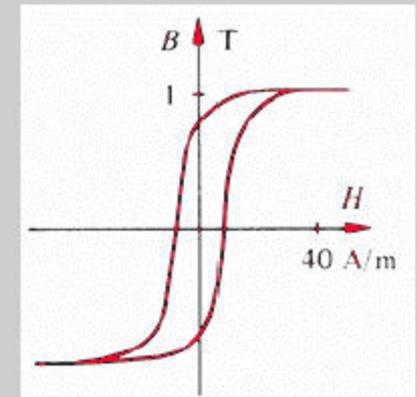
Différentes amplitudes de l'excitation appliquées au même matériau



Amplitude très faible



Amplitude moyenne



la saturation est atteinte.

Classification des matériaux ferromagnétiques

Matériaux ferromagnétiques doux

- l'aimantation croît rapidement avec le champ appliqué

- M_R plutôt élevée

- H_C plutôt faible

→ démagnétisation aisée

- Surface du cycle d'hystérésis faible

Ex : fer, certains aciers de fer et nickel, des ferrites

Matériaux ferromagnétiques durs

- l'aimantation croît lentement avec le champ appliqué

- M_R plutôt faible

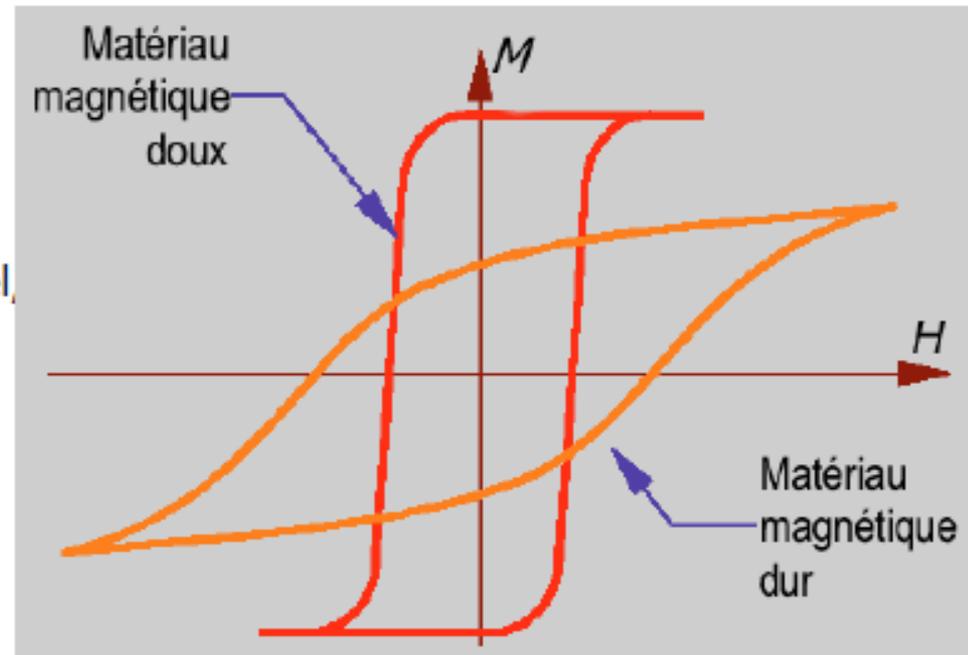
- H_C plutôt élevé

→ démagnétisation difficile : application aux aimants permanents

- Surface du cycle d'hystérésis grande

→ pertes magnétiques (proportionnelles à l'aire du cycle) assez importantes

Ex : magnétite , alliage AlNiCo , aciers spéciaux



Matériaux Magnétiques doux

- Ce sont des matériaux qui possèdent une aimantation rémanente facile à annuler (H_c est petit).

- A l'opposé des matériaux durs, ils présente un cycle d'hystérésis très petit ($1 \cdot 10^{-2} \text{ A/m} < H_c < 100 \text{ A/m}$).

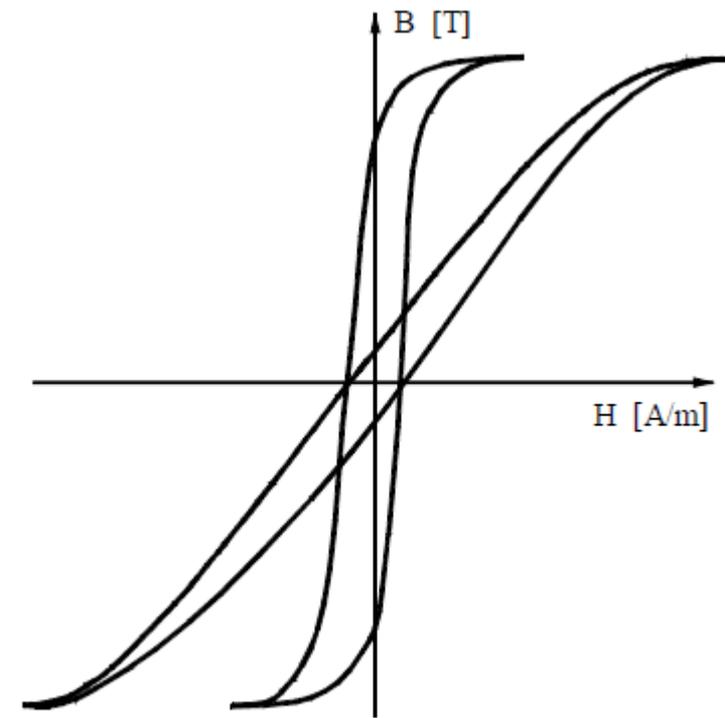


Figure 1-26 : Matériaux doux

Fe	:	$B_{\text{sat}} \rightarrow 2.2\text{T}$	
FeSi	:	$B_{\text{sat}} \rightarrow 1.8\text{T}$	<i>Bonne tenue mécc</i>
FeCo	:	$B_{\text{sat}} \rightarrow 2.4\text{T}$	<i>Faibles pertes, cher !!</i>
Céramique	:	$B_{\text{sat}} \rightarrow 0.5\text{T}$	<i>Très faibles pertes (H.F.)</i>
FeNi	:	$B_{\text{sat}} \rightarrow 1,3\text{T}$	<i>Faible H_C (Alimentation à découpage)</i>

Exemples d'alliages utilisés pour les tôles des transformateurs

FeSi 3.5% de Si

Saturation à $B_{\text{sat}} \approx 2\text{T}$
 Induction rémanente $B_r \approx 0$
 Champ coercitif $H_c \approx 0$
 Perméabilité relative $\mu_r = 7000 @ 50\text{Hz}$

FeSi à grains orientés

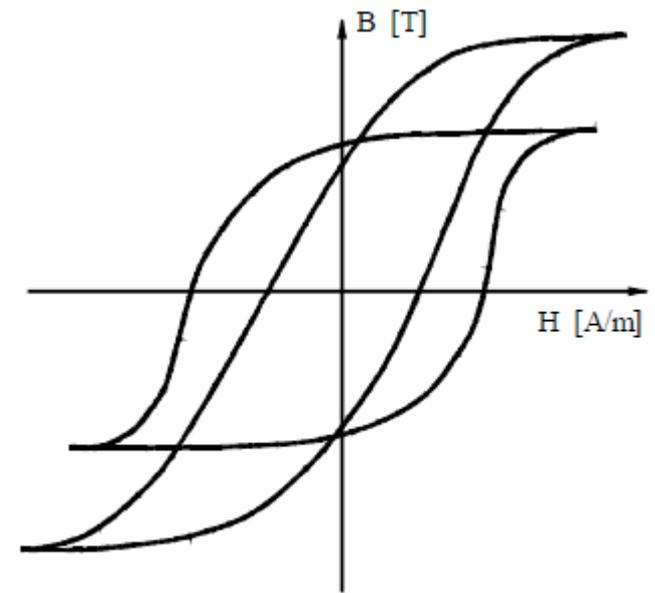
Saturation à $B_{\text{sat}} \approx 3\text{T}$
 Induction rémanente $B_r \approx 1.4\text{T}$
 Champ coercitif $H_c \approx 8\text{A/m}$
 Perméabilité relative $\mu_r > 40'000 @ 50\text{Hz}$

Matériaux Magnétiques durs

-Ce sont des matériaux qui présentent une forte aimantation rémanente et difficile à annuler (H_c est grand).

-Ils présentent un cycle d'hystérésis très large ($10^4 \text{ A/m} < H_c < 10^6 \text{ A/m}$).

-Ils sont utilisés en général comme aimant.

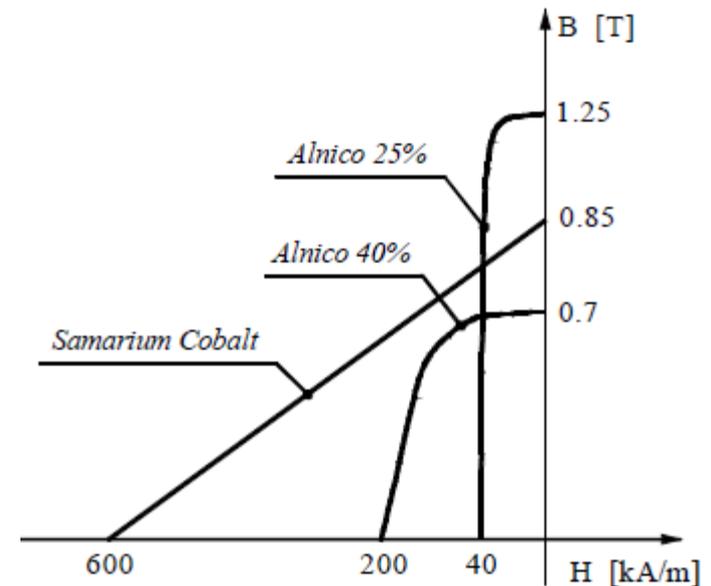


Ferrite (oxyde de fer)

Samarium-Cobalt (Sm-Co)

Saturation à $B_{sat} \approx 0.6 \text{ T}$
 $B_r \approx 0,4 \text{ T}$; $H_C \approx 200 \text{ kA/m}$

Saturation à $B_{sat} \approx 1 \text{ T}$
 $B_r \approx 0,8 \text{ T}$; $H_C \approx 500 \text{ kA/m}$



Caractéristiques d'aimants

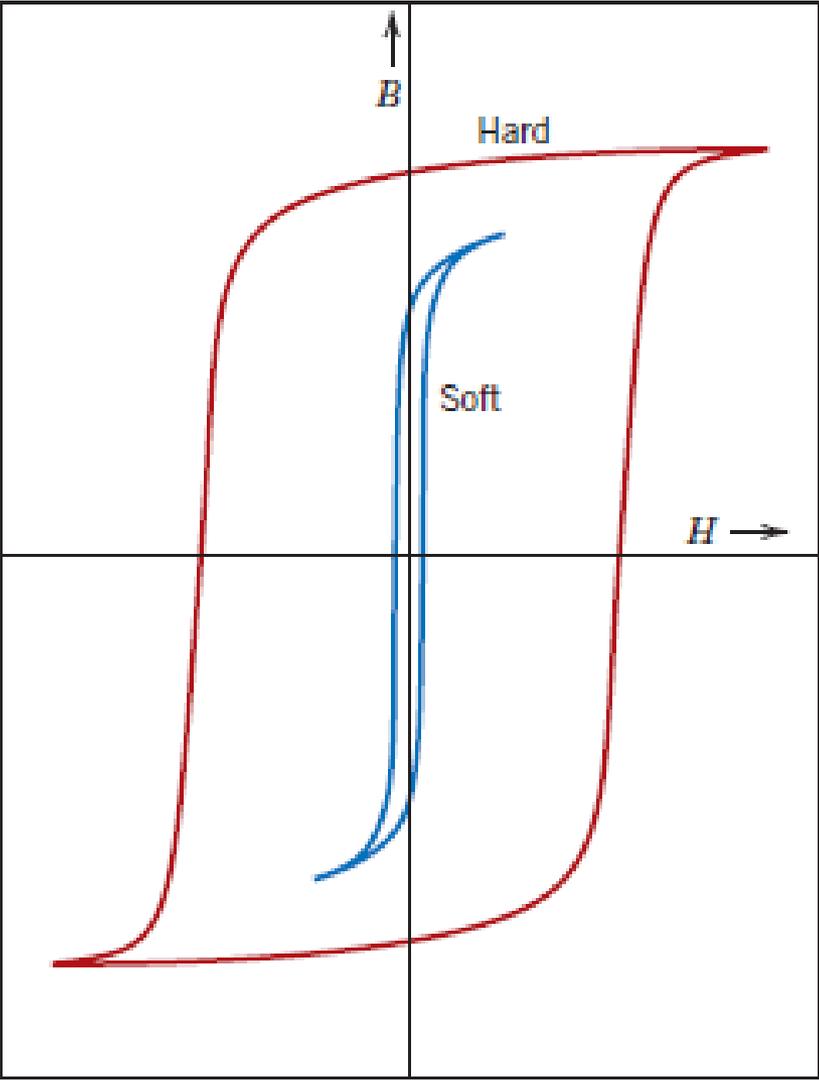
Matériaux magnétiques doux/Matériaux magnétiques durs

Pour les matériaux magnétiques doux, le mouvement de la paroi du domaine est facile pendant la magnétisation et démagnétisation. Par conséquent, ils ont de petites boucles d'hystérésis et une faible énergie pertes.

Le mouvement du mur de domaine est beaucoup plus difficile pour les matériaux magnétiques durs, ce qui entraîne des boucles d'hystérésis plus grandes; car de plus grands champs sont nécessaires pour démagnétiser ces matériaux, l'aimantation est plus permanente.

Stockage magnétique

Le stockage des informations est réalisé à l'aide de matériaux magnétiques dans les deux aiguilles formes particulières et en couches minces.



Supraconductivité

- La supraconductivité a été observée dans un certain nombre de matériaux dans lesquels, lors du refroidissement et au voisinage d'une température nulle absolue, la résistivité électrique disparaît.
- L'état supraconducteur cesse d'exister si la température, le champ magnétique ou le courant la densité dépasse la valeur critique.
- Pour les supraconducteurs de type I, l'exclusion du champ magnétique est terminée sous un champ critique, et la pénétration du champ est terminée une fois dépassé.
- Cette pénétration est progressive avec l'augmentation du champ magnétique pour les matériaux de type II.
- De nouvelles céramiques d'oxyde complexes sont en cours de développement avec des températures, qui permettent à l'azote liquide peu coûteux d'être utilisé comme liquide de refroidissement.

L'effet Meissner

phénomène d'exclusion totale de tout champ magnétique de l'intérieur d'un supraconducteur quand il est porté à une température inférieure à sa température critique.

Il a été découvert par Walther Meissner et Robert Ochsenfeld en 1933 et est souvent appelé **diamagnétisme parfait** ou **l'effet Meissner-Ochsenfeld**.

Table 20.7 Critical Temperatures and Magnetic Fluxes for Selected Superconducting Materials

Material	Critical Temperature T_C (K)	Critical Magnetic Flux Density B_C (tesla) ^a
Elements^b		
Tungsten	0.02	0.0001
Titanium	0.40	0.0056
Aluminium	1.18	0.0105
Tin	3.72	0.0305
Mercury (α)	4.15	0.0411
Lead	7.19	0.0803
Compounds and Alloys^b		
Nb-Ti alloy	10.2	12
Nb-Zr alloy	10.8	11
PbMo ₆ S ₈	14.0	45
V ₃ Ga	16.5	22
Nb ₃ Sn	18.3	22
Nb ₃ Al	18.9	32
Nb ₃ Ge	23.0	30
Ceramic Compounds		
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92	—
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110	—
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125	—
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₂ O ₈	153	—

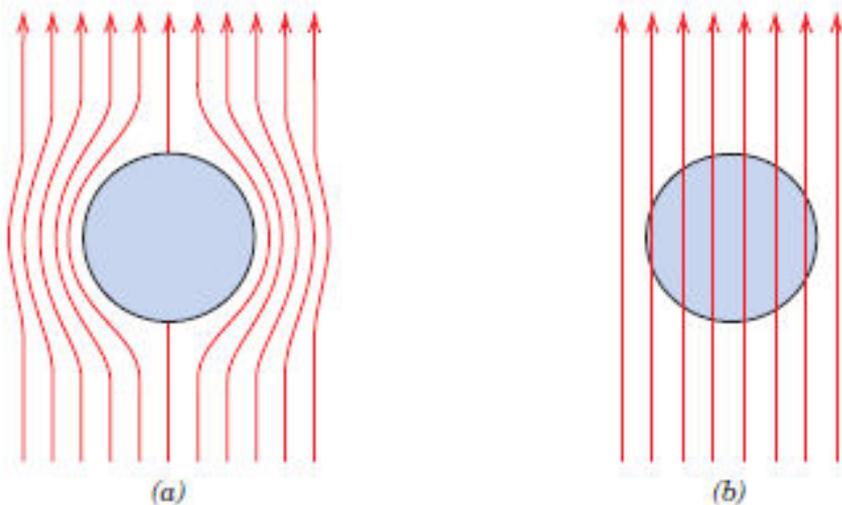


Figure 20.28 Representation of the Meissner effect. (a) While in the superconducting state, a body of material (circle) excludes a magnetic field (arrows) from its interior. (b) The magnetic field penetrates the same body of material once it becomes normally conductive.



Applications du magnétisme

Les applications et implications du champ magnétique sont nombreuses, même dans la vie courante :

C'est une composante de la lumière, il explique l'orientation des boussoles, l'orientation animale (!?) les montres à quartz (à aiguilles)

- l'imagerie par résonance magnétique (IRM)
- Il permet la construction d'alternateurs et de moteurs électriques.
- Le stockage d'informations sur disques durs se fait à l'aide de champs magnétiques (les cassettes vidéo...)
- Des champs magnétiques de très forte intensité sont utilisés dans les accélérateurs de particules pour focaliser un faisceau de particules très énergétiques dans le but de les faire entrer en collision.
- l'imagerie par résonance magnétique (IRM)
- La lévitation magnétique offre des perspectives dans les transports.

Les champs électriques

Les champs électriques se manifestent en présence de charges positives ou négatives. Ils caractérisent l'influence qu'une charge peut exercer sur une autre charge. Par exemple, tout fil électrique sous tension produit un champ électrique dans son voisinage. Ce champ existe même si aucun courant ne circule.

Par exemple, le champ électrique présent autour du câble d'alimentation d'un appareil électrique ne disparaît que lorsque l'appareil est débranché ou lorsque prise comporte un interrupteur, lorsque cet interrupteur est fermé. Il est en revanche toujours présent au niveau du câble situé derrière le mur.

Plus la charge est importante, plus le champ est fort et son intensité diminue rapidement avec la distance.

Le champ électrique est lié à la **tension électrique** - que l'on mesure en **Volt (V)** - et à la **distance de la source**.

L'intensité d'un champ électrique se mesure donc en volts par mètre (V/m).

Les conducteurs métalliques constituent une barrière efficace contre les champs électriques, ainsi que les matériaux de construction, les arbres, etc. Autrement dit, le champ électrique créé par les lignes de transport d'électricité situées à l'extérieur est réduit par la présence de murs, de bâtiments ou d'arbres.

Lorsque ces lignes sont enterrées, le champ électrique en surface est à peine décelable.

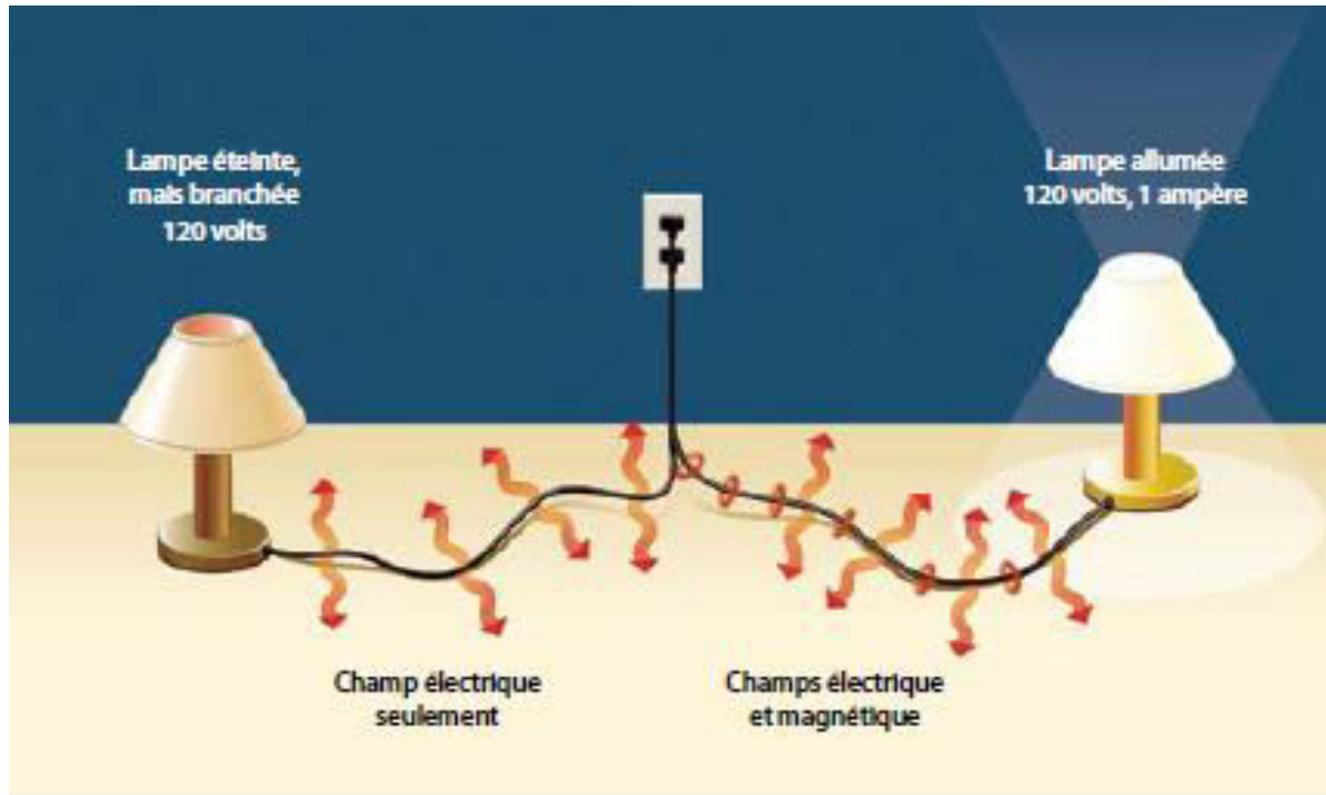
- **Champs électriques et champs magnétiques**
- **Les champs électromagnétiques d'origine naturelle**
- **Les champs électromagnétiques créés par l'activité humaine**

- **Champ statique et champ variable**

Un champ statique reste constant au cours du temps/(courant **continu se déplace que dans un seul sens**. En revanche, un **courant alternatif va créer un champ variable dans le temps**.

- **Les champs électromagnétiques de basse et de haute fréquences**

Les générateurs et les appareils électriques sont les sources les plus courantes des champs électriques et magnétiques de **basse fréquence dans lesquels baigne notre environnement**. Les téléphones portables, les émetteurs de radio et de télévision, les radars et les micro-ondes L'intensité de ce champ est mesurée par la densité de puissance (**W/m²**).



Le **champ électrique (V/m)** est lié à la tension. Il survient en **présence de charges**

Plus la tension d'alimentation d'un appareil est grande, plus le champ électrique qui en résulte est intense.

Le **champ magnétique** est engendré par le courant électrique.

(mouvement des électrons)

Ainsi, lorsqu'un appareil
-est allumé, il produit un champ magnétique.
-est éteint, le champ magnétique disparaît.

Ordre de grandeurs

- Aimants permanents B de l'ordre de **0,001 à 0,01 T**.
 - Petit aimant : 50 mT
 - Gros aimant : 1 T
 - Électroaimant : 5 T
- Champ magnétique terrestre = **30-50 μT** (0,0000050 T)
- Bobine supraconductrice : **20 T**
- Bobine à très fort refroidissement : **25 T**
- Champ dans étoile à neutrons : **10^8 T** (cent millions de tesla)

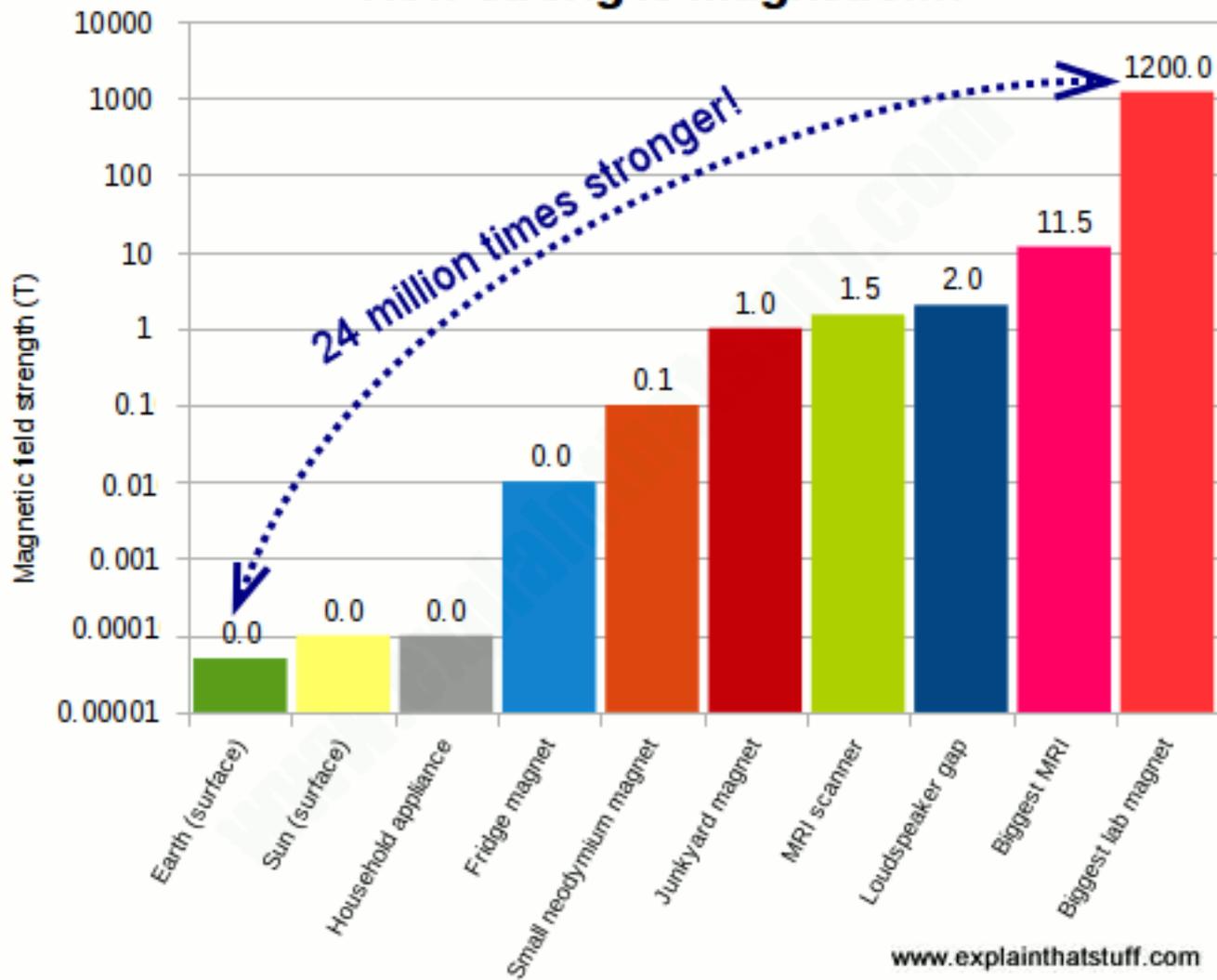
$$1 \text{ A/m} = 1.25 \mu\text{T}$$

CHAMP MAGNÉTIQUE MOYEN DE CERTAINS APPAREILS (μT)

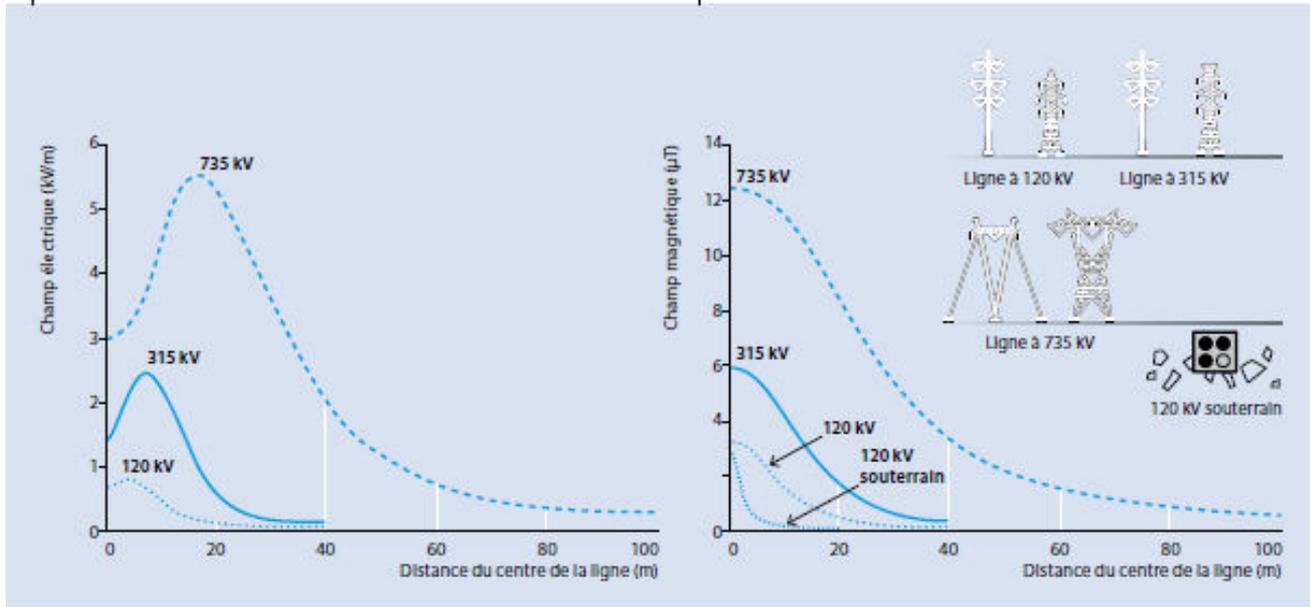
	Distance de la source		
	15 cm	30 cm	1,2 m
Fer à repasser	0,8	0,1	–
Lave-vaisselle	2,0	1,0	–
Élément de cuisinière	3,0	0,8	–
Lampe fluorescente en tube	4,0	0,6	–
Malaxeur	10,0	1,0	–
Four à micro-ondes	20,0	1,0	0,2
Scie circulaire	20,0	4,0	–
Séchoir à cheveux	30,0	0,1	–
Aspirateur	30,0	6,0	0,1
Ouvre-boîte	60,0	15,0	0,2
Photocopieur	90,0	20,0	1,0
	1 cm	moy. corps entier	
Couverture chauffante classique	10,0	1,5	–
Rasoir électrique	800,0	–	–

Source : *EMF In Your Environment*, Environment Protection Agency, U.S.A., 1992.

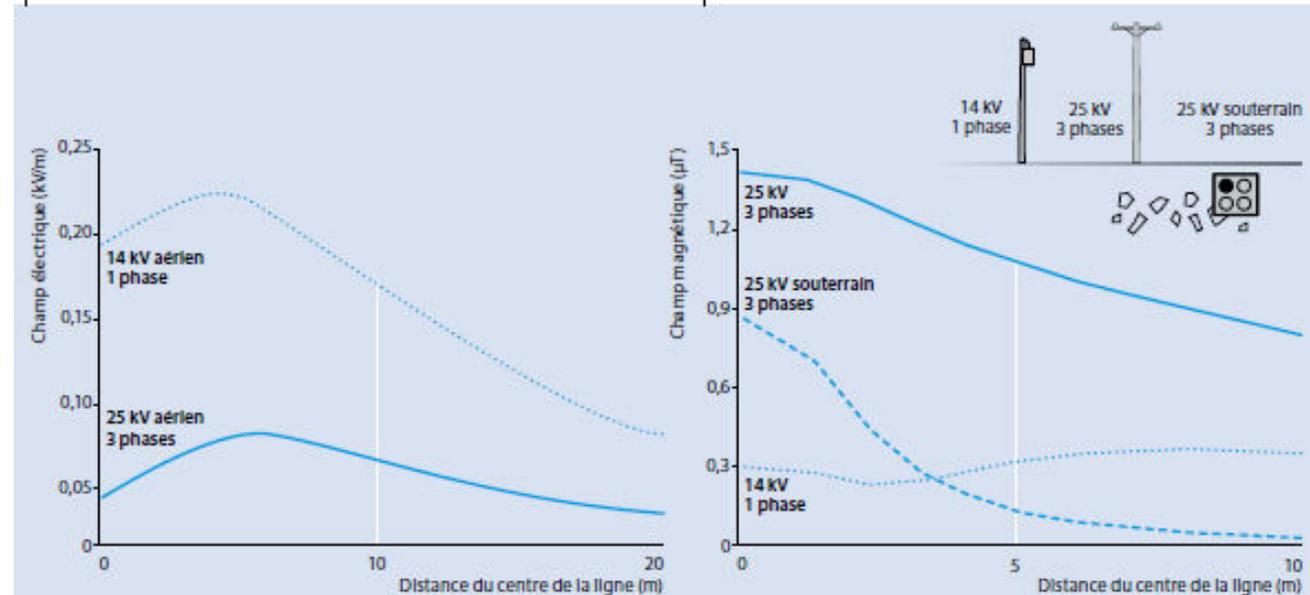
How strong is magnetism?



**CHAMP ÉLECTRIQUE GÉNÉRÉ
PAR LES LIGNES À HAUTE TENSION (kV/m)**



**CHAMP ÉLECTRIQUE GÉNÉRÉ
PAR LES LIGNES DE DISTRIBUTION (kV/m)**



Effets des champs électriques et magnétiques chez l'humain.

La présence d'un champ électrique ou d'un champ magnétique à **60 Hz** – **c'est-à-dire a extrême basse fréquence** – imprime aux charges électriques à l'intérieur du corps un mouvement alternatif de la même fréquence, soit de 60 oscillations par seconde. Cela fait apparaître dans le corps de petits courants électriques qui disparaissent dès que l'exposition cesse.

Ces micro courants ne s'accumulent pas dans le corps. Ils sont généralement imperceptibles car leur intensité est trop faible pour exciter les nerfs et les muscles. Ils sont même plus faibles que les courants produits naturellement par l'activité du cœur et du cerveau.

Par exemple, en présence d'un champ magnétique **de $0,15 \mu\text{T}$** , les microcourants provoqués dans le corps sont environ **5 000 fois plus petits** que les courants naturels du corps humain.

Les premiers effets des champs magnétiques à 60 Hz sur les humains n'apparaissent qu'au-dessus de **$10\,000 \mu\text{T}$** , une intensité très élevée qui n'est atteinte qu'en situation expérimentale.

La majorité des personnes ne ressentent les premiers effets des champs électriques qu'à des niveaux rarement atteints dans la vie quotidienne. Dans le cas d'un courant alternatif à 60 Hz, le champ n'est perçu qu'à partir de **3000 V/m** , sous forme de chatouillements ou de microdécharges désagréables. **A partir de $10\,000 \text{ V/m}$** , on perçoit presque toujours un chatouillement. Les microdécharges peuvent être douloureuses, mais elles ne sont pas dangereuses.

FIN

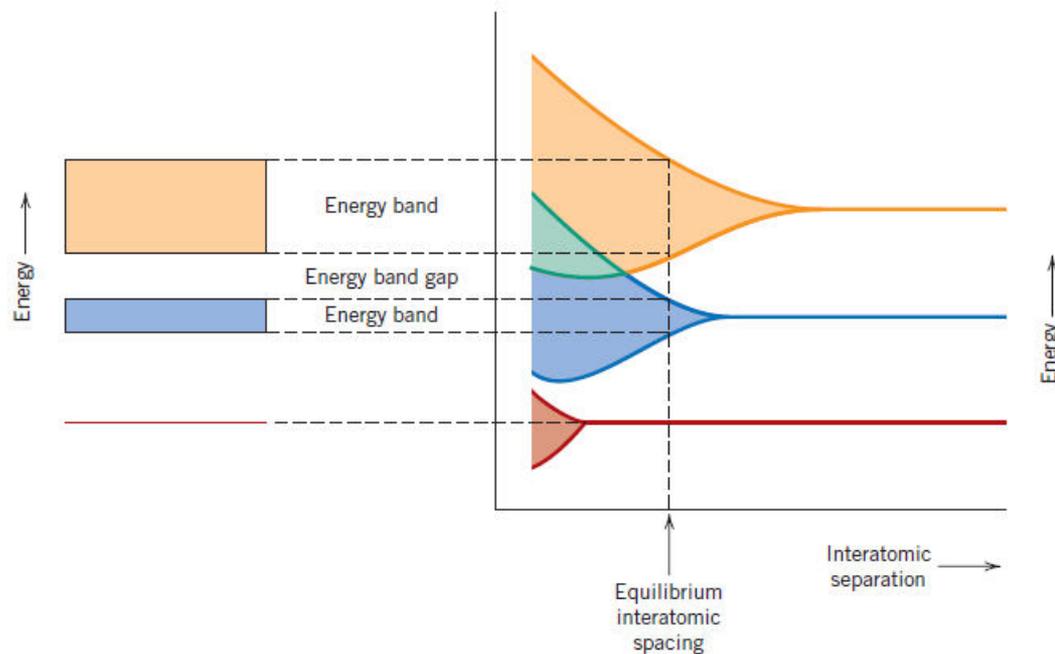
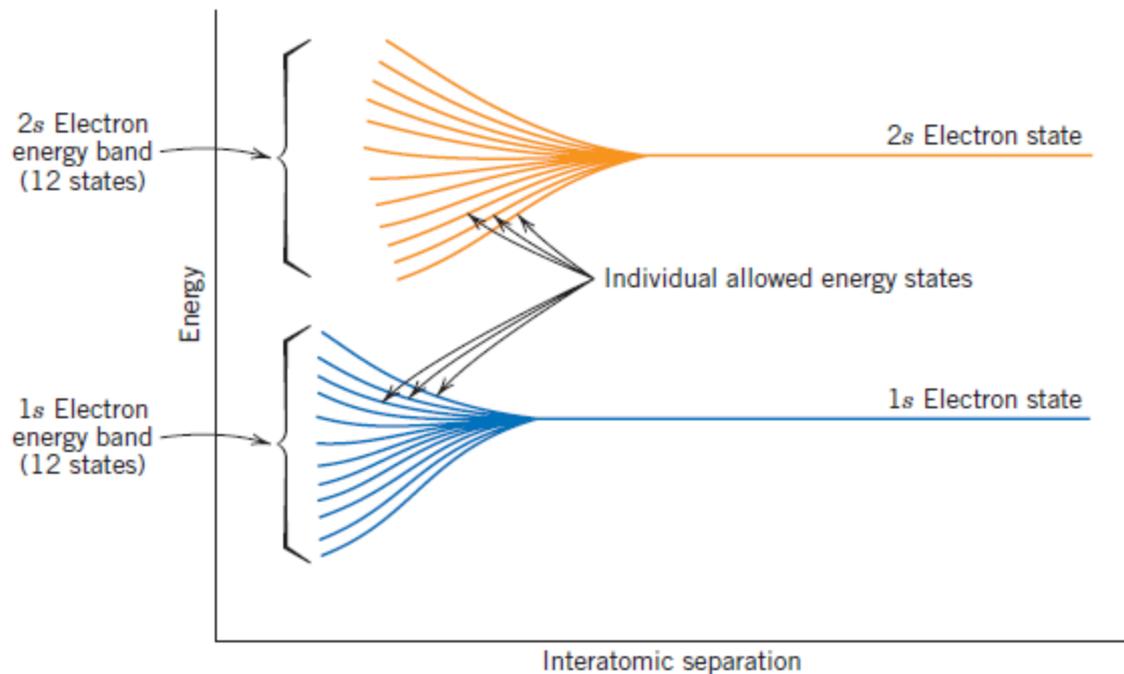
Résistance et Résistivité?

R is the resistance of the material through which the current is passing.

The **resistivity is independent of specimen geometry but** related to *R* through the expression

Figure 18.2

Schematic plot of electron energy versus interatomic separation for an aggregate of 12 atoms ($N = 12$). Upon close approach, each of the $1s$ and $2s$ atomic states splits to form an electron energy band consisting of 12 states.



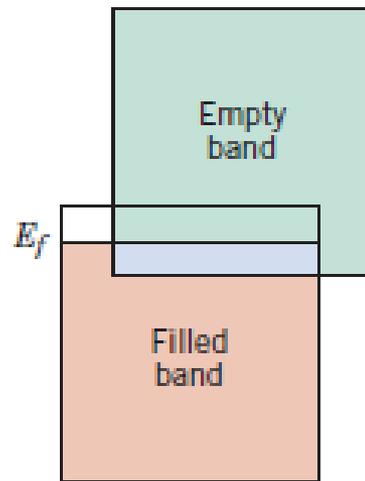
(a)

(b)

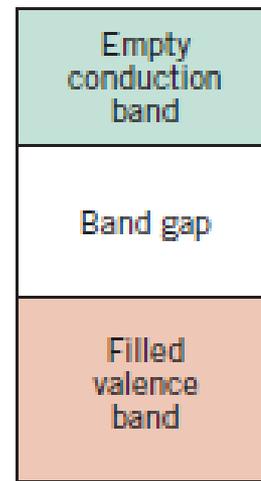
Four different types of band structures are possible at 0 K. In the first, *one outermost band is only partially filled with electrons. The energy corresponding to the highest filled state at 0 K is called the **Fermi energy***



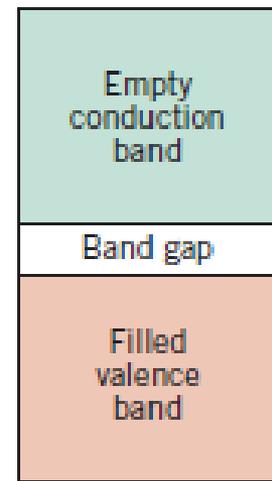
(a)



(b)



(c)



(d)

champ magnétique extérieur

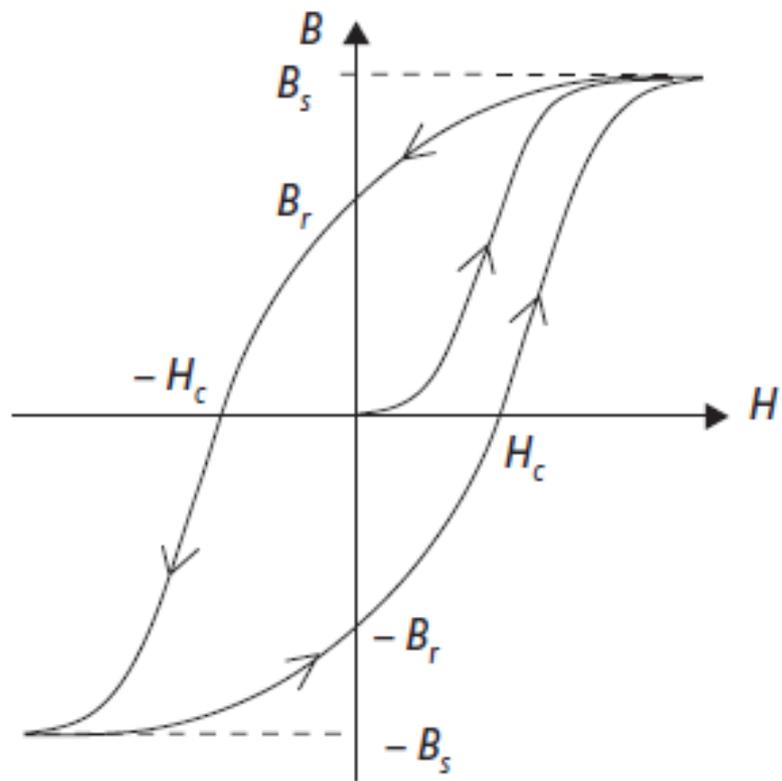
induction magnétique

***perméabilité* magnétique**

perméabilité magnétique du vide

perméabilité magnétique relative

susceptibilité magnétique



Atome ou molécule → Structure électronique → moment magnétique

Interaction à longue distance



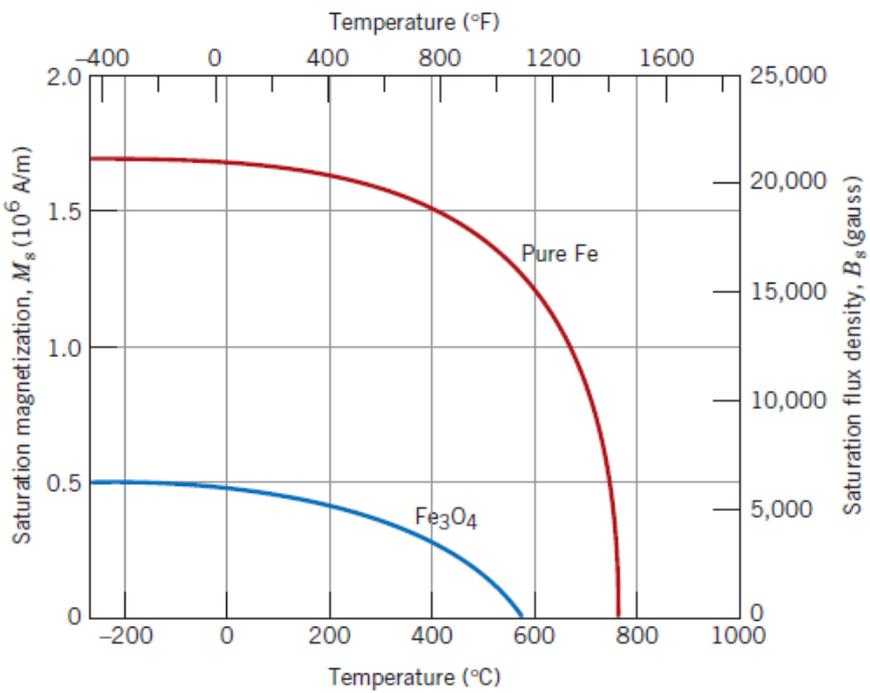
Réseau 1d,
2d ou 3d



Structure magnétique
1d, 2d ou 3d

Aimantation à saturation/ Température de Curie Tc

L'aimantation à saturation est maximale à 0 K, température à laquelle les vibrations thermiques sont minimales. Avec l'augmentation de la température, l'aimantation de saturation diminue progressivement puis retombe brusquement à zéro à ce qu'on appelle la température de Curie.



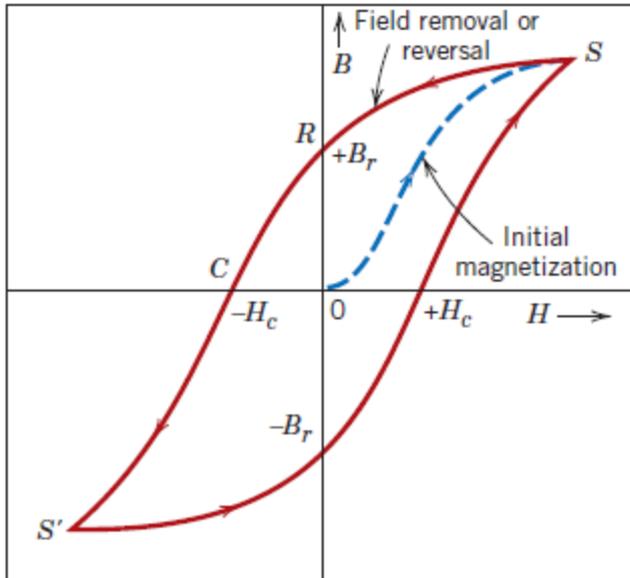


Figure 20.14 Magnetic flux density versus the magnetic field strength for a ferromagnetic material that is subjected to forward and reverse saturations (points S and S'). The hysteresis loop is represented by the solid curve; the dashed curve indicates the initial magnetization. The remanence B_r and the coercive force H_c are also shown.

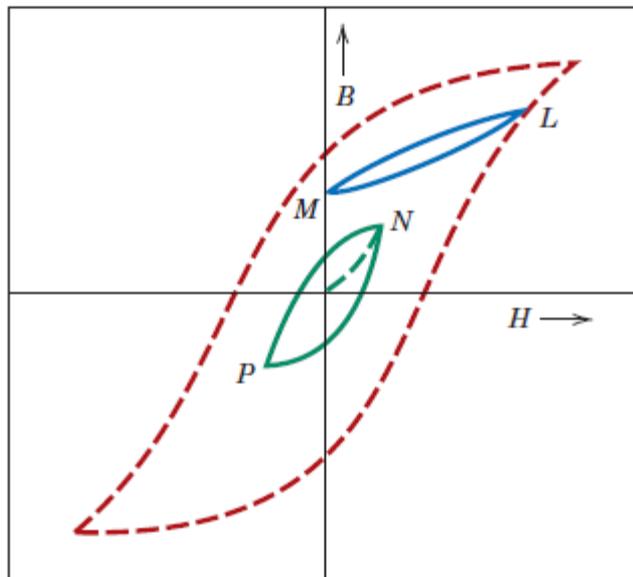


Figure 20.15 A hysteresis curve at less than saturation (curve NP) within the saturation loop for a ferromagnetic material. The B - H behavior for field reversal at other than saturation is indicated by curve LM .

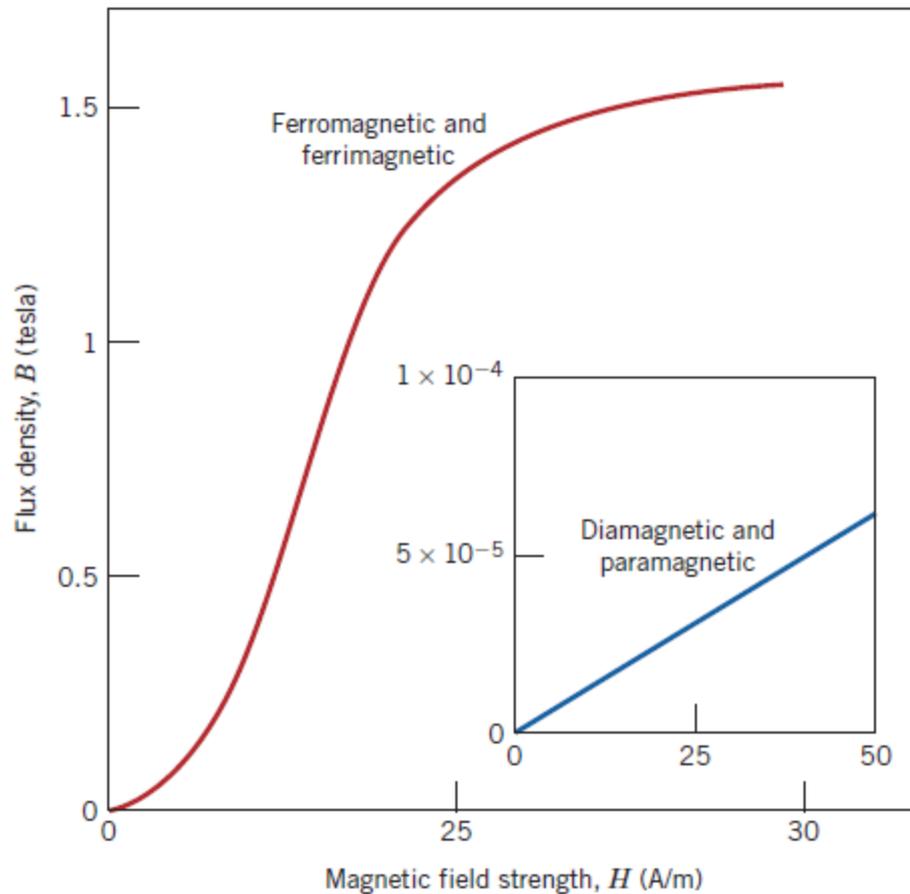


Figure 20.16 Comparison of B -versus- H behaviors for ferromagnetic/ferrimagnetic and diamagnetic/paramagnetic materials (inset plot). Here it may be noted that extremely small B fields are generated in materials that experience only diamagnetic/paramagnetic behavior, which is why they are considered to be nonmagnetics.

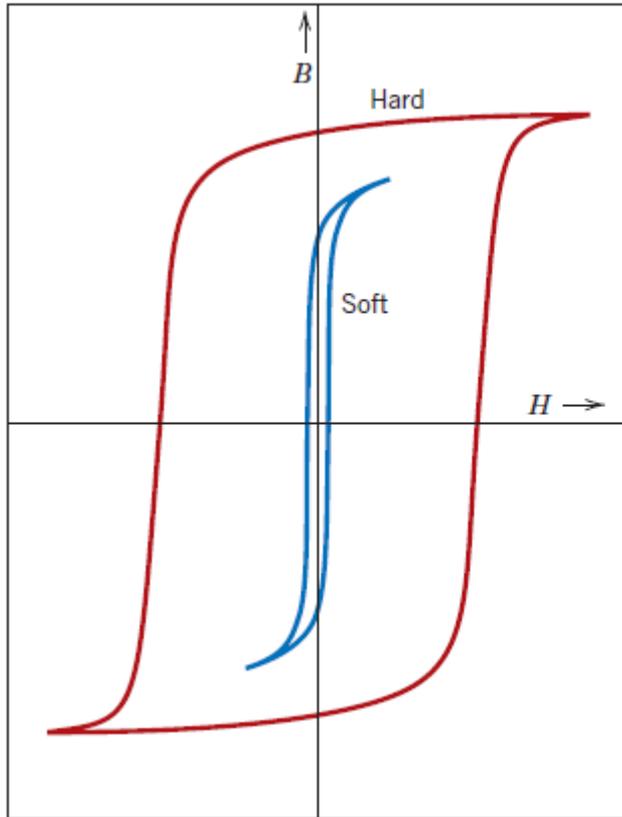
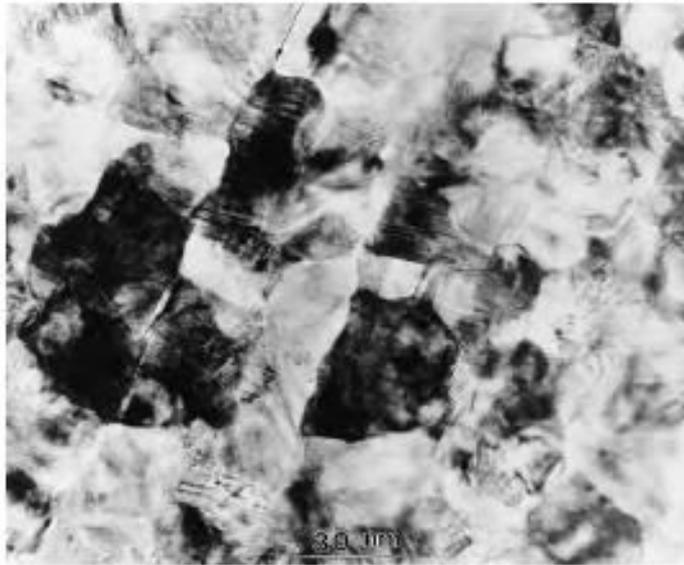
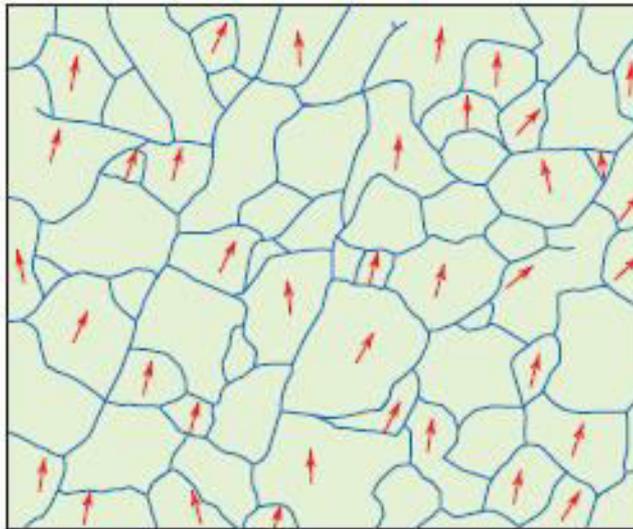


Figure 20.19 Schematic magnetization curves for soft and hard magnetic materials. (From K. M. Ralls, T. H. Courtney, and J. Wulff, *Introduction to Materials Science and Engineering*. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)



(a)



(b)

Figure 20.25 (a) A high-resolution transmission electron micrograph showing the microstructure of a cobalt-chromium-platinum thin film that is used as a high-density magnetic storage medium. The arrow at the top indicates the motion direction of the medium. 500,000 \times . (b) A representation of the grain structure for the electron micrograph in (a); the arrows in some of the grains indicate the texture, or the direction of easy magnetization. (From M. R. Kim, S. Guruswamy, and K. E. Johnson, *J. Appl. Phys.*, Vol. 74, No. 7, p. 4646, 1993. Reprinted with permission.)

