

LE MAGNETISME

Il est omniprésent dans la vie quotidienne :

- Aimants permanents
- Moteurs, machines tournantes
- Fermetures de portes, haut-parleurs
- Cartes de crédits
- Boussoles
- Applications médicales
- Champs électromagnétiques ...

UN PEU D'HISTOIRE

On connaît les aimants naturels (oxydes de fer appelés pierres d'aimant Fe_3O_4) depuis l'Antiquité.

Le mot « magnétisme » vient de l'île de Magnésie en Grèce où ils furent découverts.

Pendant le Moyen-âge on leur prêtait des vertus magiques (ils attirent à distance d'autres objets, qu'ils rendent à leur tour magnétiques).

On leur prêtait aussi des vertus curatives (encore aujourd'hui) ou autres (découvrir les femmes adultères !)

UN PEU D'HISTOIRE

On les associait au diamant (Aimant et Diamant ont la même étymologie : adamantem, pierre dure).

C'est W. Gilbert, physicien anglais, (1544-1603) qui donna la première tentative d'explication du magnétisme.

Après lui, on trouve R. Descartes (1596-1650) avec une théorie des tourbillons, moquée par Molière dans les Femmes savantes (1672)!

UN PEU D'HISTOIRE

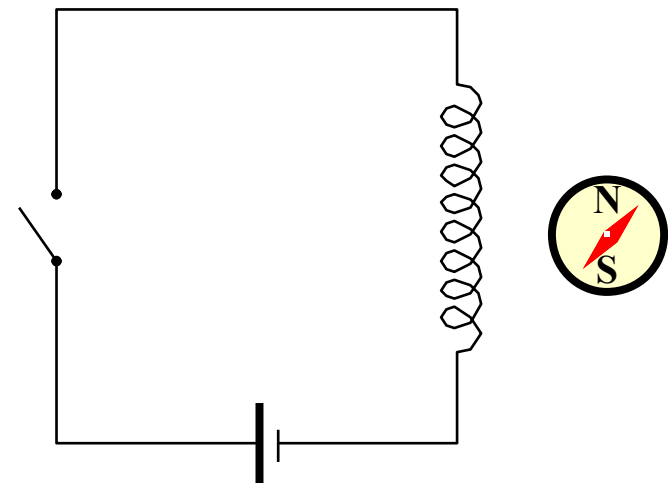
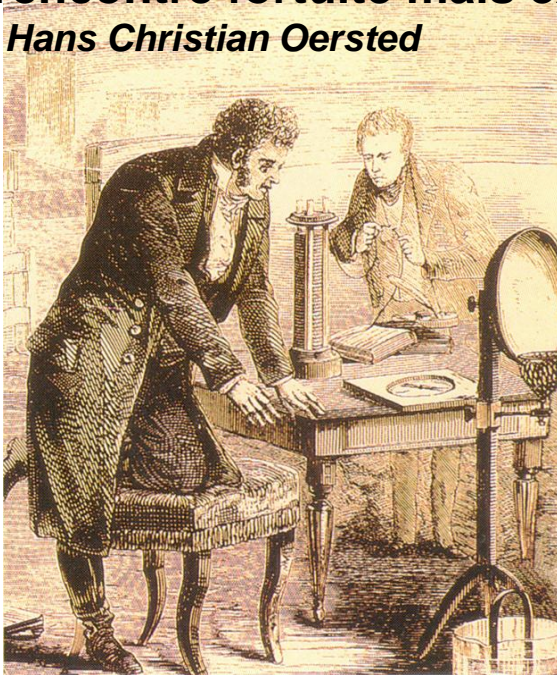
Il a fallu attendre le XIX e siècle avec Faraday, Oersted, Laplace, Ampère, Maxwell et bien d'autres pour comprendre le magnétisme dans le vide...

... et le XX e siècle pour comprendre le magnétisme dans la matière, qui fait appel à la physique quantique, avec Einstein, Curie, Weiss, Néel ...

I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE

Principe fondamental : tout fil conducteur parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique (une boussole placée dans le voisinage du fil dévie. Elle n'indique plus le Nord). Expérience d'Oersted

Une rencontre fortuite mais extraordinaire
1819 - Hans Christian Oersted



I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE

Cette expérience est importante car elle montre qu'il y a une **stricte équivalence** entre le champ magnétique produit par un aimant et le champ produit par un courant électrique.

On peut donc produire artificiellement des champs magnétiques de valeur arbitraire (ou presque).

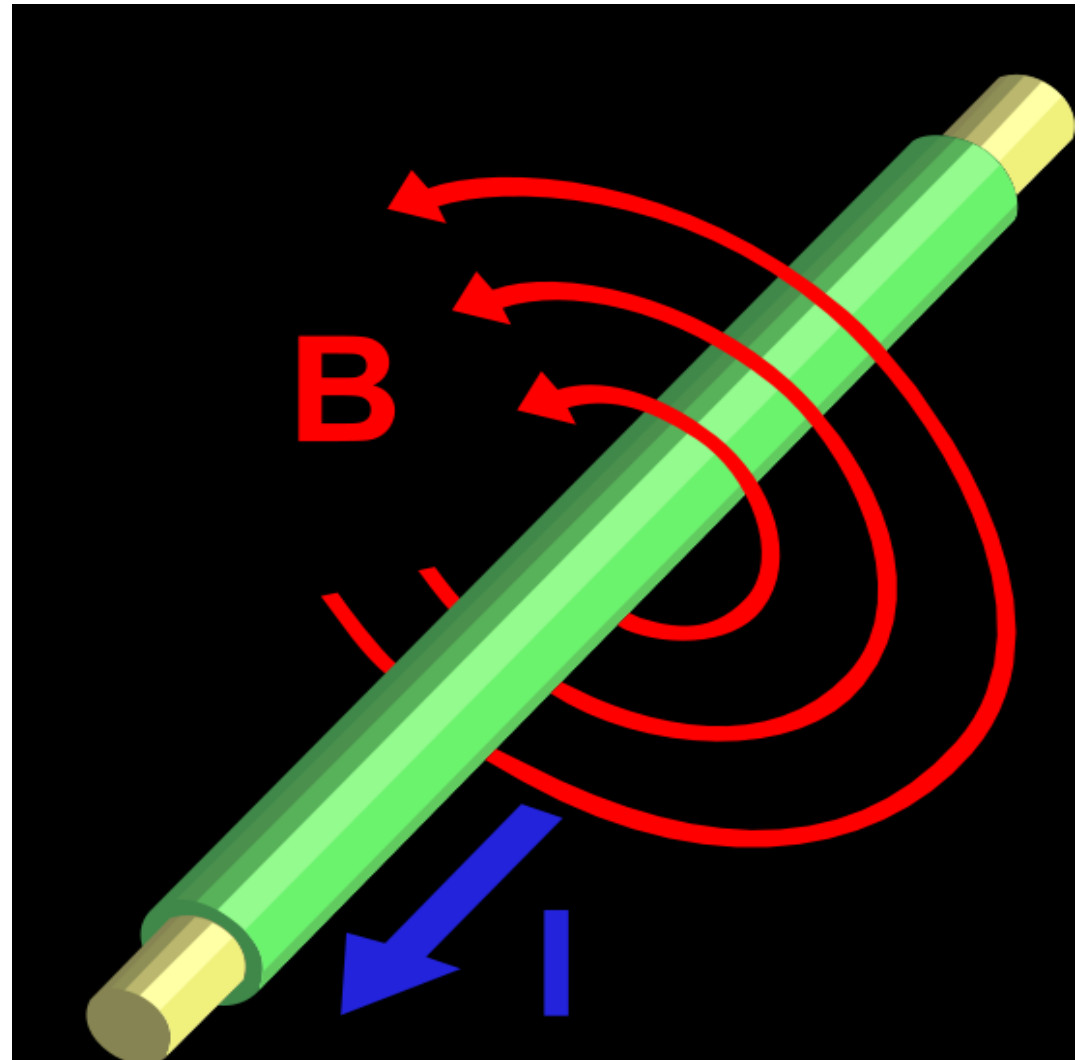
I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE

Pour un fil infini

A une distance r du fil, le champ magnétique B est donné par

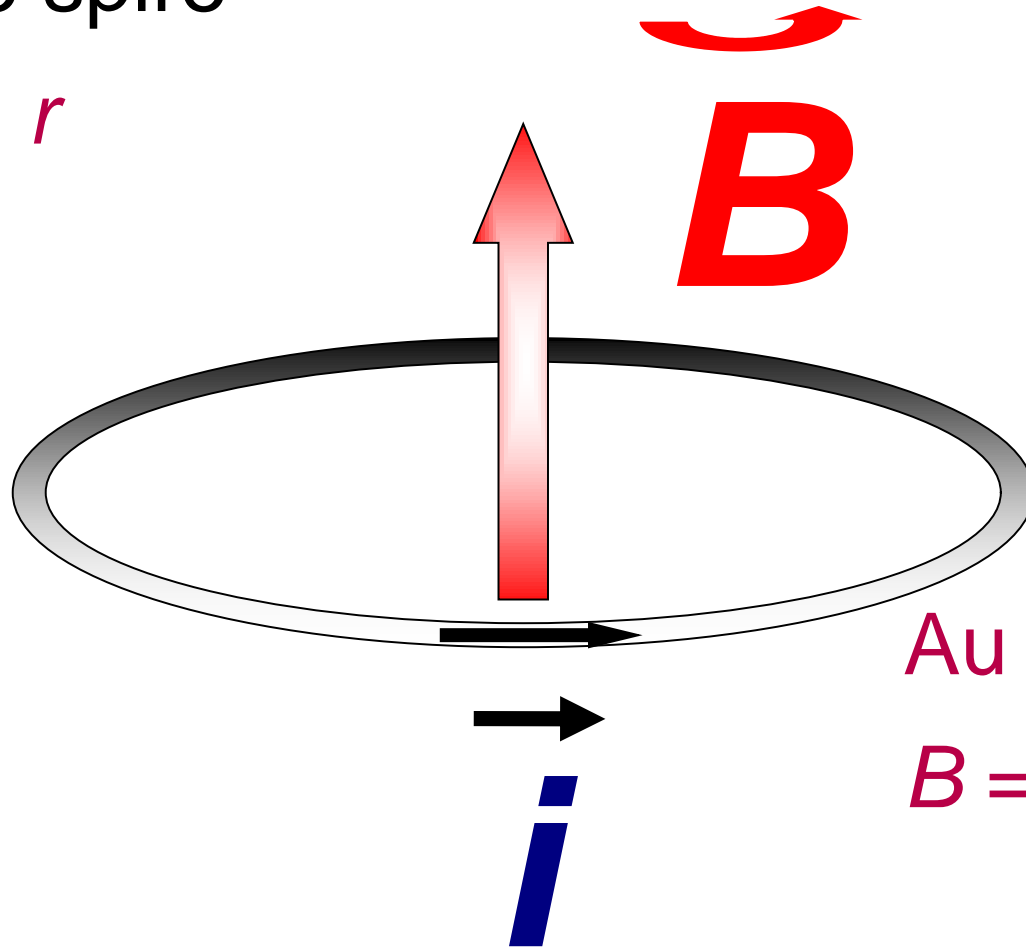
$$B = (\mu_0/2\pi) (I/r)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$



I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE

Pour une spire
de rayon r

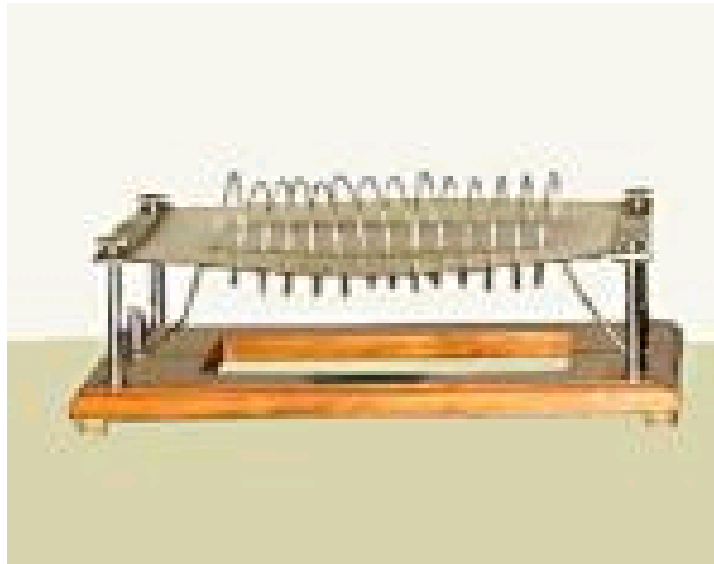


Au centre :

$$B = (\mu_0/2).i/r$$

I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE

Champ magnétique créé par un solénoïde infini sur son axe :



$$B = \mu_0 NI$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ SI}$$

N : nombre de spires par mètre

I : Courant (A)

I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE

Dans le cerveau $\sim 10^{-15}$ T

Fil parcouru par 1 A à 1 mètre $2 \cdot 10^{-7}$ T

Sur la Terre $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ T

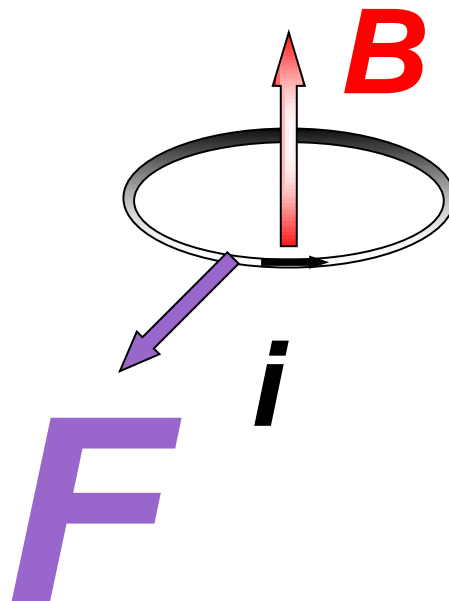
Imagerie médicale ~ 1 T

Séparation magnétique ~ 5 T

I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE

Un phénomène supplémentaire : la force de Laplace.

Tout champ magnétique crée une force sur un conducteur parcouru par un courant.



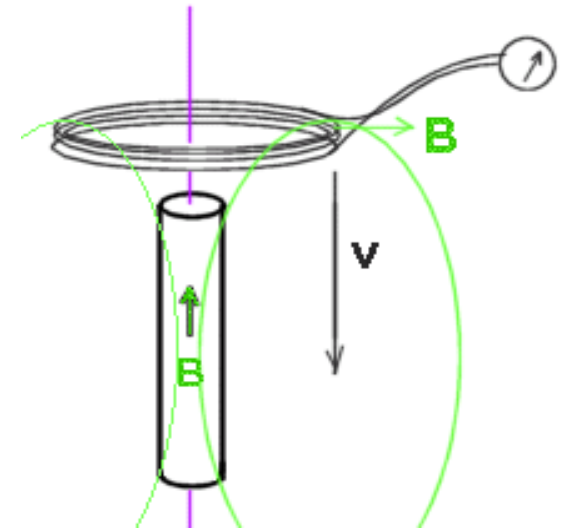
$$dF = i dl \wedge B$$

I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE

Le courant crée un champ. L'inverse est-il vrai ?

Peut-on engendrer un courant à partir d'un champ magnétique ?

Oui, si le champ est variable dans le temps. C'est le phénomène d'induction mis en évidence par Faraday.



I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE

Tous les phénomènes découverts ont été mis à profit pour des applications :

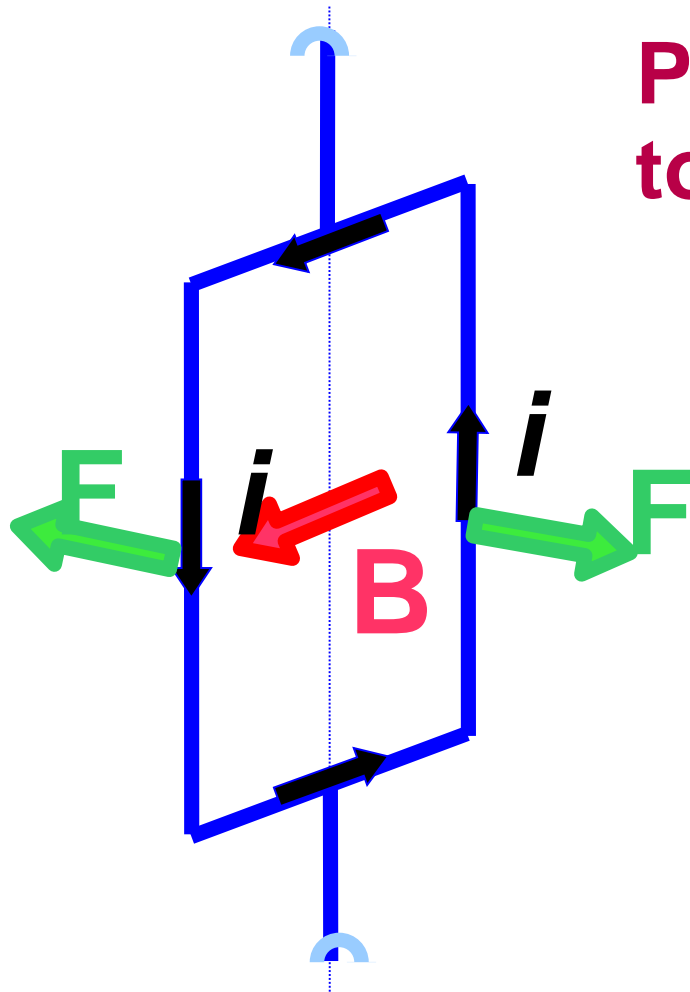
Courant dans les conducteurs : production de champs magnétiques et aimantation de matériaux (aimants permanents, cartes magnétiques)

Courant dans les conducteurs + force : machines tournantes (dynamos, moteurs, alternateurs, générateurs)

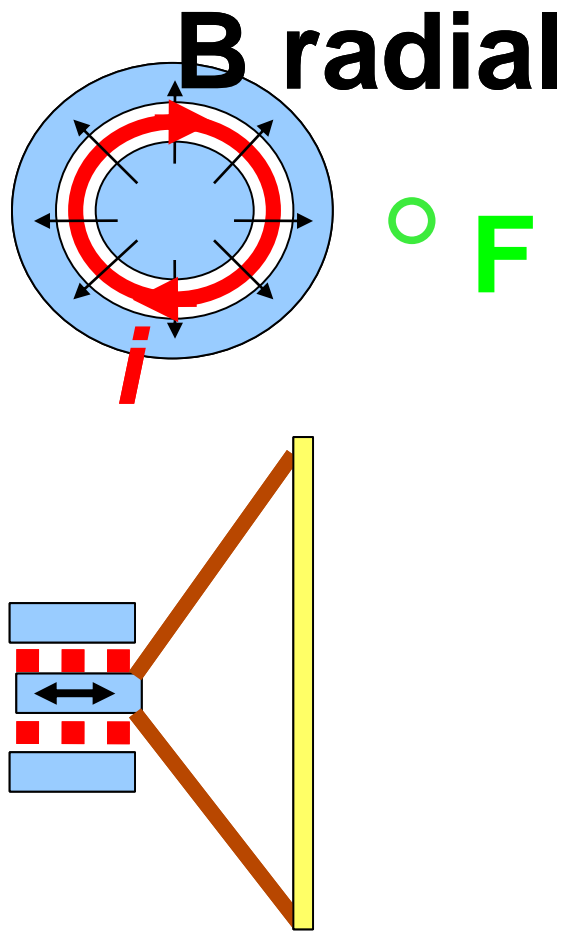
Induction : transformateurs, capteurs de déplacements, disques durs

I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE

Principe des machines tournantes



I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE



Un objet très courant

Magnétisme dans le vide
(bobine mobile)

Magnétisme dans la matière
(aimant)

I-LE MAGNETISME DANS LE VIDE

Une application particulière : la construction d'aimants pour les champs intenses (LNCMI-Grenoble)

Forte puissance nécessaire : 24 MW pour 35 T

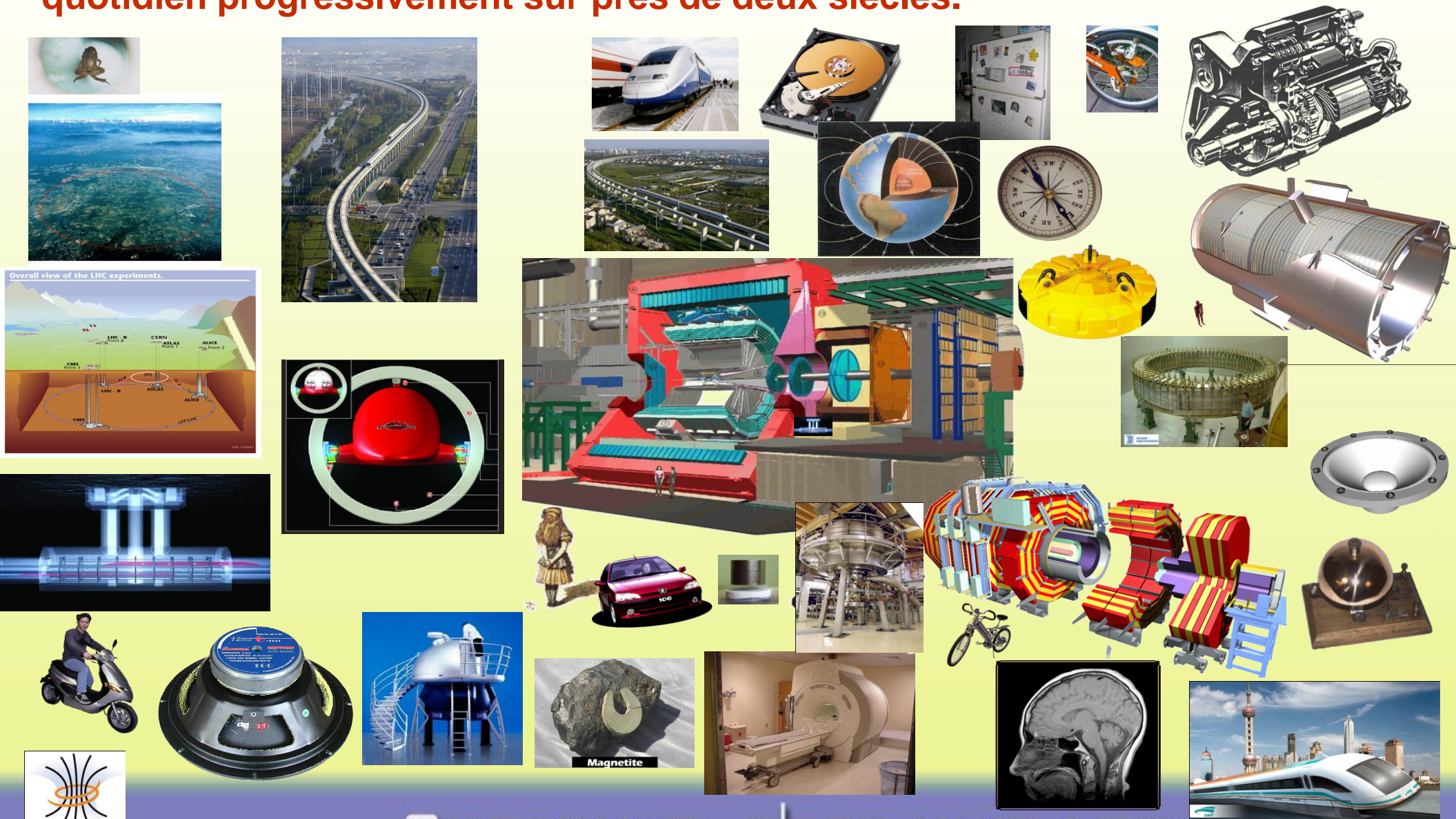
Forte intensité dans les conducteurs (30 000 A)

Fortes contraintes mécaniques : plusieurs centaines de tonnes par cm

Refroidissement à eau : utilisation des rivières (Drac et Isère)

À quoi tout cela sert-il ?

Les découvertes initiales en électromagnétisme sont entrées dans notre quotidien progressivement sur près de deux siècles.



CHERCHER, C'EST VOIR LOIN !

II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

Les modèles classiques (W. Gilbert, R. Descartes, A-M. Ampère) font appel soit à des effets mécaniques, soit à des courants microscopiques. Ils ne fonctionnent pas.

C'est la structure microscopique des atomes qui est responsable des propriétés magnétiques de la matière.

II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

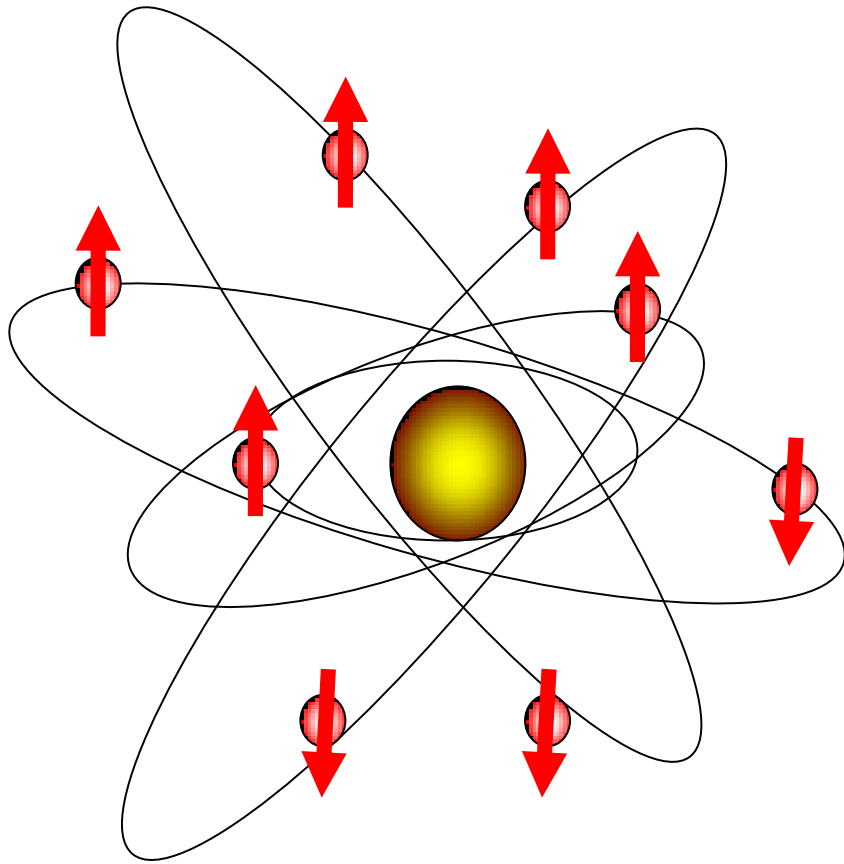
Il faut faire appel à la mécanique quantique.

Les trajectoires ne sont plus déterministes, mais probabilistes.

Les particules sont à la fois des ondes et des corpuscules.

Leur énergie est quantifiée.

II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE



L'atome est constitué d'un noyau (protons + neutrons) chargé positivement. Autour de lui, gravitent des électrons chargés négativement.

Les électrons sont donc attirés par le noyau et restent confinés dans son voisinage.

II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

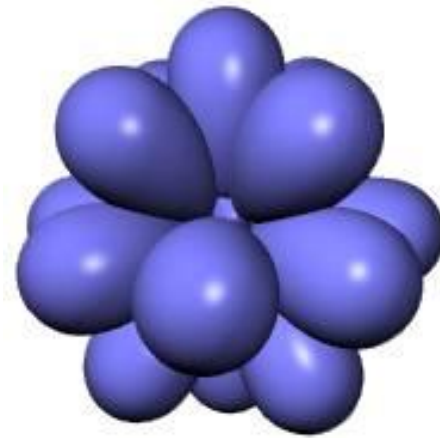
Mais il ne s'agit pas d'un système planétaire. Les électrons ne gravitent pas sur des orbites bien définies (comme les planètes), mais sur des surfaces complexes appelées orbitales. Celles-ci ne peuvent contenir qu'un nombre maximum déterminé d'électrons.

On distingue les orbitales **s** (*sharp*), avec **2** électrons au maximum, les orbitales **p** (*principal*) avec **6** électrons au maximum, les orbitales **d** (*diffuse*) avec **10** électrons au maximum, **f** (*fundamental*) avec **14** électrons au maximum, etc.

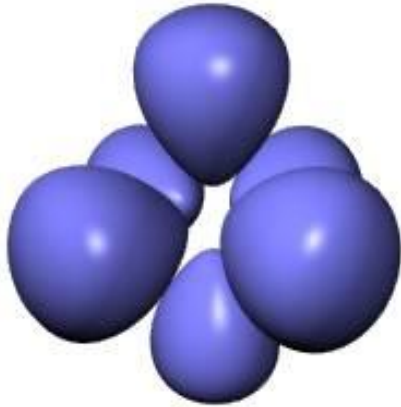
II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE



Orbitale *s*



Orbitale *d*



Orbitale *p*

II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

D'où vient le magnétisme des atomes ?

De leurs électrons :

- Un électron sur une orbite est équivalent à un courant → champ magnétique (moment orbital l quantifié)
- Les électrons tournent sur eux-mêmes (toupies ou spin) → moment de spin $s = \pm \frac{1}{2}$

Pour l'atome, il faut ajouter tous les l et tous les s
: $\underline{J} = \underline{L} + \underline{S}$ (addition vectorielle)

II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

Comportement sous champ magnétique

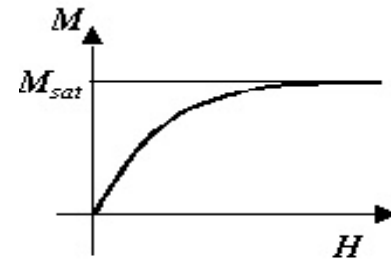
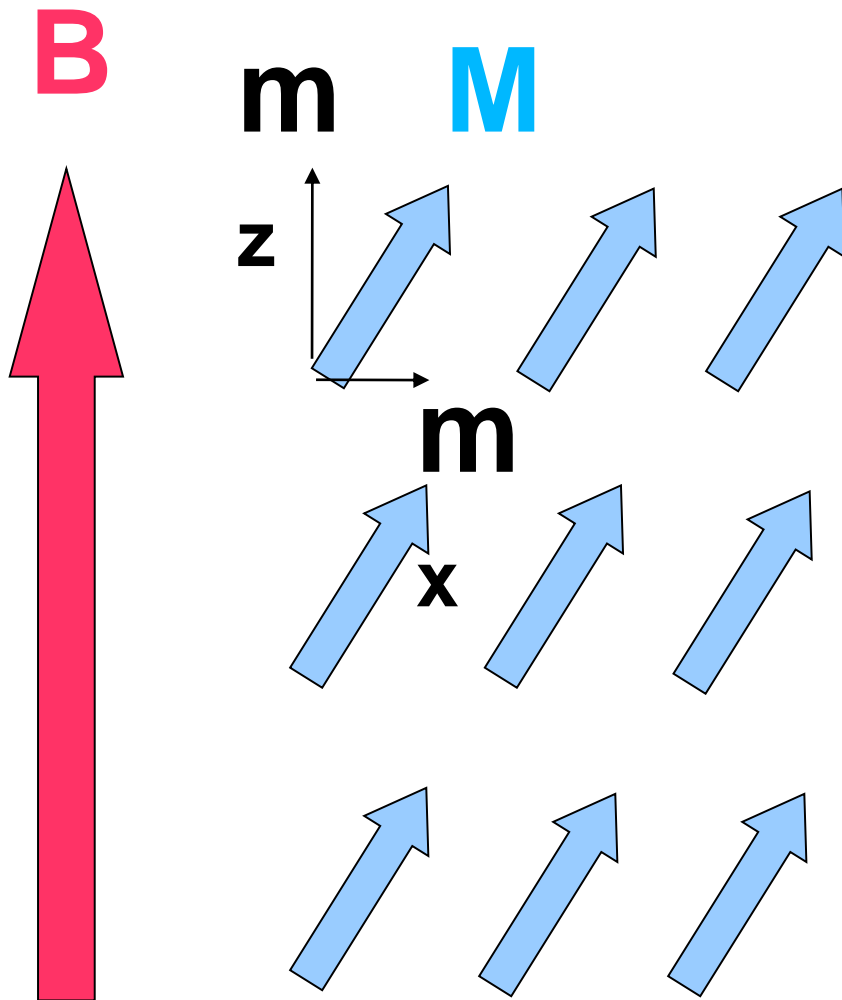
Un ensemble d'atomes magnétiques indépendants (corps paramagnétique) peut être considéré comme un ensemble de boussoles qui s'alignent sur le champ magnétique appliqué **B** .

La température **T** , communique à chaque atome une énergie de désordre, qui s'oppose à l'alignement sur le champ.

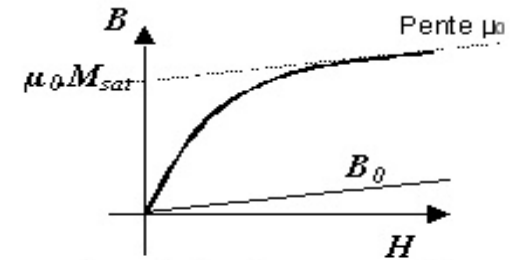
La variable pertinente du processus d'aimantation est le rapport **B/T**

II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

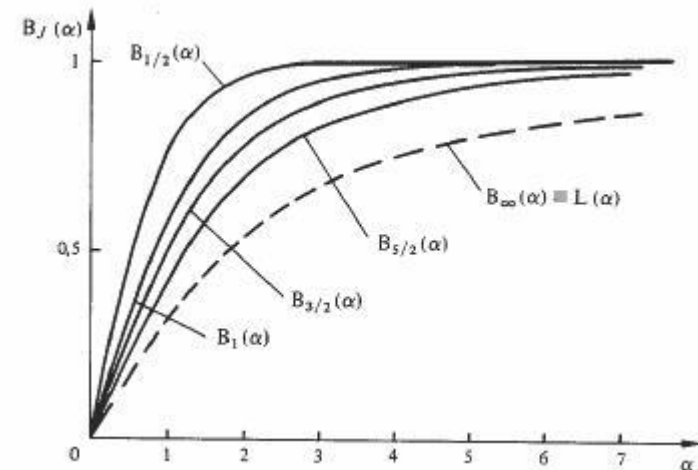
La loi d'aimantation



Courbe de l'aimantation



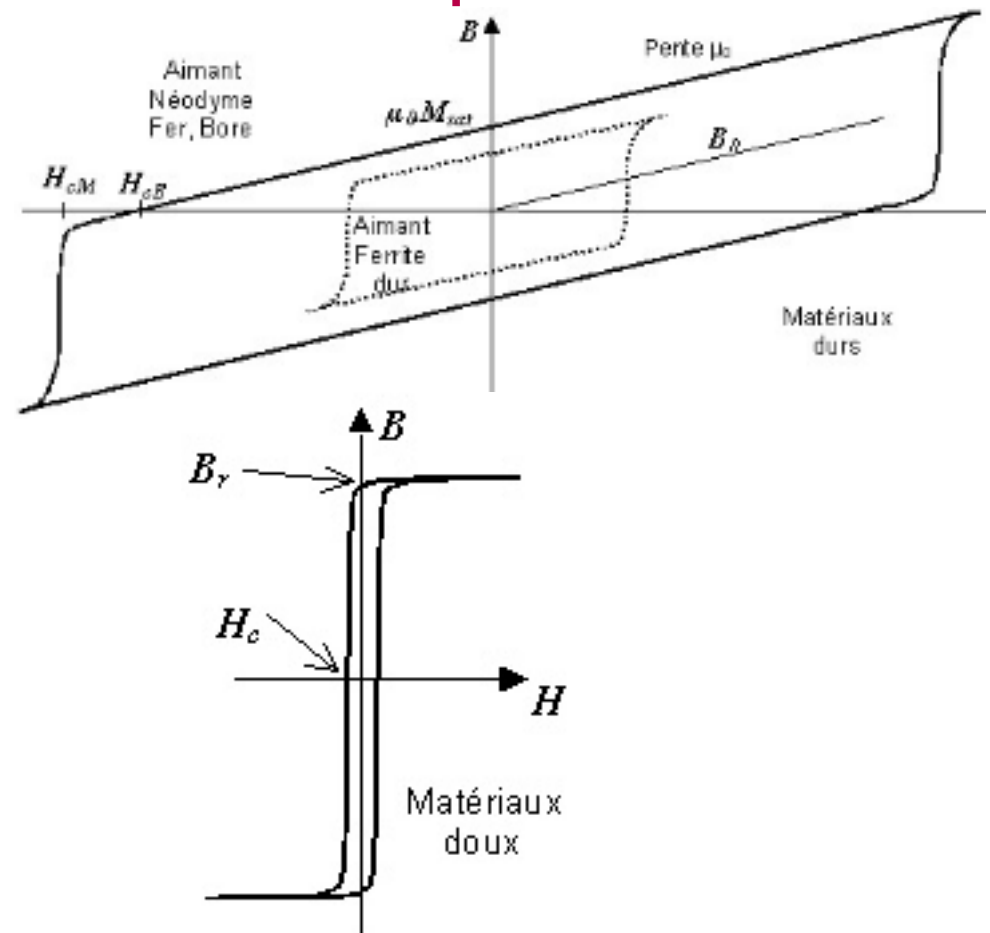
Courbe du champ magnétique dans le matériau



II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

Malheureusement ce qui précède ne permet pas d'expliquer l'existence d'aimants permanents.

Tout se passe comme si un champ interne B_i s'ajoutait au champ appliqué.



II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

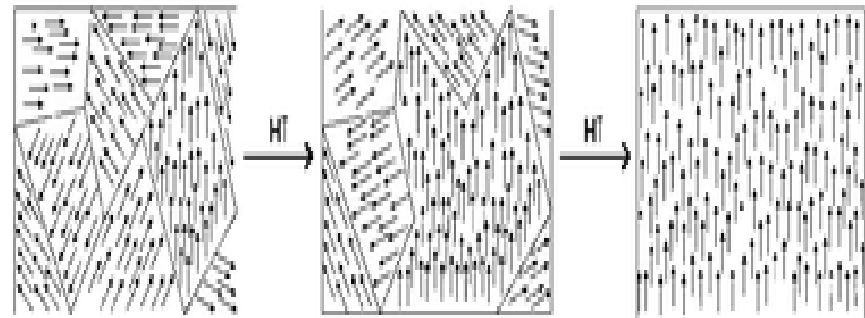
Ce champ moléculaire trouve son origine dans les interactions entre atomes magnétiques, qui ne sont donc plus indépendants. Il s'agit d'un phénomène collectif, appelé ferromagnétisme.

En champ nul, le matériau s'aimante sous son propre champ interne, (aimantation spontanée) → aimants permanents.

L'agitation thermique tend à le détruire. Au-dessus d'une température critique appelée température de Curie, il disparaît et le matériau devient paramagnétique.

II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

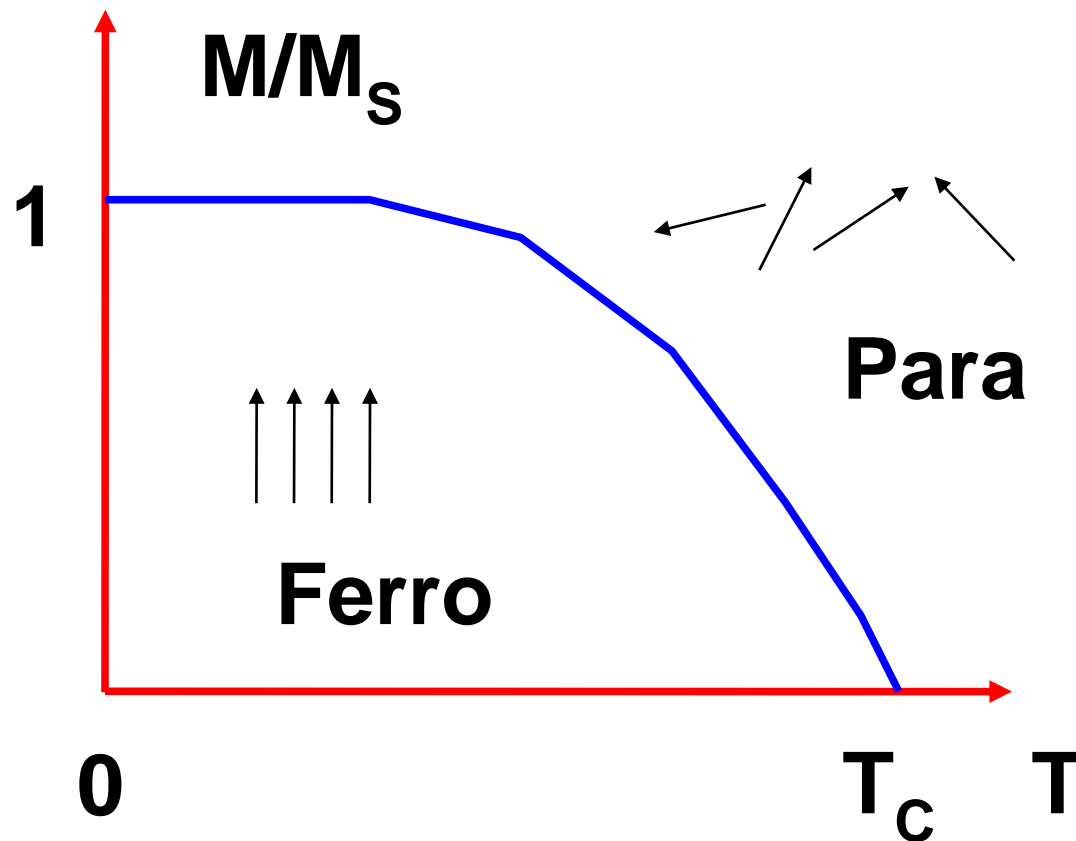
L'hystérésis
s'explique
par l'existence de
domaines séparés
par des parois.



Ces parois s'accrochent aux défauts du matériau (lacunes, dislocations, impuretés)

II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

Diagramme de phase



Pour désaimanter un aimant il suffit de le chauffer à $T > T_c$
Pour le ré-aimanter il suffit de le refroidir sous champ.

II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

Quelques valeurs de T_c

Matériau	T_c (°C)	Matériau	T_c (°C)
Fe	775	AlNiCo	850
Co	1115	Ferrite	450
Ni	354	SmCo	750-825
Gd	19	NdFeB	310

II-LE MAGNETISME DANS LA MATIERE

Il peut arriver que les interactions entre atomes magnétiques s'opposent au champ appliqué. Le champ moléculaire est alors négatif. Le matériau est dit antiferromagnétique.



Si les moments n'ont pas la même valeur, le matériau est ferrimagnétique.



CONCLUSION

Le magnétisme est un domaine de recherche et d'applications extrêmement actif.

Nouveaux matériaux

Supraconductivité

Matériaux pour hyperfréquences (ferrites)

Matériaux à très haute perméabilité

Nanomatériaux, couches, fils, points, mémoires

Applications médicales ...