

# 1: Notions fondamentales de magnétisme



## 1.1 Qu'est-ce qu'un champ magnétique ?

«Un champ» est un concept (une idée abstraite) introduit par M. Faraday qui permet d'analyser les forces. C'est la propriété de l'espace dans lequel la force agit. Un champ joue un rôle intermédiaire dans les interactions entre objets.

Cette notion de champ vous a déjà été présentée quand on vous a parlé de la gravité:

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2 \vec{r}}{r^3}$$

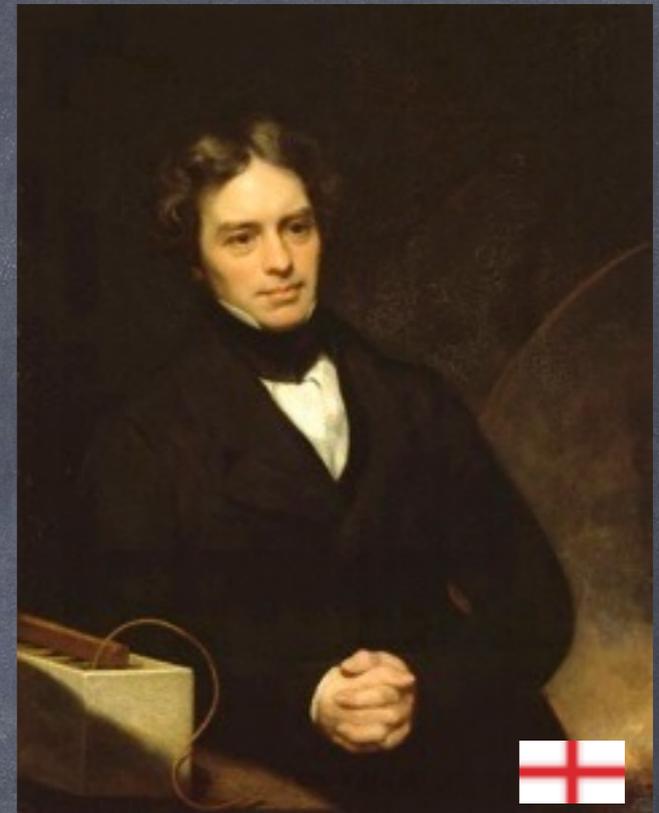
Force  $\uparrow$       Cte  $\uparrow$       ← distance entre les 2 masses ( $m_1, m_2$ )

que l'on peut écrire

$$\vec{F} = m_2 \vec{C}$$

$$\vec{C} = -G \frac{m_1}{r^3} \vec{r}$$

La force sur  $m_2$  est égale à la masse  $m_2$  que multiplie le champ  $C$  produit par  $m_1$



(1791-1867)

## 1.1 Qu'est-ce qu'un champ magnétique ?

Vous connaissez aussi déjà la notion de champ électrique:

$$\vec{F} = \text{Constante} \times \frac{q_1 q_2 \vec{r}}{r^3} = \frac{q_1 q_2 \vec{r}}{4\pi \epsilon_0 r^3}$$

$q_1$  et  $q_2$  2 charges  
à une distance  $r$ .

Force  $\vec{F}$   
 $\vec{F} = q_2 \vec{E}$  ← champ électrique ( $\vec{E} = \frac{q_1 \vec{r}}{4\pi \epsilon_0 r^3}$ )

Par analogie, le champ magnétique d'une charge magnétique (forcement fictive car n'existe pas):

$$\vec{F} = K \frac{p_1 p_2 \vec{r}}{r^3} = p_2 \vec{B} \left( \text{avec } \vec{B} = \frac{\mu_0 p_1 \vec{r}}{4\pi r^3} \right)$$

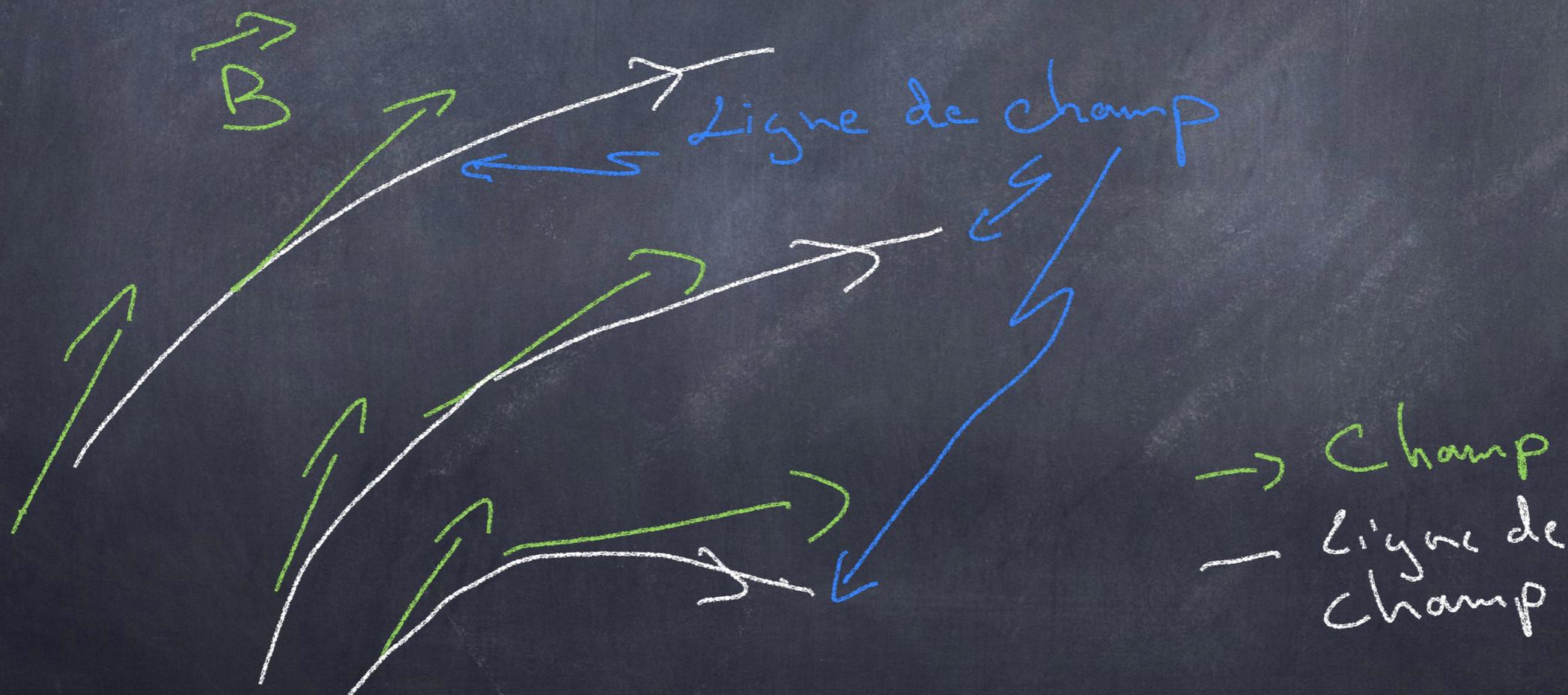
Cte  $\nearrow$   
ici  $K = \frac{\mu_0}{4\pi}$

↑  
Induction magnétique

## 1.1 Qu'est-ce qu'un champ magnétique ?

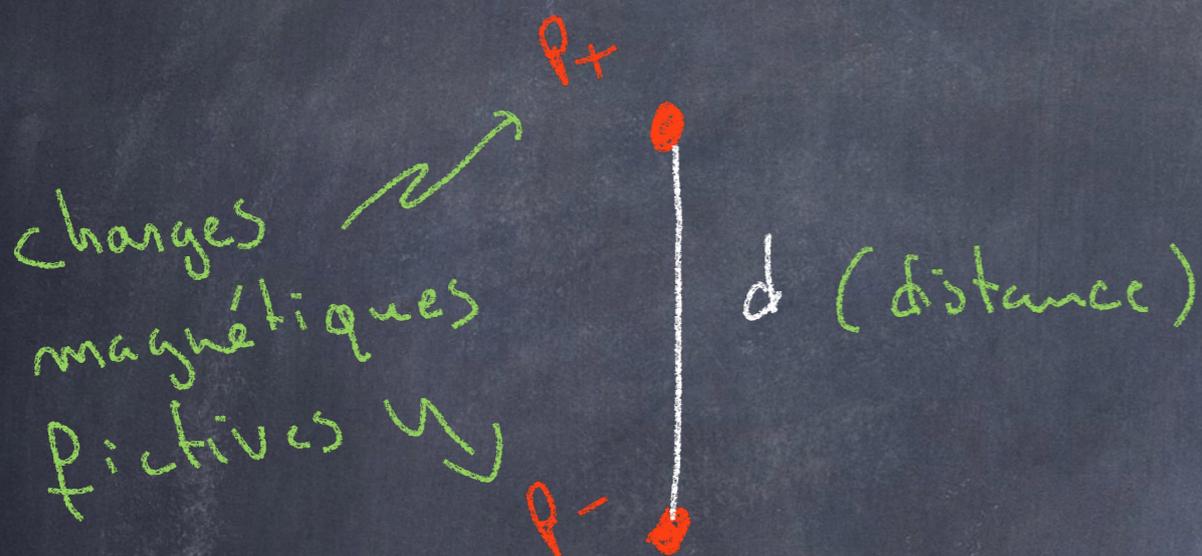
Les lignes de champ : Servent à représenter sa morphologie.

En tous points de l'espace, la direction de la force est tangente à la ligne de champ.  
L'intensité (la force) du champ se mesure par le nombre de lignes de champ par unité de surface.



## 1.1 Qu'est-ce qu'un champ magnétique ?

Champ magnétique : Il est un peu plus compliqué que les autres...



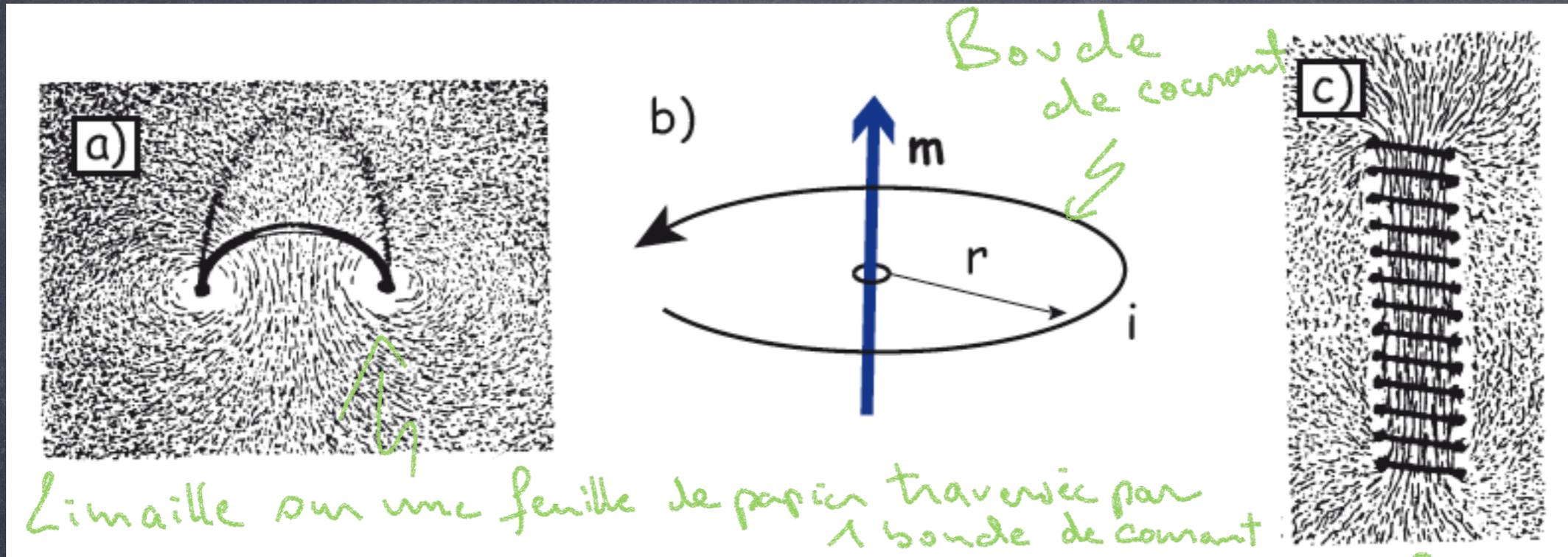
Les charges magnétiques qui n'existent pas ~~!!!~~ doivent toujours être représentées par 2. "Dipôle"

ceci donne des caractéristiques + "compliquées" que celle de champs plus simples (cf  $G$  et  $\vec{E}$  vs précédemment)

Peut-être que tout cela explique que le champ magnétique reste toujours quelque chose de très énigmatique dans l'esprit des gens.....

## 1.2 Qu'est-ce que le moment magnétique ?

C'est l'origine de la force magnétique



Limaille sur une feuille de papier traversée par 1 boucle de courant

$$\vec{m} = N \cdot i \cdot \underbrace{\pi r^2}_{\text{vecteur surface}} \vec{m} \quad (\text{A m}^2)$$

moment magnétique

Nbre de boucle

courant

↑ solénoïde (= plusieurs boucles)

Tous les champs magnétiques sont créés par des courants électriques



# 1: Notions fondamentales de magnétisme

## 1.3 : Relation entre $\vec{B}$ et $\vec{H}$

Il existe 2 champs :

!!! Dans ce cours, on utilisera indifféremment  $B$  ou  $H$

→  $B$  : est le champ fondamental associé à des courants électriques dans tous milieux.  $B$  est appelé Induction magnétique ou densité de flux magnétique.

→  $H$  : → est un champ proportionnel à  $B$  dans un milieu non-aimantable

→ dans un matériel aimantable,  $H$  décrit comment  $B$  est modifié par l'aimantation du matériel.

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{j})$$

Induction magnétique (Tesla)      ↑      Champ magnétique (A/m)      ↑      Aimantation (A/m)

$4\pi \times 10^{-7}$  (Henry/m)      Avec  $1 H = 1 m^2 Kg s^{-2} A^{-2}$

1.3 : Relation entre B et H

Pour info :

$$\text{Champ Terrestre} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$\text{Bobine électrique} \approx 0.1 \text{ T}$$

$$\text{Record sur Terre} = 500 \text{ T}$$

$$\text{Soleil} = 10 \text{ T}$$

$$\text{Record dans l'Univers} = 10^{14} \text{ T}$$

Etoile à neutrons.

## 1.4 Caractéristiques du champ magnétique

Pour caractériser un champ, on utilise l'opérateur différentiel nabla :  $\nabla$

Rappel sur  $\nabla$  :

$\nabla$  est un "vecteur"  $\left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \rightarrow$  Coord. Cartésiennes

$\left( \frac{\partial}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}, \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \right)$

$\hookrightarrow$  Coord. Sphériques.

## 1.4 Caractéristiques du champ magnétique

Lorsque  $\vec{\nabla}$  est couplé avec:  
 un champ scalaire  $\rightarrow \vec{\nabla} \psi = \text{gradient de } \psi = \text{un vecteur}$

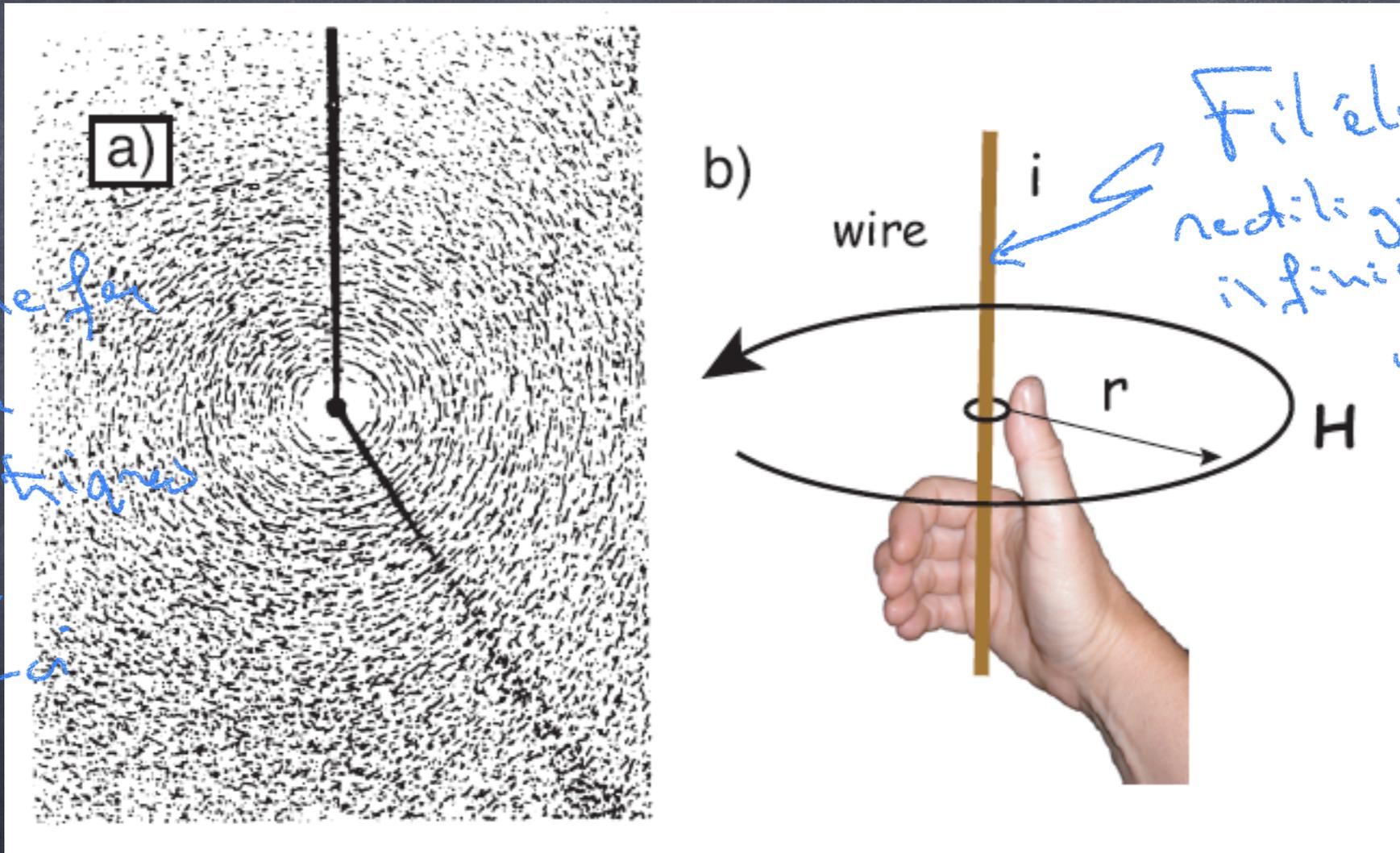
Produit scalaire  $\rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = \text{divergence de } \vec{H} = \text{un scalaire}$

Produit vectoriel  $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \text{rotationnel de } \vec{H} = \text{un vecteur}$

## 1.4 Caractéristiques du champ magnétique

1ère caractéristique:

Tous les champs magnétiques sont créés par des courants électriques



la limaille de fer s'organise en cercles concentriques autour du fil lorsque celui-ci est parcouru par un courant.

Fil électrique rectiligne de longueur il finit parcouru par un courant

observations:  $H \propto \frac{1}{r}$   
 $H \propto i$

$\vec{H} = \frac{i}{2\pi r} \vec{e}_\phi$  Amp.

## 1.4 Caractéristiques du champ magnétique

1ère caractéristique:

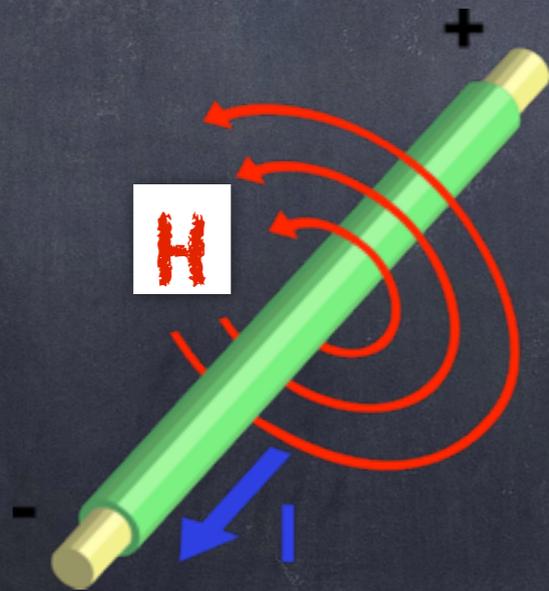
Loi d'Ampère donne une formulation plus générale.

champ mag.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j}_f$$

notationnel

densité de courant

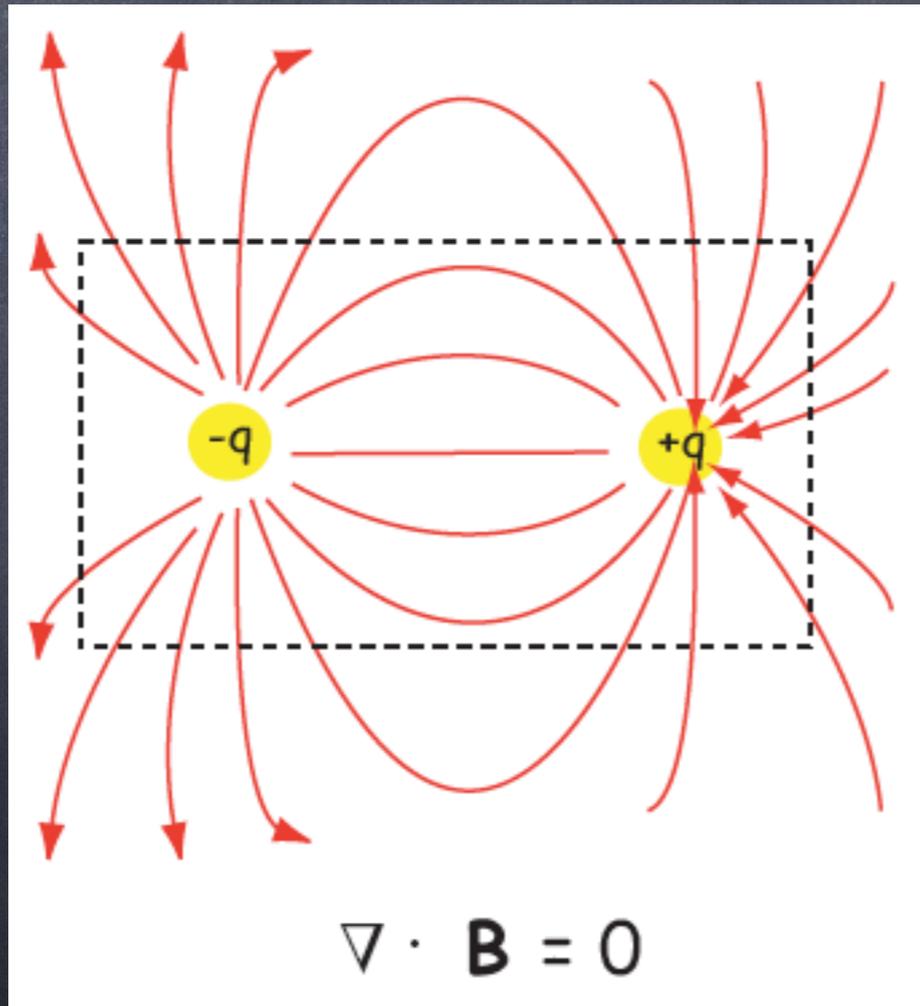


André-Marie Ampère  
(1775-1836)

## 1.4 Caractéristiques du champ magnétique

2ème caractéristique:

Une charge magnétique ne peut pas être isolée, on a toujours un dipôle. Dans un espace considéré, les lignes de champs rentrent et sortent de manière identique. La divergence est nulle.



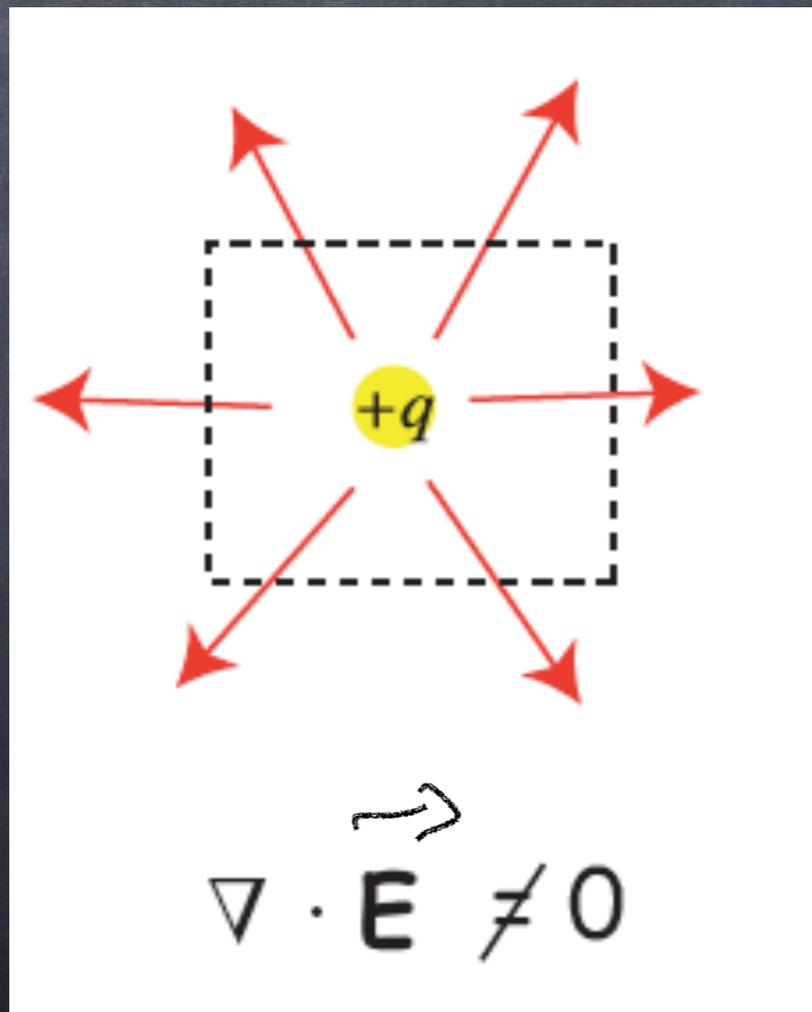
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

Divergence Nulle

## 1.4 Caractéristiques du champ magnétique

2ème caractéristique:

Pour rappel et bien comprendre les choses, Une charge électrique produit un champ électrique qui débute de la source et qui se disperse vers l'extérieur.



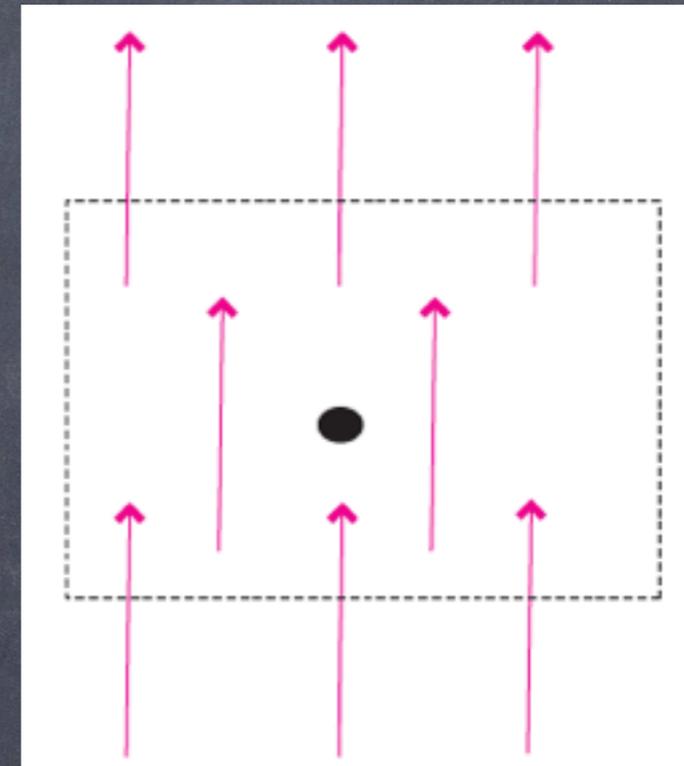
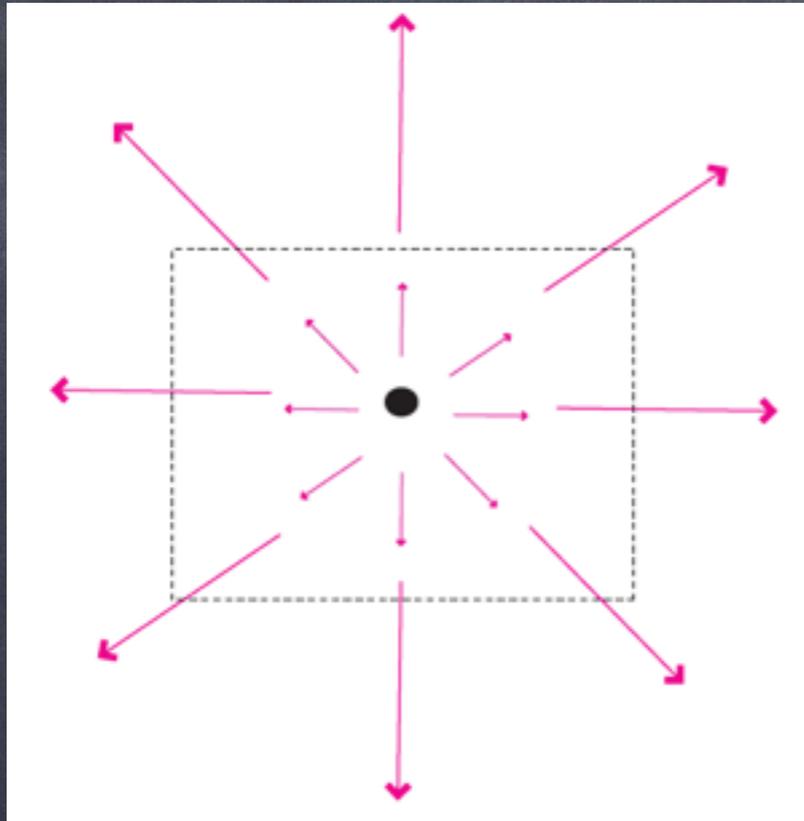
La divergence  $\nabla \cdot$  est non nulle.

produit scalaire  
de  $\nabla$  avec  $\mathbf{E}$

$$\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z}$$

## 1.4 Caractéristiques du champ magnétique

Rappel: Autre exemple de champs caractérisés par des divergences différentes



$$\vec{v}(r) = \vec{r}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \frac{\partial}{\partial r} r = 1$$

$$\vec{v}(r) = K$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \frac{\partial}{\partial r} K = 0$$

## 1.4 Caractéristiques du champ magnétique

Énoncé d'un théorème (que l'on ne vous demande pas de démontrer :-)

Théorème: Si  $\nabla \times \vec{A} = 0$  avec  $A$  un champ vectoriel

Il existe un  $\psi$  champ scalaire

tel que  $\vec{A} = \nabla \psi$

Or, nous avons montré que:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s \neq \emptyset$$

Donc  $\vec{H}$  ne peut pas en théorie dériver d'un potentiel !!!

## 1.5 : Le potentiel magnétique

Dans l'hypothèse où l'on se place loin des sources (boucles de courant) on peut considérer que  $\nabla \times \vec{H} \approx \emptyset$

et donc  $\Rightarrow \vec{H} = -\nabla \psi_{\text{mag}}$  Potentiel magnétique

Les isovaleurs du potentiel tracent des contours montrant les lieux où l'action potentielle d'une source sur son environnement est de même amplitude.

          
= Boucle de courant.

## 1.5 : Le potentiel magnétique

**Rappel:** L'opérateur gradient est un opérateur différentiel aux dérivées partielles qui, à un champ scalaire fait correspondre un champ vectoriel. Le gradient représente **la vitesse de variation** d'un champ dans l'espace (c'est la dérivée d'un champ).



$$\begin{aligned} \text{grad } \psi_{\text{mag}} &= \nabla \psi_{\text{mag}} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_{\text{mag}}}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi_{\text{mag}}}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_{\text{mag}}}{\partial z} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Rappel:

$$\nabla \text{ en coord. spheriques } \hat{=} \left( \frac{\partial}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}, \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \right)$$

## 1.5 : Le potentiel magnétique

En résumé on a :

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

$$\nabla \times \vec{B} = \vec{j}_s \quad \text{près des sources}$$

par hypothèse:  $\nabla \times \vec{B} = 0$     Loïn des sources

et donc  $\vec{B} = -\nabla \psi$

## 1.5 : Le potentiel magnétique

Par analogie avec le champ de gravité ou le champ électrique : (le champ de gravité d'une masse donnée est défini comme la force qu'il exerce sur une masse unitaire) la loi de Coulomb donne :

$$\|\vec{B}\| = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p}{r^2} \rightarrow \text{charge magnétique}$$

Le potentiel magnétique à une distance  $r$  d'un pôle de force  $p$ :

$$\Psi_{\text{mag}} = - \int_r^\infty B dr = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p}{r}$$



(1736-1806)

## 1.5 : Le potentiel magnétique

Pour un dipôle :

$$\Psi_m = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left( \frac{1}{r^{\oplus}} - \frac{1}{r^{\ominus}} \right)$$

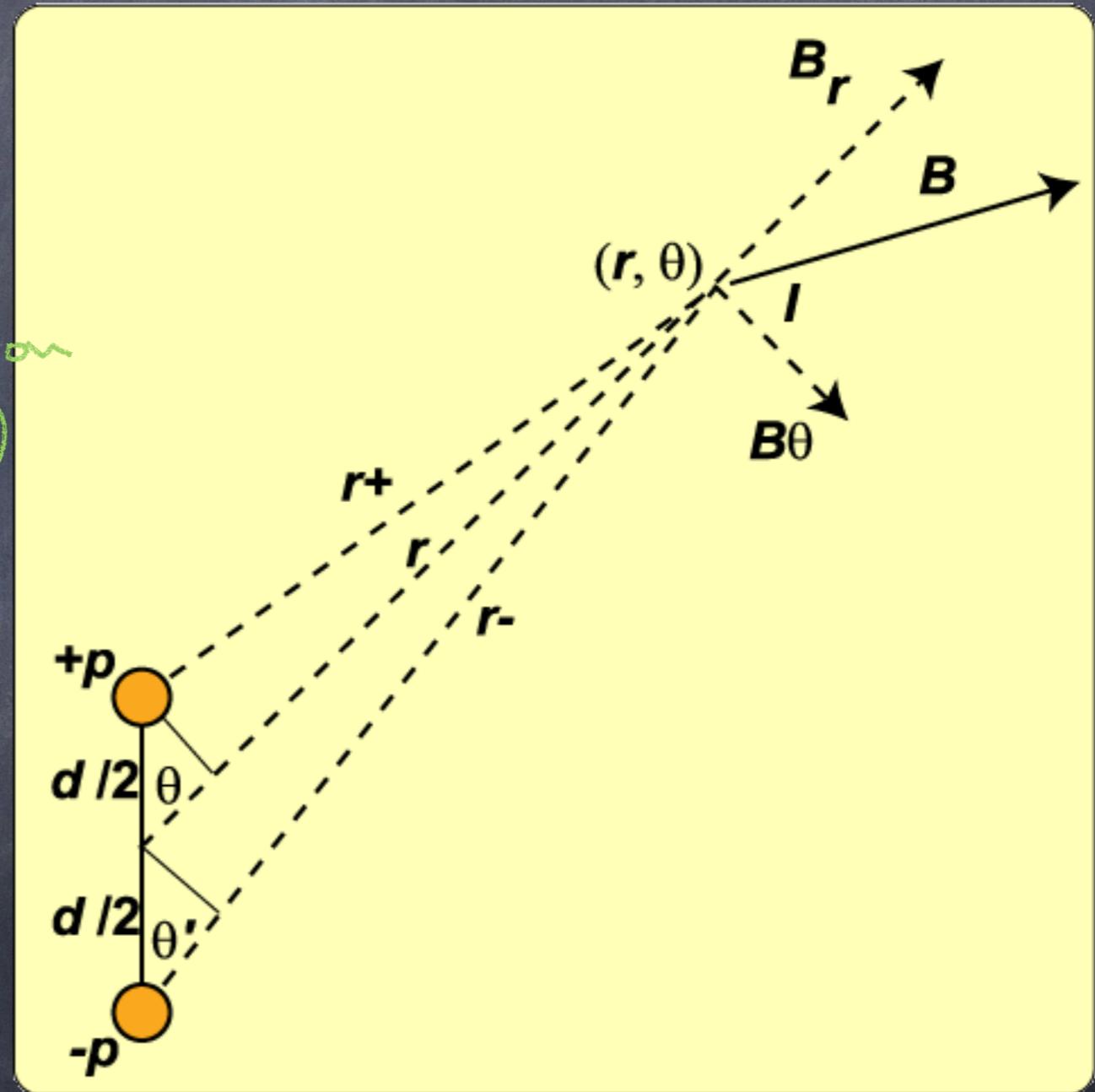
$$= \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left( \frac{r^{\ominus} - r^{\oplus}}{r^{\oplus} r^{\ominus}} \right) = \text{Equation (1)}$$

Pour  $d \ll r$ 

$$\cos \theta \approx \frac{r - r^{\oplus}}{d/2}$$

$$\cos \theta' \approx \frac{r^{\ominus} - r}{d/2}$$

Donc :  $r^{\oplus} = r - \frac{d}{2} \cos \theta$  et  $r^{\ominus} = r + \frac{d}{2} \cos \theta'$



1.6 : Le potentiel magnétique

Par ailleurs; si  $d \ll r$   
 $\cos \theta' \approx \cos \theta$  et  $\left(\frac{d}{r}\right)^2 \approx 0$

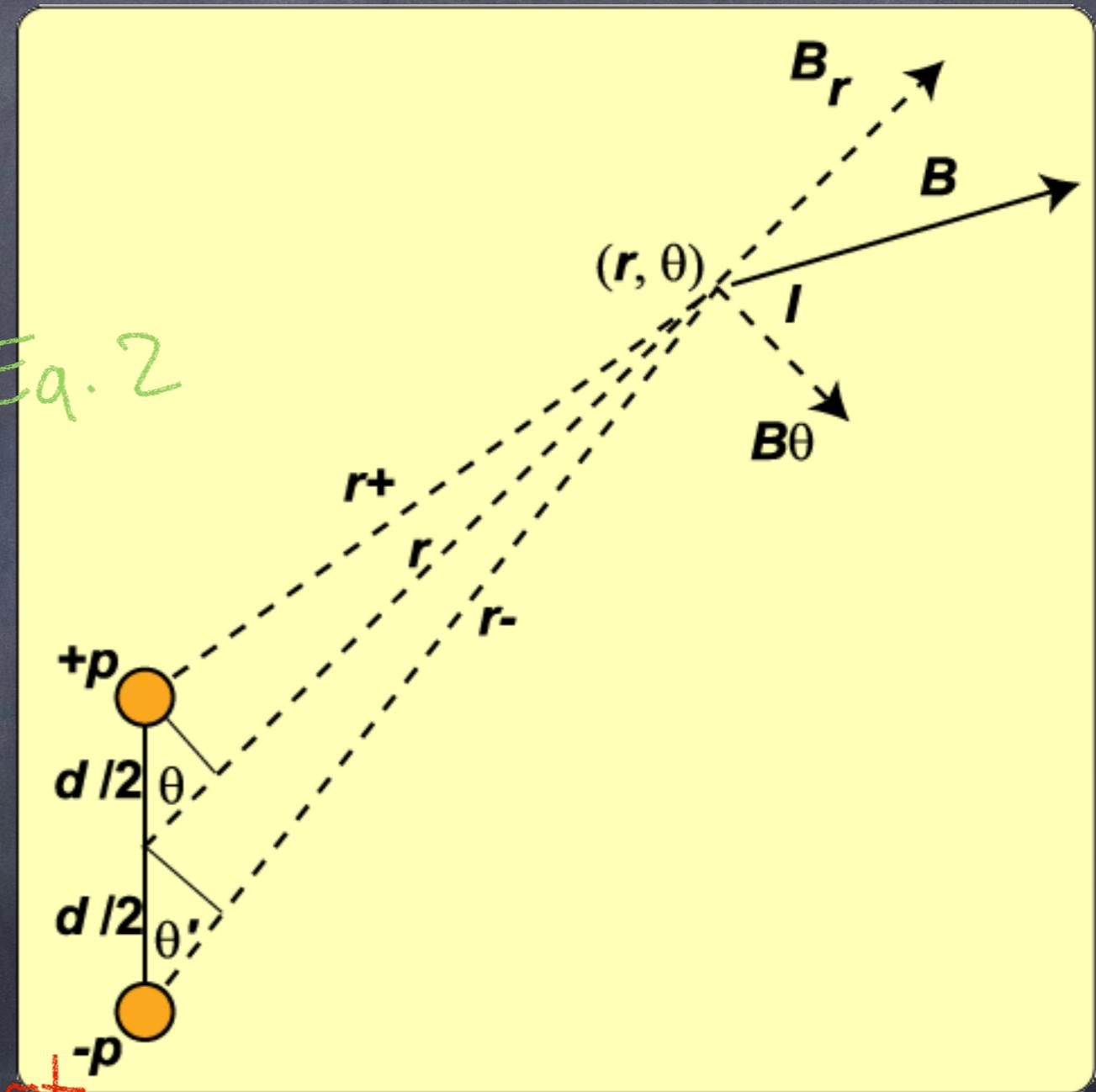
On a donc:  
 $r^{\oplus} - r^{\ominus} \approx \frac{d}{2} (\cos \theta' + \cos \theta) \approx d \cos \theta$   
 $r^{\oplus} \cdot r^{\ominus} \approx r^2 - \frac{d^2}{4} \cos^2 \theta \approx r^2$  Eq. 2

En substituant Eq 2 dans Eq. 1

$$\psi_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dp \cos \theta}{r^2}$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m \cos \theta}{r^2}$$

avec  $m = dp = \text{moment magnétique}$



Important: à connaître.

## 1.6 : Le potentiel magnétique

Application : Calcul des composantes radiales et tangentielle du champ dipôle à la surface de la Terre.

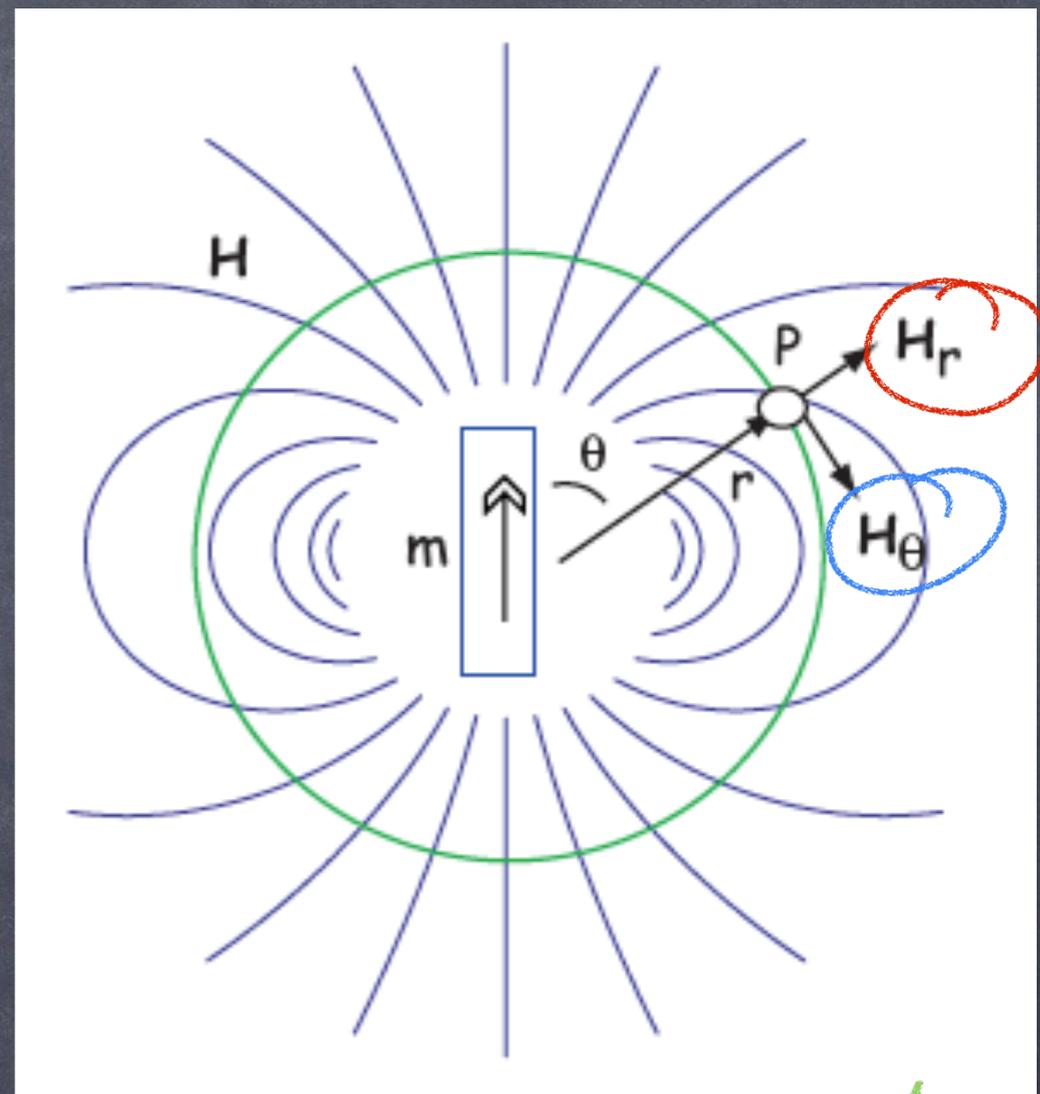
$$\psi_m = \frac{\mu_0 m \cos \theta}{4\pi r^2}$$

on a  $\vec{B} = -\nabla \psi_m$

Donc

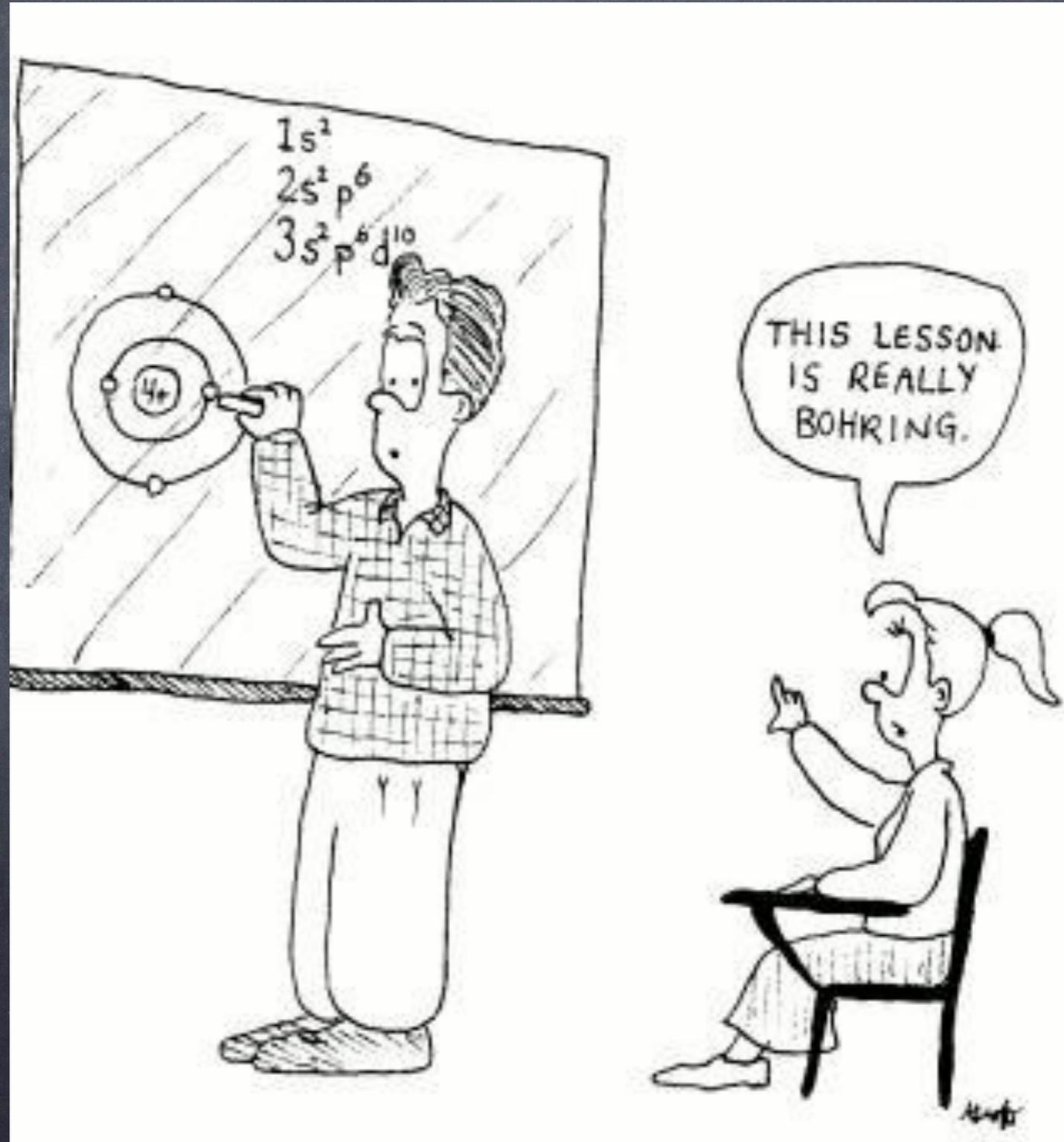
$$\|B_r\| = -\frac{\partial \psi_m}{\partial r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2m \cos \theta}{r^3}$$

$$\|B_\theta\| = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m \sin \theta}{r^3}$$



Rappel : on a  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

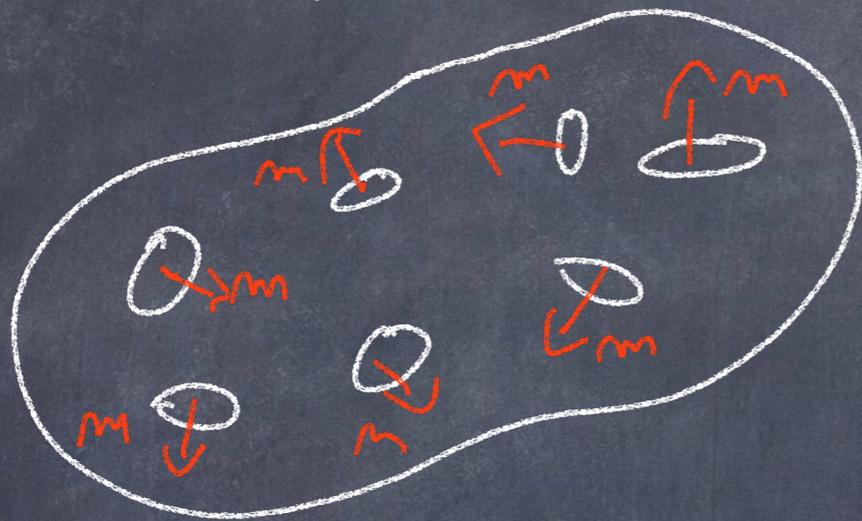
## 2: Le magnétisme de la matière



## 2: Le magnétisme de la matière

### 2.1 : Aimantation

(intensité magnétique)



Corp avec des petites  
Boucles de courant

moment total

$$\vec{M}_{\text{total}} = \sum_i \vec{m}_i \quad (\text{Am}^2)$$

$$\vec{j} = \frac{\vec{M}}{\text{vol}} = \frac{\vec{M}}{\text{masse}}$$

A/m

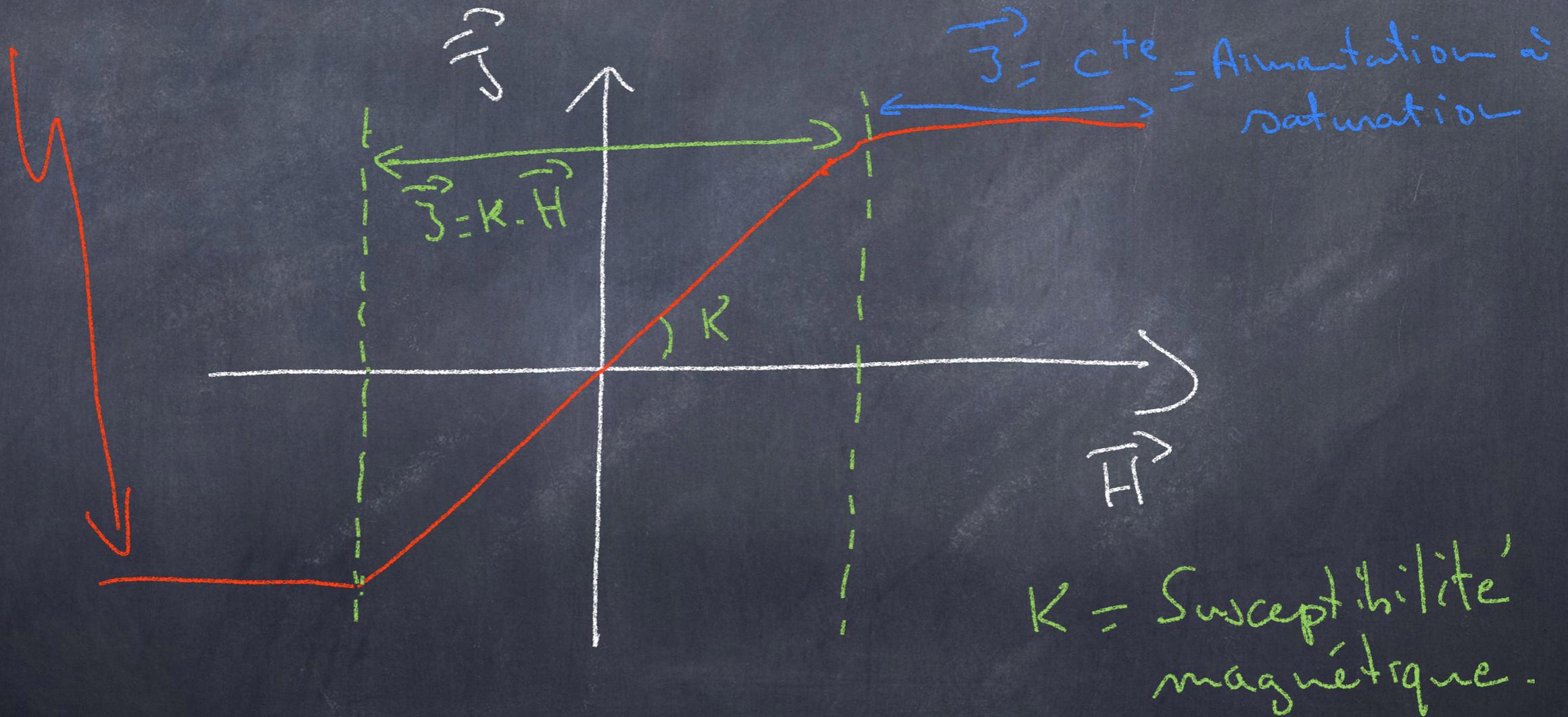
Am<sup>2</sup>/Kg

Aimantation

## 2.1 : Aimantation

Il existe 2 types d'aimantation

Aimantation induite : Réversible et nulle en l'absence de champ.



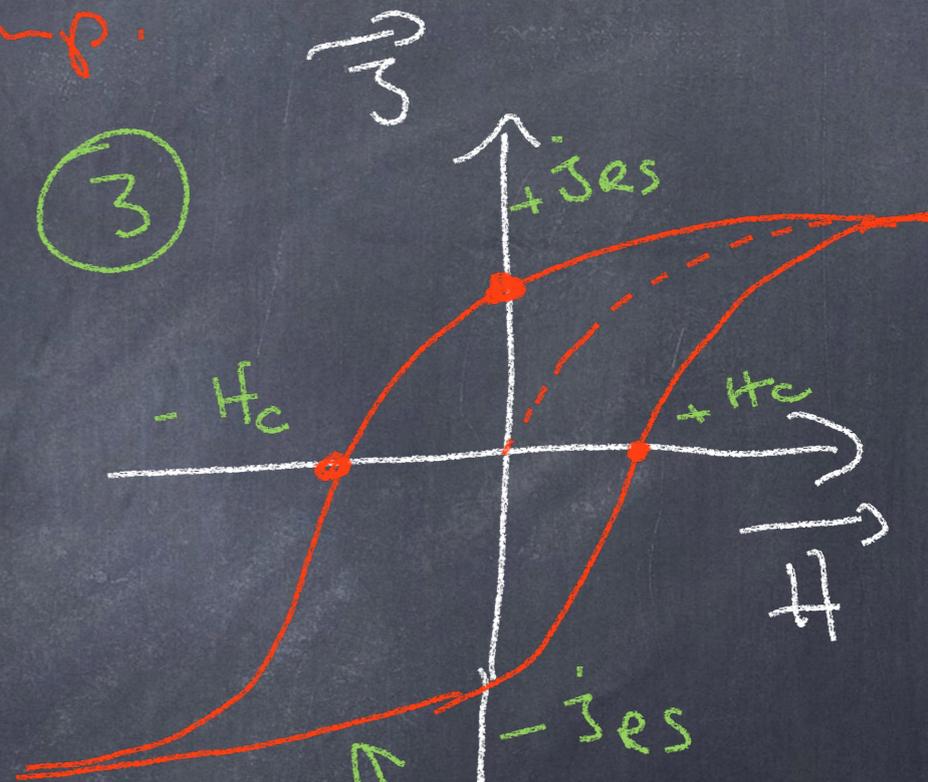
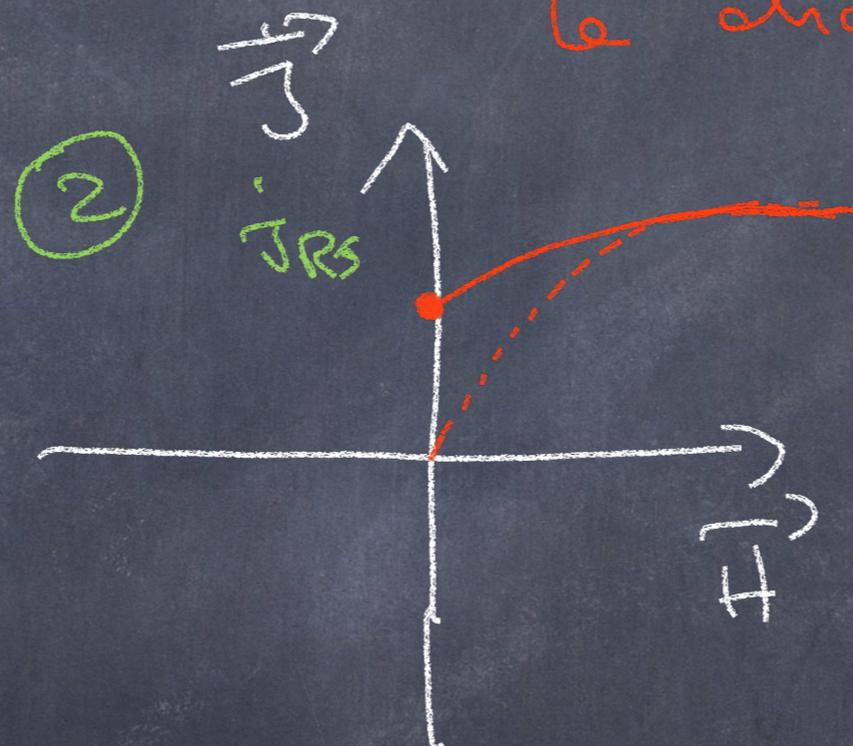
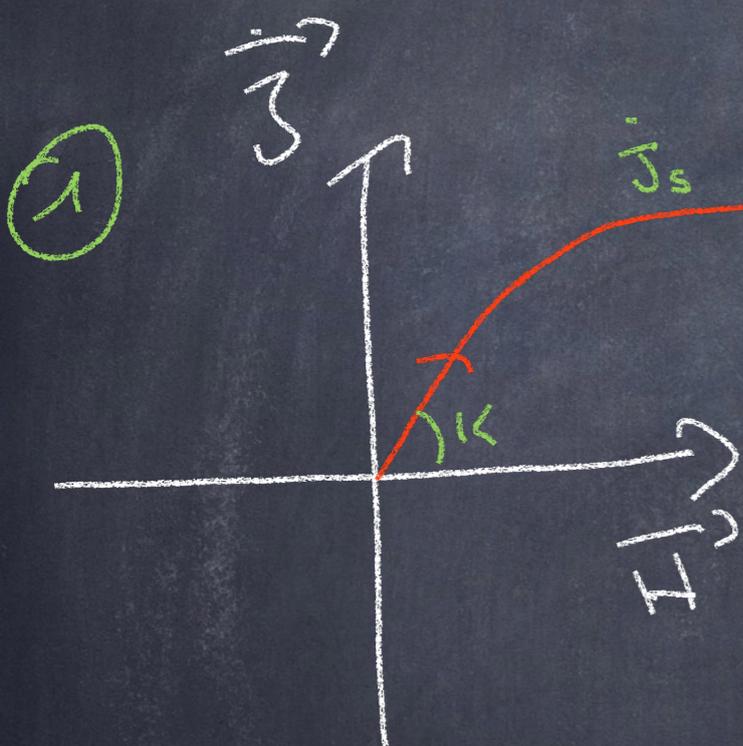
$K = \text{Susceptibilité magnétique}$ .

Elle existe dans toutes les matières !!

2.1 : Aimantation

Il existe 2 types d'aimantation

Aimantation Remanente = conservée lorsque l'on coupe le champ.



- $J_s =$  Aimantation à Saturation
- $J_{RS} =$  " Rémanente de saturation
- $H_c =$  Champ Coercitif

C'est l'enregistrement des champs magnétiques passés qui ont agit sur le matériel !!

## 2: Le magnétisme de la matière

### 2.2 : Comportement magnétique de la matière

Origine : Moment magnétique atomique ( $M_a$ )

Comparaison avec les orbites planétaires

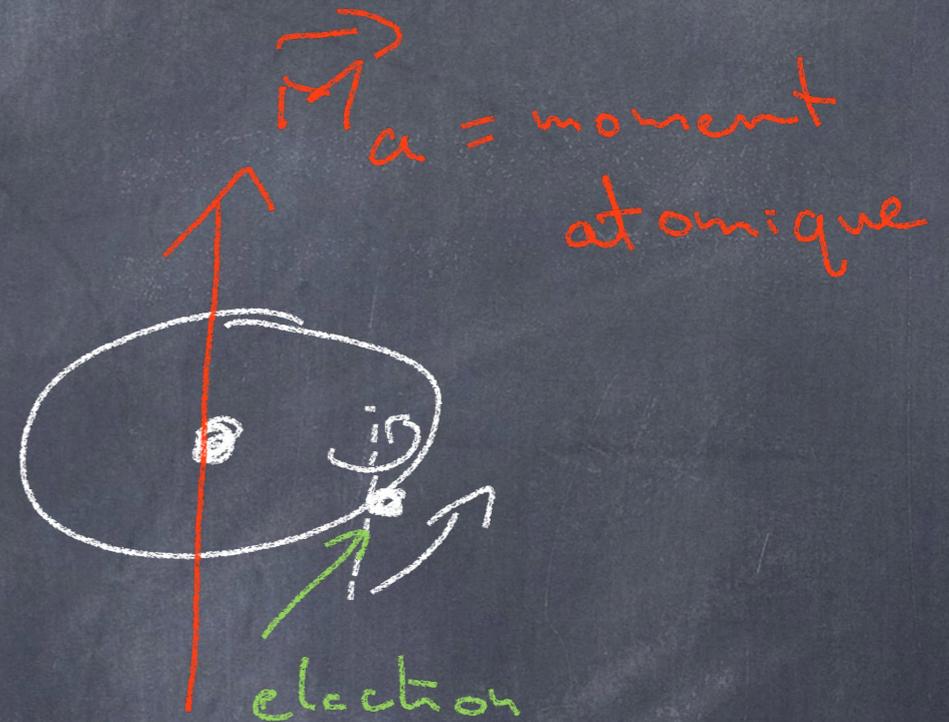
1/ Moment magnétique ORBITAL (autour du noyau)

2/ Moment magnétique de spin

Rotation de l'électron sur lui-même.

Le moment magnétique d'un corps dépend du degré d'alignement des moments magnétiques individuels.

Il existe 3 niveaux d'organisation éventuellement superposés



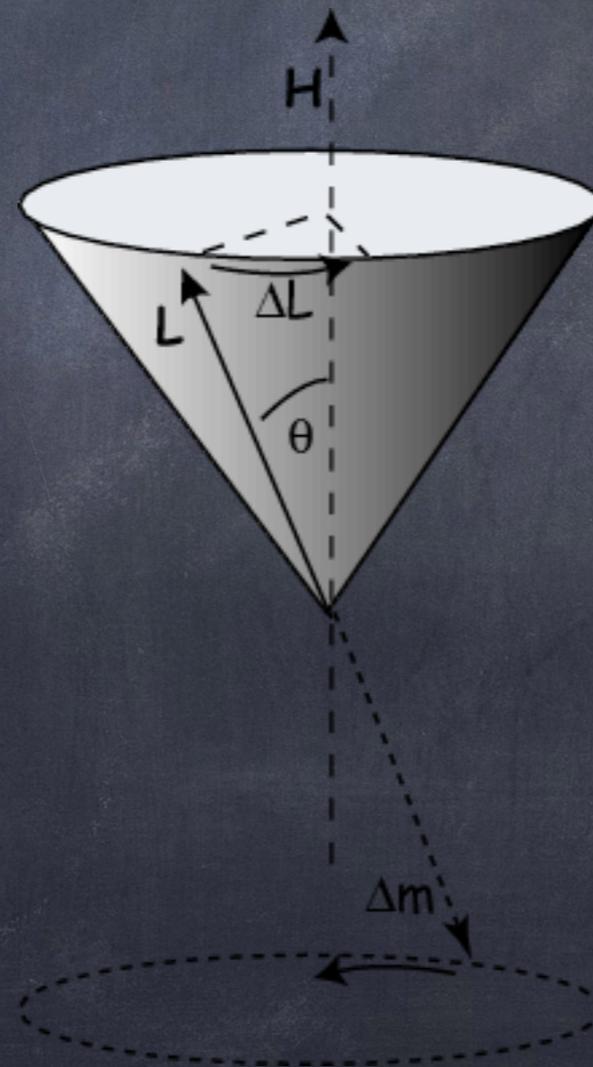
## 2.2 : Comportement magnétique de la matière

(i) Organisation à l'échelle atomique.

**1er Cas :** Atomes sans moments permanents , Ex :  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$

En présence d'un champ, modification des orbites électroniques de manière à créer un moment magnétique qui va s'opposer au champ appliqué.

Réaction de diamagnétisme



## 2: Le magnétisme de la matière

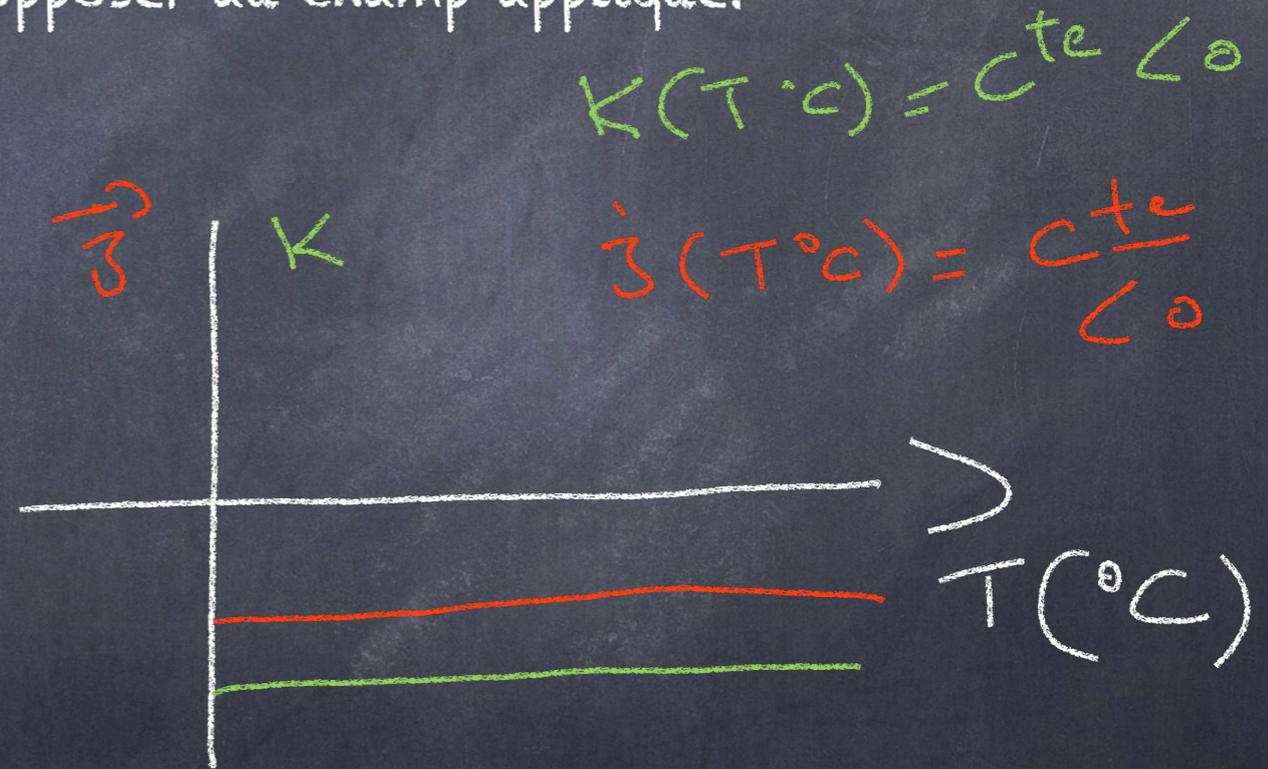
### 2.2 : Comportement magnétique de la matière

#### (i) Organisation à l'échelle atomique.

**1er Cas :** Atomes sans moments permanents, Ex :  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$

En présence d'un champ, modification des orbitales électroniques de manière à créer un moment magnétique qui va s'opposer au champ appliqué.

Réaction de diamagnétisme



Les corps composés d'atomes sans moments permanents sont eux aussi diamagnétiques. Exemple : Quartz, l'eau, l'air, la calcite etc....

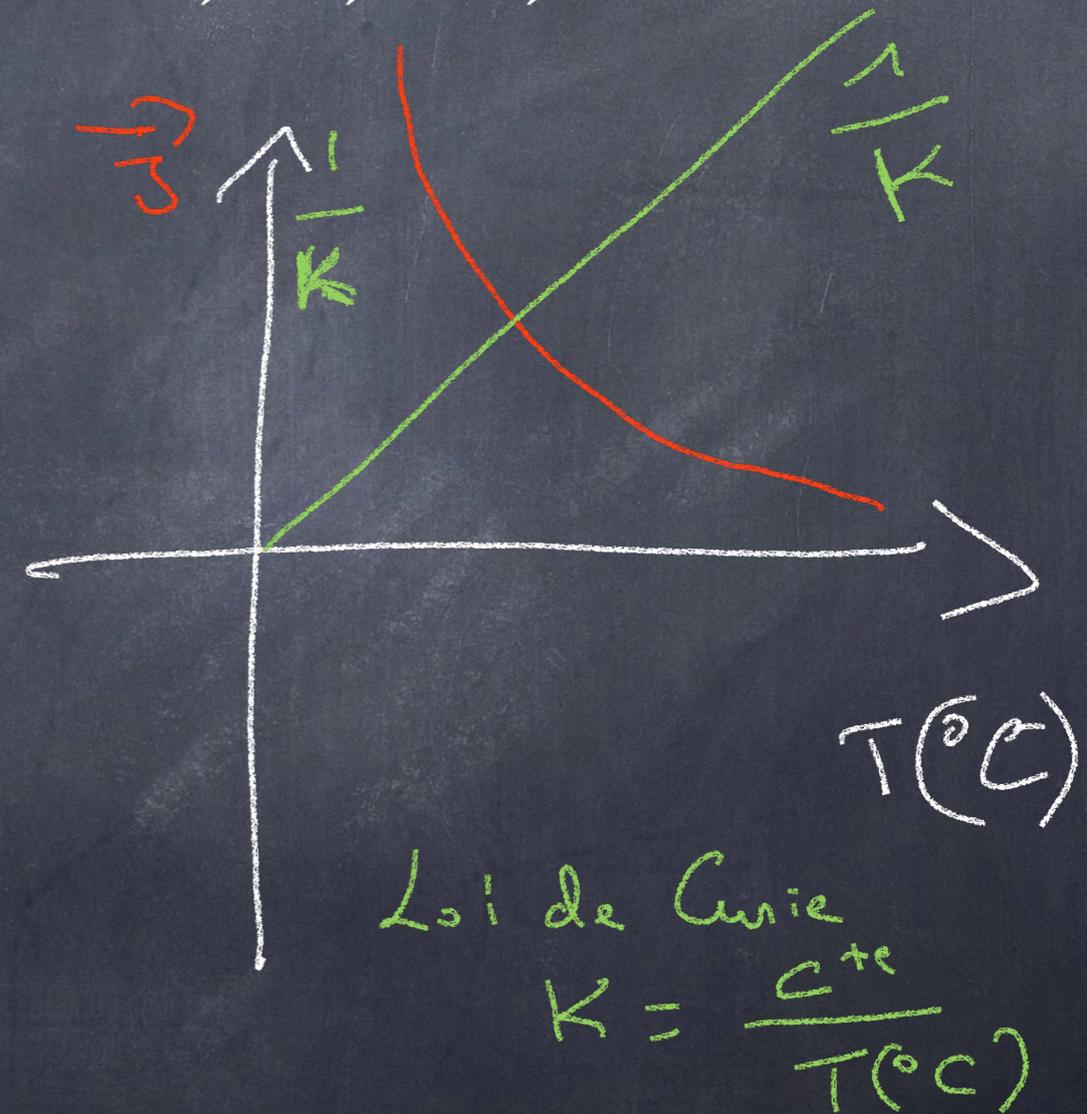
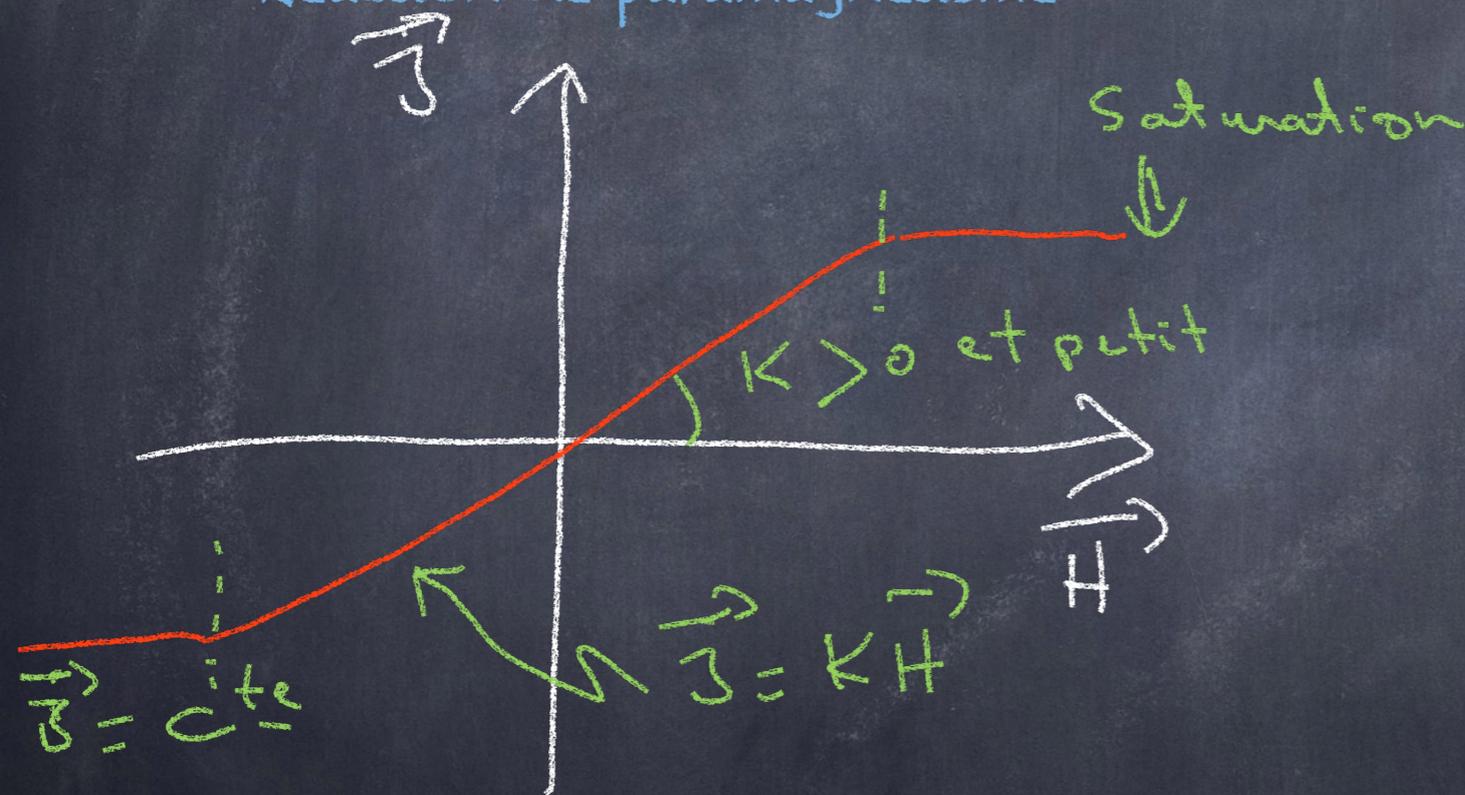
## 2: Le magnétisme de la matière

### 2.2 : Comportement magnétique de la matière

(i) Organisation à l'échelle atomique.

2eme Cas : Atomes ayant un moment permanent : Ex :  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$

Réaction de paramagnétisme



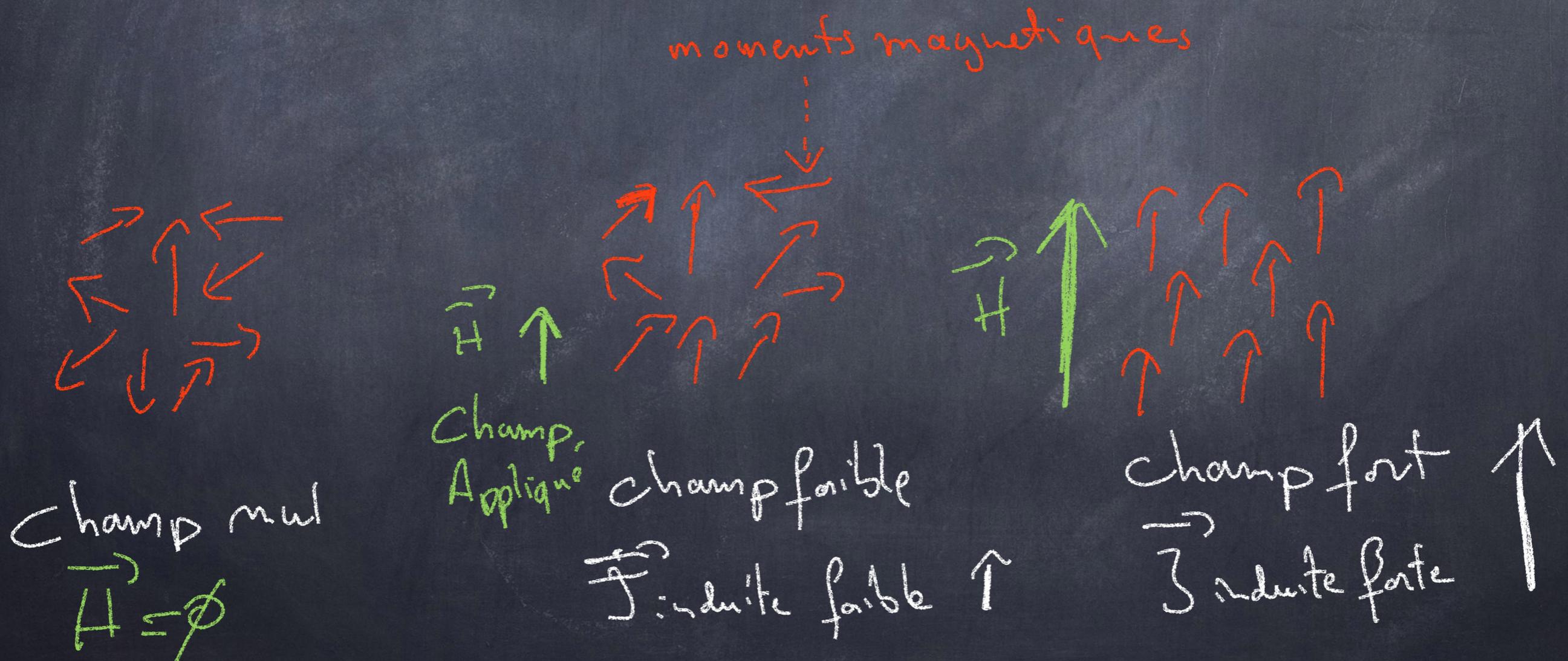
Les corps pour lesquels il n'y a pas d'interactions entre moments adjacents sont paramagnétiques. Exemple la plupart des silicates. Biotite, Fayalite etc...

## 2.2 : Comportement magnétique de la matière

(i) Organisation à l'échelle atomique.

2eme Cas : Atomes ayant un moment permanent : Ex :  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$

Réaction de paramagnétisme



## 2.2 : Comportement magnétique de la matière

!!! Important

### (ii) Organisation à l'échelle moléculaire.

Pour les solides qui contiennent des atomes avec un moment magnétique permanent mais qui présentent des **interactions** entre proches voisins, il y a une **auto-organisation** des moments atomiques.

Ferromagnétisme (sl) (sensu lato)



$\mathcal{E}$  alignement magnétique

$\mathcal{E}$  thermique

Pour  $T < T_{Curie}$

Apparition d'une aimantation spontanée qui existe en l'absence de champ  
 $= \vec{M}_s$



$\mathcal{E}$  alig. magnétique  $<$   $\mathcal{E}$  thermique

Pour  $T > T_{Curie}$

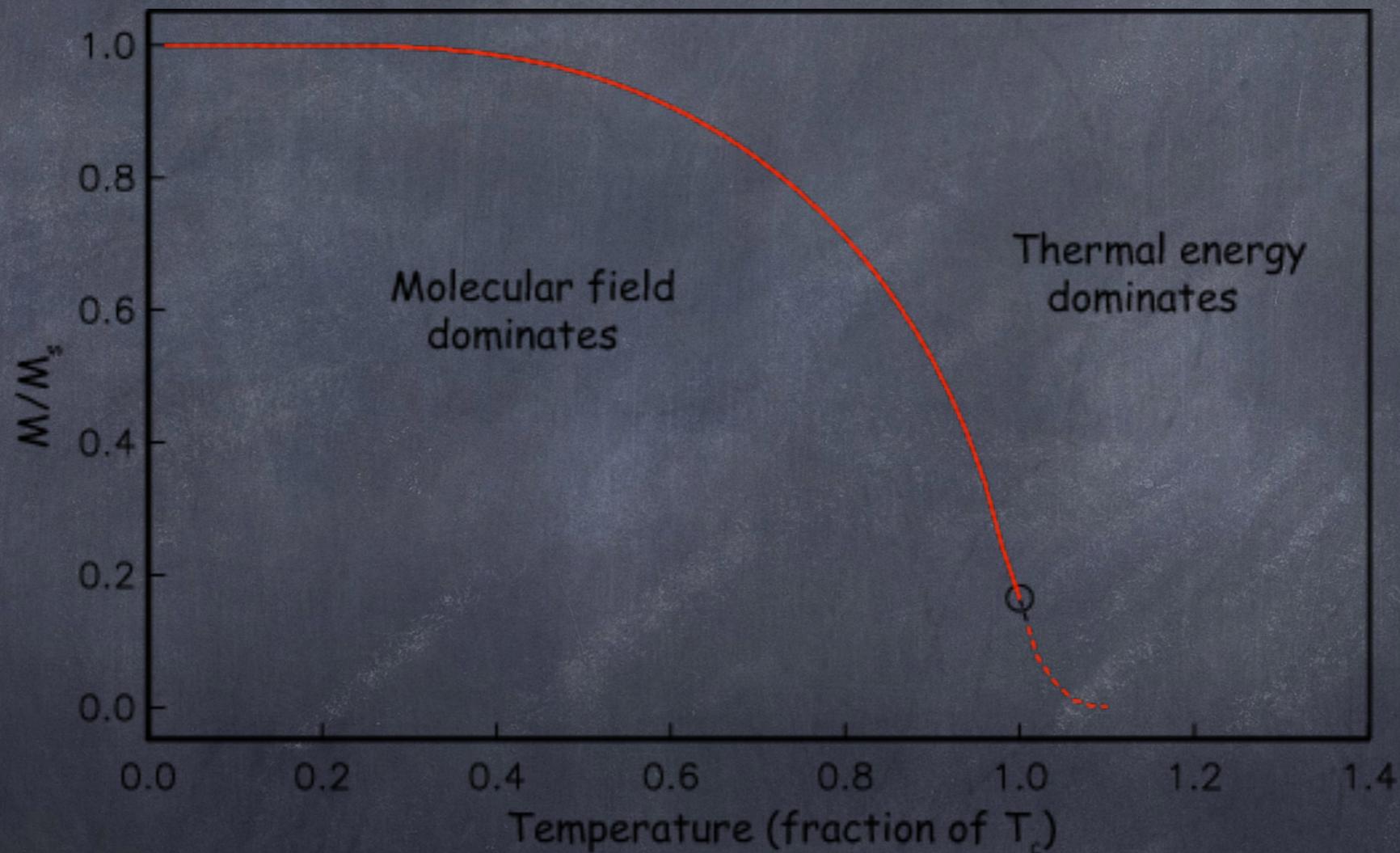
Comportement paramagnétique

Le ferromagnétisme (sl) se superpose au paramagnétisme

## 2.2 : Comportement magnétique de la matière

### (ii) Organisation à l'échelle moléculaire.

Ferromagnétisme (sl) ....suite



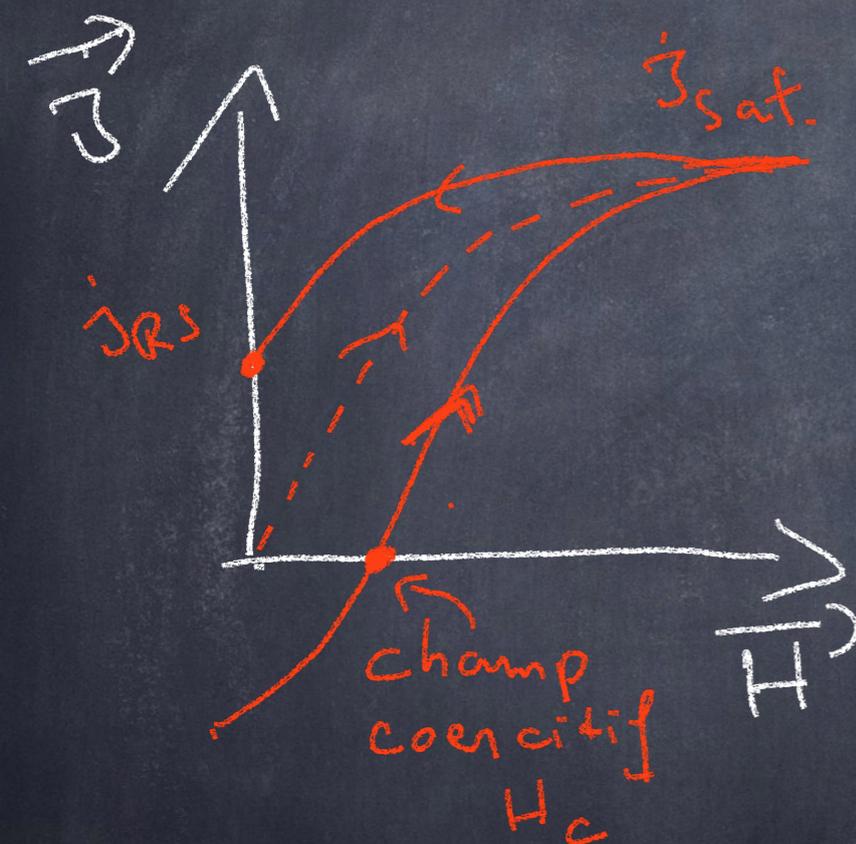
Exemple : Toute les roches qui contiennent, même en infime Proportion des minéraux comme la magnétite, l'hématite, les pyrrhotites

## 2: Le magnétisme de la matière

### 2.2 : Comportement magnétique de la matière

#### (ii) Organisation à l'échelle moléculaire.

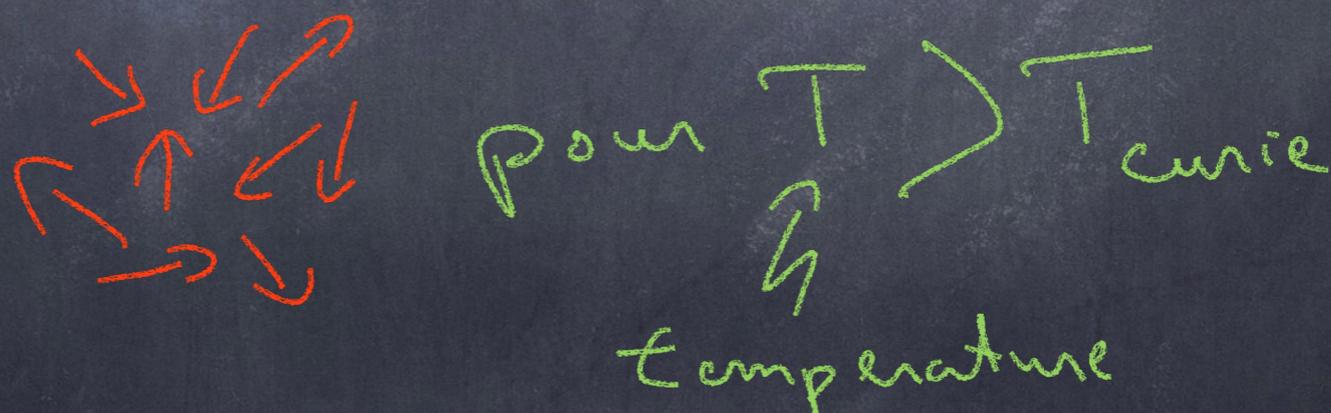
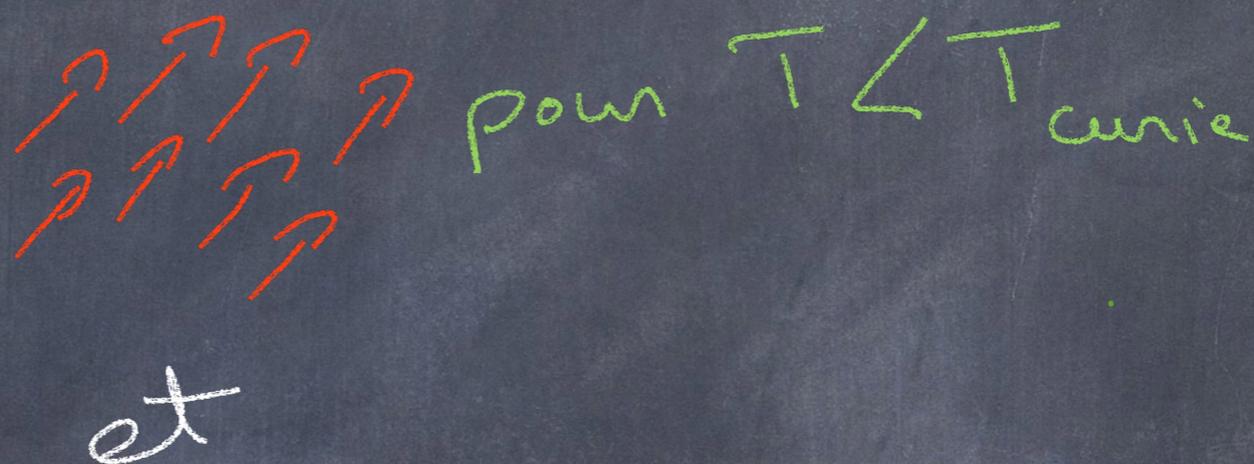
Ferromagnétisme (sl) ....suite



K positive et forte

K varie a la fois avec T et H

Comportement complexe de J avec T et H



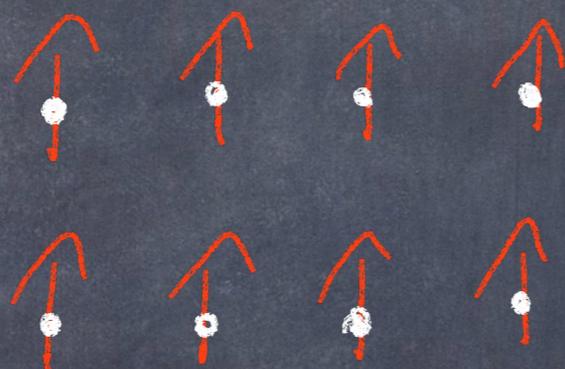
Exemple : Toute les roches qui contiennent, même en infime Proportion des minéraux comme la magnétite, l'hématite, les pyrrhotites

## 2.2 : Comportement magnétique de la matière

Les différents types d'auto-organisation

Ferromagnétisme (ss) (sensu stricto) : Ex. Le Fer, Le Nickel

1 seul réseau  
magnétique.

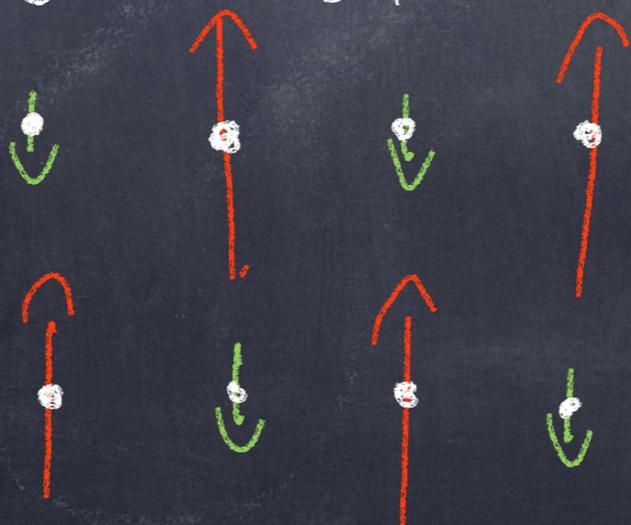


$\uparrow$   $\uparrow$   $\uparrow$   $\uparrow$   
 $\uparrow$   $\uparrow$   $\uparrow$   $\uparrow$   
 $\uparrow$  forte

N'existe pas dans les  
roches.

Ferrimagnétisme : Ex. La magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

2 sous réseaux  
magnétiques  
A et B



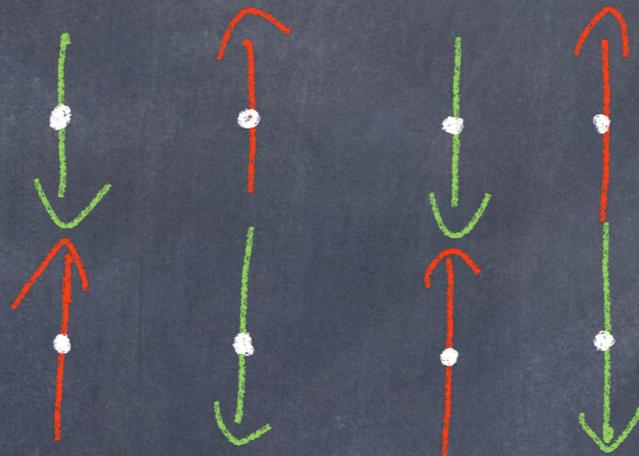
$$\uparrow = \sigma_A + \sigma_B$$

## 2.2 : Comportement magnétique de la matière

Les différents types d'auto-organisation

Anti-Ferromagnétisme : Ex. L'ilménite ( $\text{FeTiO}_3$ )

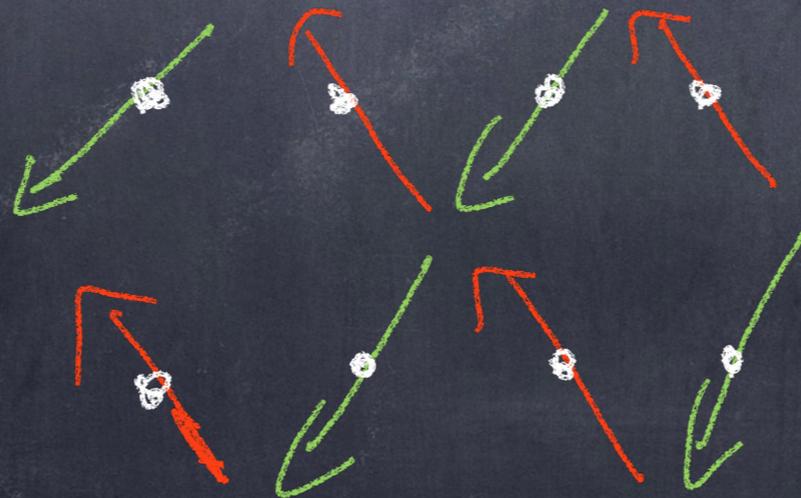
2 sous-réseaux  
magnétiques  
A et B



$$\vec{J}_S = 0$$
$$\vec{J}_A = -\vec{J}_B$$

Anti-Ferromagnétisme imparfait: Ex. L'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

2 sous-réseaux  
magnétiques  
A et B



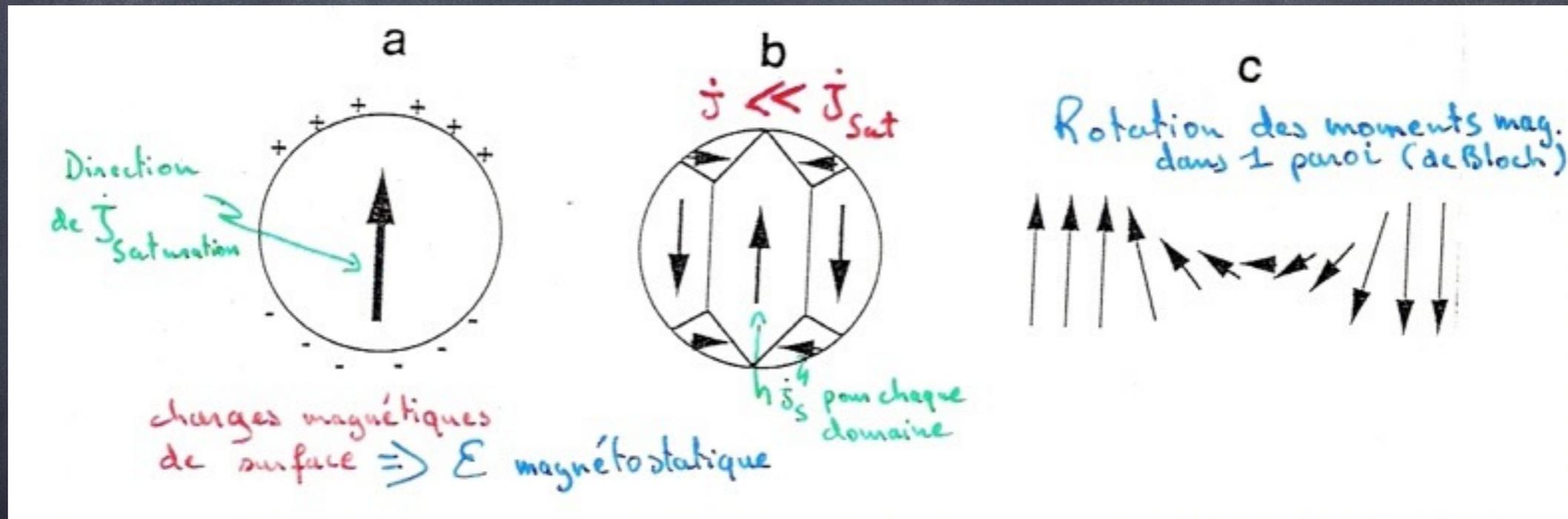
$J_S$  faible  
←

## 2.2 : Comportement magnétique de la matière

### (iii) Organisation à l'échelle du minéral.

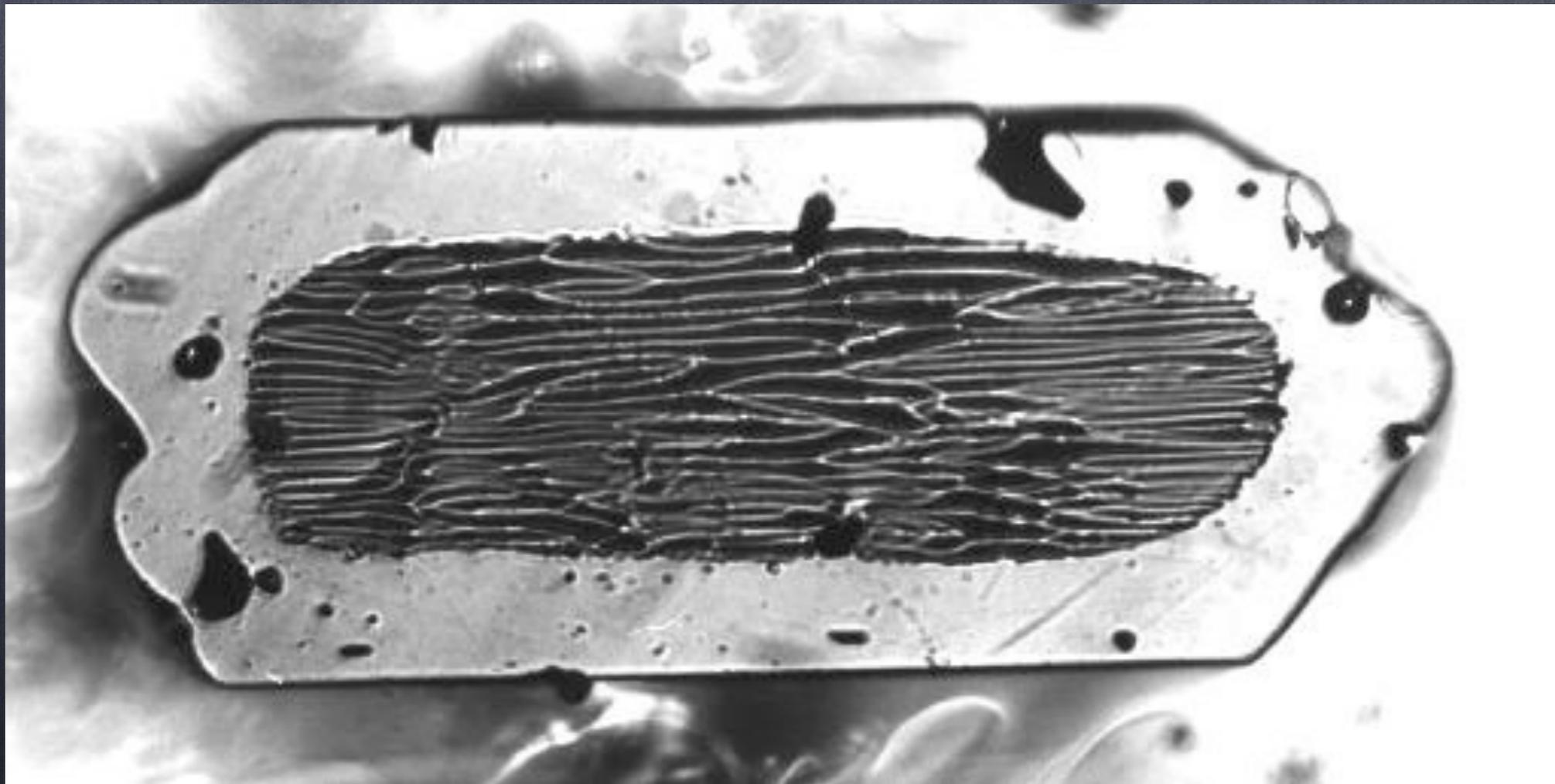
Question: Pourquoi est-il facile de trouver du fer non aimanté ?

Réponse : Organisation en domaine magnétiques (Pierre Weiss, 1906)



2.2 : Comportement magnétique de la matière

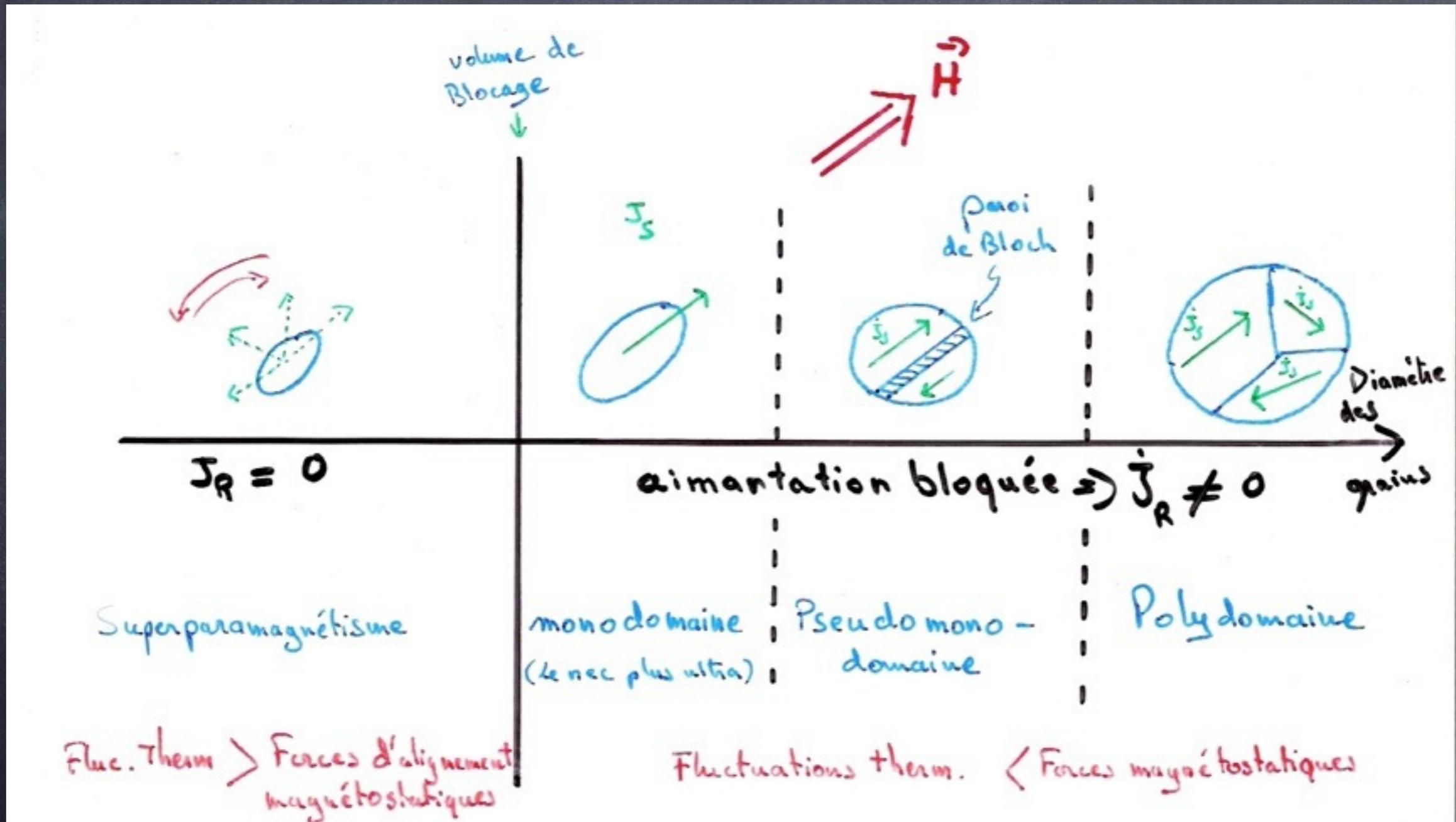
# Observation des domaines magnétiques



## 2: Le magnétisme de la matière

### 2.2 : Comportement magnétique de la matière

En résumé : Organisation en fonction de la taille des grains (à T constante)



Magnétite monodomaine 0,03 - 0,05  $\mu\text{m}$  (grain cubique), 1  $\mu\text{m}$  grains allongés  
Hématite monodomaine 0,03 - 15  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  grains allongés