

6) Magnétisme des solides

6.1 Origine du magnétisme

6.1.1 Moment magnétique orbital de l'électron

• Traitement classique

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = mrv\vec{u}$$

$$I = -\frac{e}{T} = -\frac{ev}{2\pi r}$$

$$\vec{\mu}_L = I\vec{S} = -\frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 \vec{u} = -\frac{e}{2m} mrv\vec{u}$$

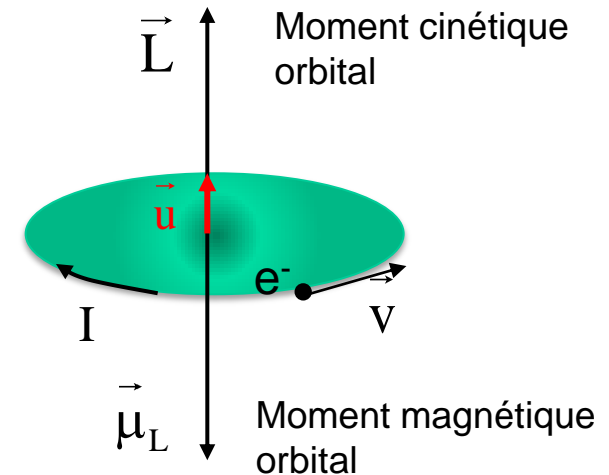
$$\vec{\mu}_L = -\frac{e}{2m} \vec{L}$$

$$\vec{\mu}_L = -\mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar} = -\mu_B \vec{l}$$

$$\vec{l} = \frac{\vec{L}}{\hbar}$$

Magnéton de Bohr

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ JT}^{-1}$$



6) Magnétisme des solides

• Traitement quantique

$$L^2 Y_{l,m}(\theta, \phi) = l(l+1)\hbar^2 Y_{l,m} \quad l = 0, 1, 2, \dots, \quad \text{nombre quantique orbital}$$

$$L_z Y_{l,m}(\theta, \phi) = m\hbar Y_{l,m} \quad -l \leq m \leq l \quad \text{nombre quantique magnétique}$$

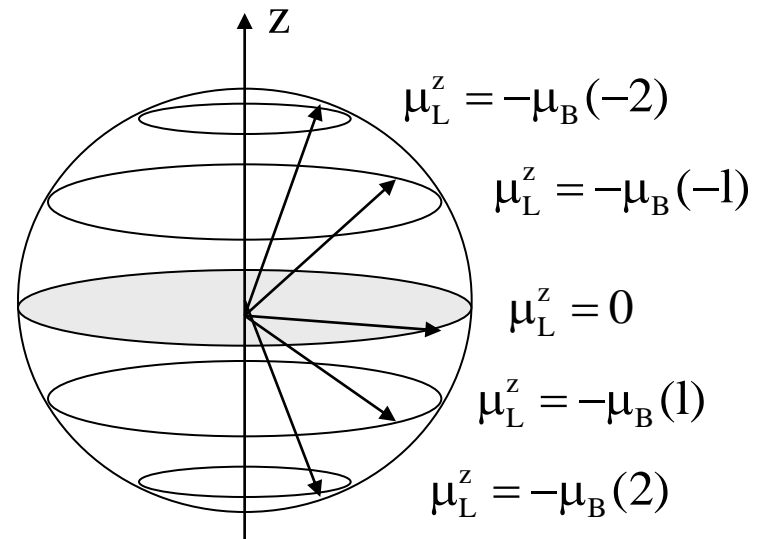
$$\vec{\mu}_L = -\mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar} = -\mu_B \vec{l}$$

$$\|\vec{\mu}_L\| = \mu_B \sqrt{l(l+1)} \quad -\mu_B l \leq \mu_L^z \leq \mu_B l$$

exemple

$l = 2$ orbitales d

$$\|\vec{\mu}_L\| = \mu_B \sqrt{6}$$



6) Magnétisme des solides

6.1.2 Moment magnétique de spin de l'électron

Notion purement quantique

Moment cinétique de spin

$$\vec{S} = \frac{\hbar}{2} \vec{\sigma}$$

Matrices de Pauli

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$|\uparrow\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |\downarrow\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{vecteurs propres de } \sigma_z$$

$$[\sigma_x, \sigma_y] = 2i\sigma_z$$

$$[S_x, S_y] = i\hbar S_z \quad (\text{moment cinétique})$$

$$\hat{S}_z |\uparrow\rangle = \frac{\hbar}{2} |\uparrow\rangle \quad \hat{S}_z |\downarrow\rangle = -\frac{\hbar}{2} |\downarrow\rangle \quad \hat{S}^2 |\uparrow, \downarrow\rangle = \frac{3\hbar^2}{4} |\uparrow, \downarrow\rangle$$

Moment magnétique de spin

$$\vec{\mu}_s = -2\mu_B \vec{S} = -\mu_B \vec{\sigma}$$

$$\vec{S} = \frac{\hbar}{2} \vec{\sigma} = \frac{1}{2} \vec{\sigma} \quad \mu_s^z = \pm \mu_B$$

$$\vec{\mu}_s = -g\mu_B \vec{S}$$

$$g_s = 2.002319304\dots$$

Rq: pour le proton

$$\vec{\mu}_s^p = -g_p \mu_p \vec{S}$$

$$g_p = 5.585\dots \quad \mu_p = \frac{e\hbar}{2m_p} \sim \frac{\mu_B}{2000}$$

6) Magnétisme des solides

6.1.3 Couplage spin-orbite

Le couplage spin-orbite peut être décrit de manière classique comme l'interaction du champ magnétique « vu » par l'électron en mouvement et engendré par la charge du noyau avec le moment magnétique du spin de l'électron. De manière plus rigoureuse on peut retrouver cette interaction par un développement en perturbation de l'équation de Dirac.

$$H_{\text{so}} = \xi(\mathbf{r}) \vec{L} \cdot \vec{S}$$

$$\xi(\mathbf{r}) = \frac{1}{2m^2c^2} \frac{1}{r} \frac{dV}{dr}$$

$\xi(\mathbf{r})$ Potentiel très localisé d'autant plus fort que l'atome est lourd

$$\text{Fer } \langle \xi(\mathbf{r}) \rangle \sim 0,06\text{eV}$$

$$\text{Pt } \langle \xi(\mathbf{r}) \rangle \sim 0,6\text{eV}$$

6) Magnétisme des solides

La base adaptée

• Sans couplage spin-orbite

\vec{L} et \vec{S} commutent avec H

Base qui diagonalise $L^2, L_z, \hat{S}^2, \hat{S}_z \longrightarrow |l, m\rangle \otimes |\varepsilon\rangle$

$$L^2 |l, m\rangle = l(l+1)\hbar^2 |l, m\rangle \quad \hat{S}^2 |\varepsilon\rangle = \frac{3}{4}\hbar^2 |\varepsilon\rangle$$

$$L_z |l, m\rangle = m\hbar |l, m\rangle \quad \hat{S}_z |\varepsilon\rangle = \varepsilon\hbar |\varepsilon\rangle$$

• Avec couplage spin-orbite

\vec{L} et \vec{S} ne commutent plus avec $H + H_{so}$

on introduit $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$

base qui diagonalise $\hat{J}^2, \hat{J}_z \longrightarrow |J, M_J\rangle$

$$\begin{aligned} \hat{J}^2 |J, M_J\rangle &= J(J+1)\hbar^2 |J, M_J\rangle & |L-S| \leq J \leq L+S & & L=1 \\ \hat{J}_z |J, M_J\rangle &= M_J\hbar |J, M_J\rangle & M_J = \underbrace{-J, -J+1, \dots, J}_{2J+1} & & S=\frac{1}{2} \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} \hat{J}^2 \\ \hat{J}_z \end{aligned}} \right\} J = 1 - \frac{1}{2}, 1 + \frac{1}{2}$$

$$L \cdot \hat{S} |J, M_J\rangle = \frac{1}{2} \left[\langle \hat{J}^2 \rangle - \langle L^2 \rangle - \langle \hat{S}^2 \rangle \right] |J, M_J\rangle = \frac{\hbar^2}{2} [J(J+1) - l(l+1) - s(s+1)] |J, M_J\rangle$$

6) Magnétisme des solides

6.1.3 Moment magnétique des atomes (et des ions)

Atome = état multiélectronique

Pour des atomes « pas trop lourds » pour lesquels le couplage spin-orbite est faible par rapport aux interactions électroniques les **règles de Hund** fonctionnent très bien

•Modèle vectoriel

$$\vec{L} = \sum_i \vec{L}_i \quad \vec{S} = \sum_i \vec{S}_i \quad \vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

On additionne les contributions de chaque électron

Règles des Hund

- 1) Pour une configuration électronique donnée l'état le plus stable est celui avec **S maximum**
- 2) Pour S donné l'état le plus stable est celui de moment orbital **L maximum**
- 3) Pour S et L donnés l'état le plus stable est celui:
J minimum pour les couches moins qu'à moitié remplies $J = |L - S|$
J maximum pour les couches plus qu'à moitié remplies $J = |L + S|$

6) Magnétisme des solides

- Règle no 1 ou règle de l'autobus!

(les passagers prennent des sièges avec une place voisine libre)

Les spins s'alignent et donc puisque la fonction d'onde « d'espace » (sans spin) est antisymétrique les électrons sont en moyenne plus éloignés.. (exclusion de Pauli)

- Règle no 2 ou règle du manège tournant

Les électrons préfèrent tourner dans le même sens et ainsi minimiser leur Interaction coulombienne en évitant les croisement...

- Règle no 3

Provient du couplage spin-orbite

6) Magnétisme des solides

Règles des Hund

Exemples



ml	0
ms	↑↓

ml	+2	+1	0	-1	-2
ms	↑↓	↑	↑	↑	↑

$$J = |L + S|$$

$$^{2S+1}L_J = ^5D_4$$



ml	0
ms	↑↓

ml	-2	-1	0	+1	+2
ms	↑	↑	↑		

$$J = |L - S|$$

$$^{2S+1}L_J = ^4F_{3/2}$$

	configuration	L	S	J	g_j	$\mu_j [\mu_B]$	termsymbol
Sc	[Ar], $4s^2 3d^1$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	-0.8	-1.2	$^2D_{3/2}$
Ti	[Ar], $4s^2 3d^2$	$\frac{2}{2}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{4}{2}$	-0.67	-1.33	$^3F_{3/2}$
V	[Ar], $4s^2 3d^3$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	-0.40	-0.60	$^4F_{3/2}$
Cr*	[Ar], $4s^1 3d^5$	0 0	$\frac{5}{2}$ $\frac{5}{2}$	$\frac{5}{2}$ $\frac{5}{2}$	-2 -2	-1 -5	$^2S_{1/2}$ $^6S_{5/2}$
Mn	[Ar], $4s^2 3d^5$	0	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{2}$	-2	-5	$^6S_{5/2}$
Fe	[Ar], $4s^2 3d^6$	$\frac{4}{2}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{2}{2}$	-1.5	-6.0	$^5D_{8/2}$
Co	[Ar], $4s^2 3d^7$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	-1.33	-6.0	$^4F_{9/2}$
Ni	[Ar], $4s^2 3d^8$	$\frac{2}{2}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{8}{2}$	-1.25	-5.0	$^3F_{8/2}$
Cu*	[Ar], $4s^1 3d^{10}$	0 0	$\frac{1}{2}$ 0	$\frac{1}{2}$ 0	-2 0	-1 0	$^2S_{1/2}$ 1S_0
Zn	[Ar], $4s^2 3d^{10}$	0	0	0	0	0	1S_0

6) Magnétisme des solides

•Moment magnétique total

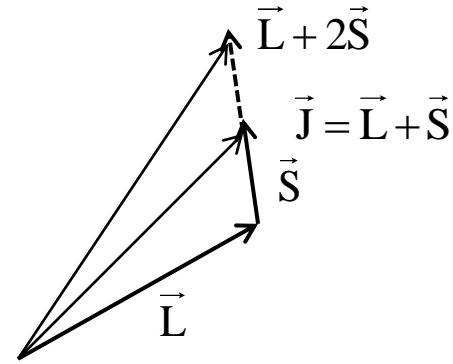
$$\vec{\mu}_{\text{tot}} = -\frac{\mu_B}{\hbar} (\vec{L} + 2\vec{S})$$

$$\vec{\mu}_J = -g_J \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{J}$$

$$(\vec{L} + 2\vec{S}) \cdot \vec{J} = g_J J^2$$

Rapport gyromagnétique

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$



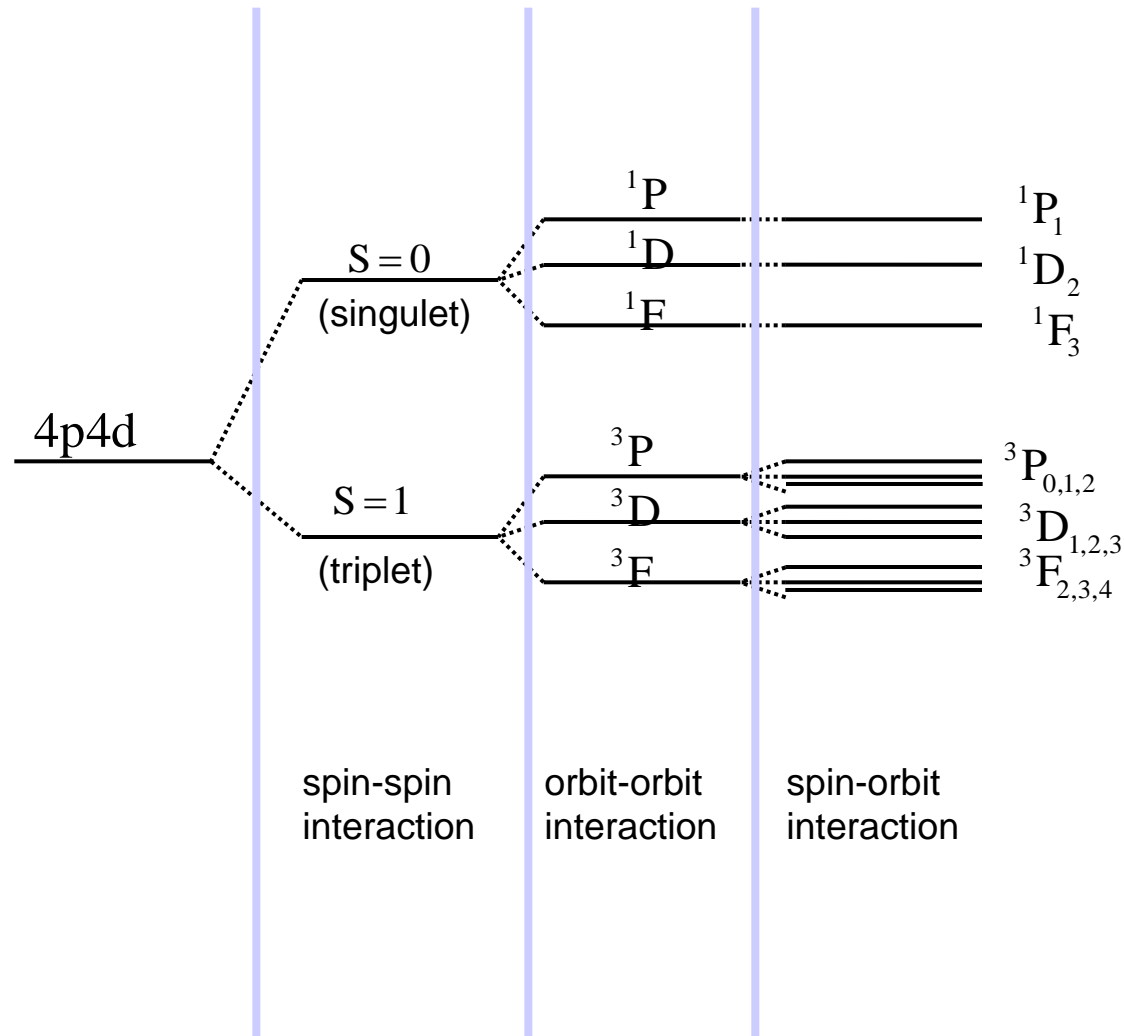
Si $L=0$ alors $J=S$ et $g=2$

(se produit pour les couches $\frac{1}{2}$ remplies)

Si $S=0$ alors $J=L$ et $g=1$

Les règles de Hund 1 et 2 jouent en faveur du magnétisme des atomes

6) Magnétisme des solides



6) Magnétisme des solides

79 atomes sur 103 sont magnétiques

		1A 1	Core										2A 2	3A 13	4A 14	5A 15	6A 16	7A 17	8A 18	
	Core	1 H $1s^1$																	2 He $1s^2$	
	[He]	3 Li $2s^1$	4 Be $2s^2$												5 B $2s^2 2p^1$	6 C $2s^2 2p^2$	7 N $2s^2 2p^3$	8 O $2s^2 2p^4$	9 F $2s^2 2p^5$	10 Ne $2s^2 2p^6$
	[Ne]	11 Na $3s^1$	12 Mg $3s^2$	3B 3	4B 4	5B 5	6B 6	7B 7	8B 8 9 10			1B 11	2B 12	13 Al $3s^2 3p^1$	14 Si $3s^2 3p^2$	15 P $3s^2 3p^3$	16 S $3s^2 3p^4$	17 Cl $3s^2 3p^5$	18 Ar $3s^2 3p^6$	
	[Ar]	19 K $4s^1$	20 Ca $4s^2$	21 Sc $3d^1 4s^2$	22 Ti $3d^2 4s^2$	23 V $3d^3 4s^2$	24 Cr $3d^5 4s^1$	25 Mn $3d^5 4s^2$	26 Fe $3d^6 4s^2$	27 Co $3d^7 4s^2$	28 Ni $3d^8 4s^2$	29 Cu $3d^{10} 4s^1$	30 Zn $3d^{10} 4s^2$	31 Ga $4p^1$	32 Ge $4p^2$	33 As $4p^3$	34 Se $4p^4$	35 Br $4p^5$	36 Kr $4p^6$	
	[Kr]	37 Rb $5s^1$	38 Sr $5s^2$	39 Y $4d^1 5s^2$	40 Zr $4d^2 5s^2$	41 Nb $4d^3 5s^2$	42 Mo $4d^5 5s^1$	43 Tc $4d^5 5s^2$	44 Ru $4d^7 5s^1$	45 Rh $4d^8 5s^1$	46 Pd $4d^{10}$	47 Ag $4d^{10} 5s^1$	48 Cd $4d^{10} 5s^2$	49 In $5p^1$	50 Sn $5p^2$	51 Sb $5p^3$	52 Te $5p^4$	53 I $5p^5$	54 Xe $4d^{10} 5s^2 5p^6$	
	[Xe]	55 Cs $6s^1$	56 Ba $6s^2$	71 Lu $4f^{14} 5d^1 6s^2$	72 Hf $4f^{14} 5d^2 6s^2$	73 Ta $4f^{14} 5d^3 6s^2$	74 W $4f^{14} 5d^4 6s^2$	75 Re $4f^{14} 5d^5 6s^2$	76 Os $4f^{14} 5d^6 6s^2$	77 Ir $4f^{14} 5d^7 6s^2$	78 Pt $4f^{14} 5d^9 6s^1$	79 Au $4f^{14} 5d^{10} 6s^1$	80 Hg $4f^{14} 5d^{10} 6s^2$	81 Tl $6s^2 6p^1$	82 Pb $6s^2 6p^2$	83 Bi $6s^2 6p^3$	84 Po $6s^2 6p^4$	85 At $6s^2 6p^5$	86 Rn $4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$	
	[Rn]	87 Fr $7s^1$	88 Ra $7s^2$	103 Lr $5f^{14} 6d^1 7s^2$	104 Rf $5f^{14} 6d^2 7s^2$	105 Db $5f^{14} 6d^3 7s^2$	106 Sg $5f^{14} 6d^4 7s^2$	107 Bh $5f^{14} 6d^5 7s^2$	108 Hs $5f^{14} 6d^6 7s^2$	109 Mt $5f^{14} 6d^7 7s^2$	110	111	112		114		116			

[Xe]	Lanthanide series	57 La $5d^1 6s^2$	58 Ce $4f^1 5d^1 6s^2$	59 Pr $4f^3 6s^2$	60 Nd $4f^4 6s^2$	61 Pm $4f^5 6s^2$	62 Sm $4f^6 6s^2$	63 Eu $4f^7 6s^2$	64 Gd $4f^7 5d^1 6s^2$	65 Tb $4f^9 6s^2$	66 Dy $4f^{10} 6s^2$	67 Ho $4f^{11} 6s^2$	68 Er $4f^{12} 6s^2$	69 Tm $4f^{13} 6s^2$	70 Yb $4f^{14} 6s^2$
[Rn]	Actinide series	89 Ac $6d^1 7s^2$	90 Th $6d^2 7s^2$	91 Pa $5f^2 6d^1 7s^2$	92 U $5f^3 6d^1 7s^2$	93 Np $5f^4 6d^1 7s^2$	94 Pu $5f^6 7s^2$	95 Am $5f^7 7s^2$	96 Cm $5f^7 6d^1 7s^2$	97 Bk $5f^9 7s^2$	98 Cf $5f^{10} 7s^2$	99 Es $5f^{11} 7s^2$	100 Fm $5f^{12} 7s^2$	101 Md $5f^{13} 7s^2$	102 No $5f^{14} 7s^2$

Metals
 Metalloids
 Nonmetals

6) Magnétisme des solides

6.1.4 Atome dans un champ magnétique

Hamiltonien sans champ magnétique

$$H_0 = \frac{p^2}{2m} + V(r)$$

Hamiltonien sous champ magnétique

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad \vec{A} = -\frac{1}{2} \vec{r} \times \vec{B} \quad \text{jauge} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{A} = \text{div} \vec{A} = 0$$

$$\vec{P} \rightarrow \vec{P} - q\vec{A} \quad \longrightarrow \quad H = \frac{(\vec{P} - q\vec{A})^2}{2m} + V(r)$$

Hamiltonien « magnétique » $H = H_0 + H_1 + H_2$

Hamiltonien Zeeman

$$H_1 = \mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar} \cdot \vec{B} = -\vec{\mu}_L \cdot \vec{B}$$

$$\mu_B = -\frac{q\hbar}{2m} = \frac{e\hbar}{2m}$$

Hamiltonien diamagnétique

$$H_2 = \frac{e^2 B^2}{8m} \vec{R}_\perp^2$$

$$\vec{B} \perp \vec{R}_\perp$$

6) Magnétisme des solides

en présence de spin

$$H_1 = \mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar} \cdot \vec{B} \longrightarrow H_1 = \mu_B \frac{\vec{L} + 2\vec{S}}{\hbar} \cdot \vec{B}$$

$$\vec{\mu}_{\text{tot}} \cdot \vec{B} = -\frac{\mu_B}{\hbar} (\vec{L} + 2\vec{S}) \cdot \vec{B} = -g_J \mu_B \frac{\vec{J}}{\hbar} \cdot \vec{B}$$

Hamiltonien Zeeman

$$H_1 = \frac{g_J \mu_B}{\hbar} \vec{J} \cdot \vec{B} = -\vec{\mu}_J \cdot \vec{B} = -\mu_0 \vec{\mu}_J \cdot \vec{H}$$

Hamiltonien diamagnétique

$$H_2 = \frac{e^2 B^2}{8m} R_{\perp}^2$$

On montre que

$$\Delta E_2 \ll \Delta E_1 \quad \text{sauf si} \quad \Delta E_1 = 0$$

6) Magnétisme des solides

6.2 Différents états magnétiques de la matière

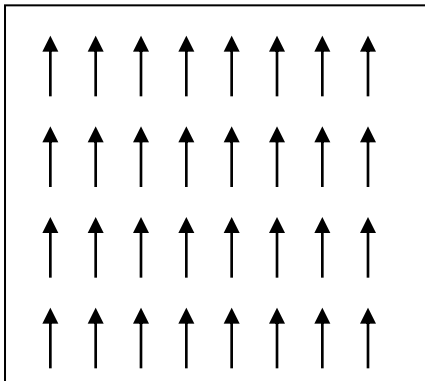
6.2.1 Magnétisme microscopique et macroscopique

Un matériau magnétique est un matériau dont les atomes portent un moment magnétique $\vec{\mu}_i$

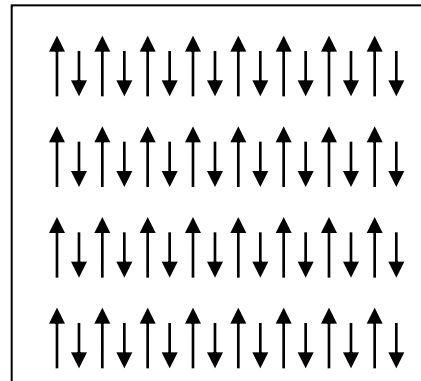
- matériau macroscopiquement aimanté

$$\vec{M} = \sum_i \vec{\mu}_i \neq 0$$

Ferromagnétique



Ferrimagnétique



6) Magnétisme des solides

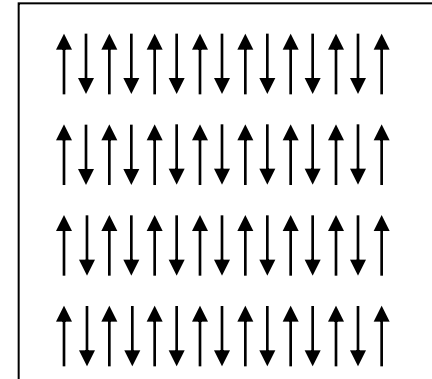
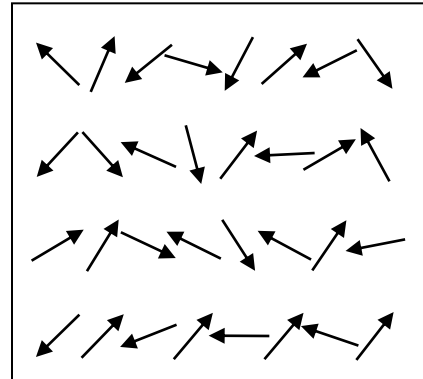
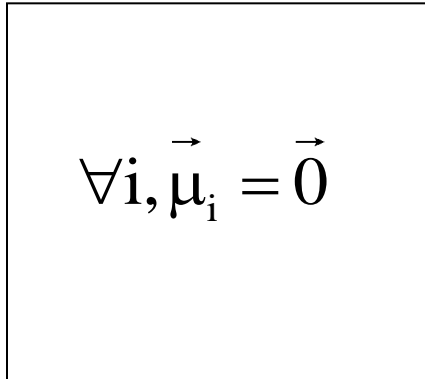
- matériau macroscopiquement non aimanté

$$\vec{M} = \sum_i \vec{\mu}_i = 0$$

Non magnétique

Paramagnétique

Antiferromagnétique



Paramagnétique = moments désordonnés.

- Paramagnétique =
- Matériau ferromagnétique au dessus de la température de Curie
 - Matériau antiferromagnétique au dessus de la température de Néel
 - Matériau sans interaction entre moments atomiques

6) Magnétisme des solides

6.2.2 Susceptibilité magnétique

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

moment magnétique/volume

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad \text{ou plus généralement} \quad \vec{M} = \underline{\underline{\chi}} \vec{H}$$

χ susceptibilité magnétique (sans dimension)

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}$$

μ_r

Pour un matériau ferromagnétique la relation n'est pas linéaire

$$\chi_{\alpha,\beta} = \frac{\partial M_\alpha}{\partial H_\beta}$$

6) Magnétisme des solides

6.2.3 Note sur les unités en magnétisme (SI)

Induction magnétique $\vec{B} \rightarrow (\text{T} = \text{Vs}/\text{m}^2 = \text{Wb}/\text{m}^2)$

Champ magnétique $\vec{H} \rightarrow (\text{A}/\text{m}) \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

Perméabilité du vide $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{H}/\text{m}$

Aimantation $\vec{M} \rightarrow (\text{A}/\text{m})$

Moment magnétique $\vec{\mu} \rightarrow \text{Am}^2$

Magnéton de Bohr $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9,2742 \cdot 10^{-24} \text{Am}^2$

Charge $q = \text{Coulomb}(\text{C})$

Charge de l'électron $-e = -1,6022 \cdot 10^{-19} \text{C}$

Quantum de flux $h/2e = 2,0678 \cdot 10^{-15} \text{Wb}$

$$\text{T} = \text{Wb}/\text{m}^2 \quad (\text{Tesla})$$

$$\text{H} = \text{Vs} / \text{A} \quad (\text{Henry})$$

$$\text{J} = \text{CV} \quad (\text{Joule})$$

$$\text{Wb} = \text{Vs} \quad (\text{Weber})$$

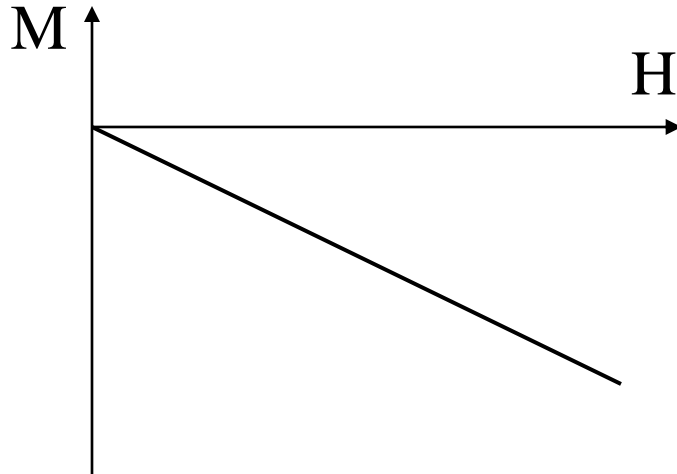
6) Magnétisme des solides

6.2.4 Les différents états magnétiques

diamagnétisme

$\chi < 0$ (et très faible $\sim -10^{-5}$)

χ indépendant de T



élément	χ (10^{-5})
Cu	-1,0
Pb	-1,8
C (diam)	-2,1
Ag	-2,6
Hg	-2,9

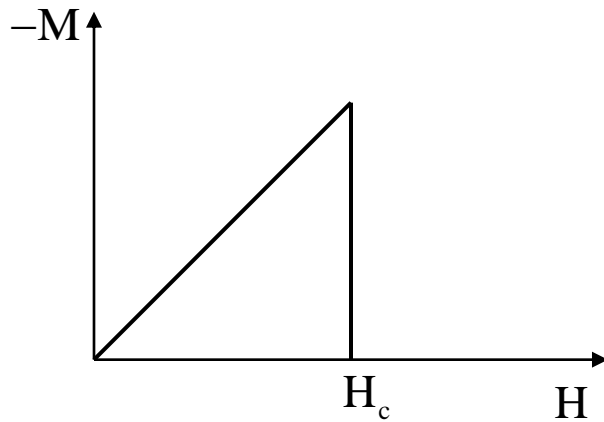
6) Magnétisme des solides

Supraconducteur = diamagnétique parfait

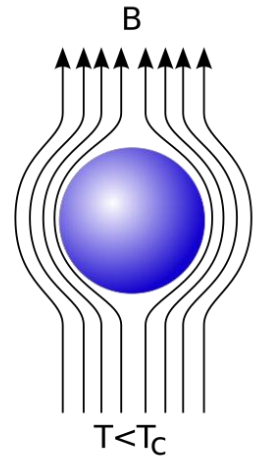
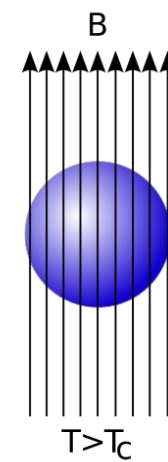
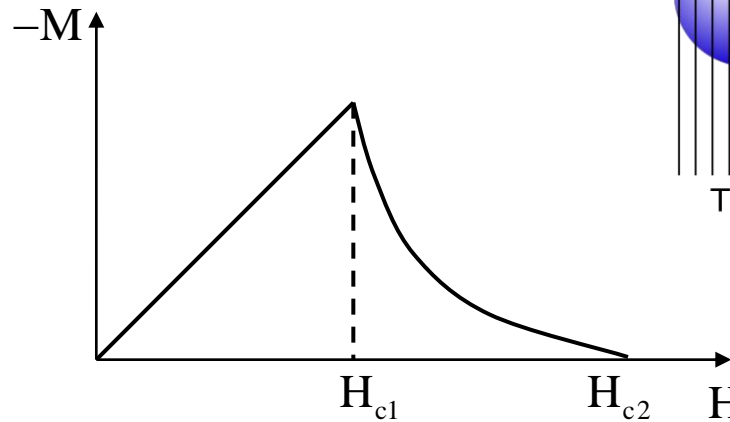
$$\chi = -1$$

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

Type I



Type II

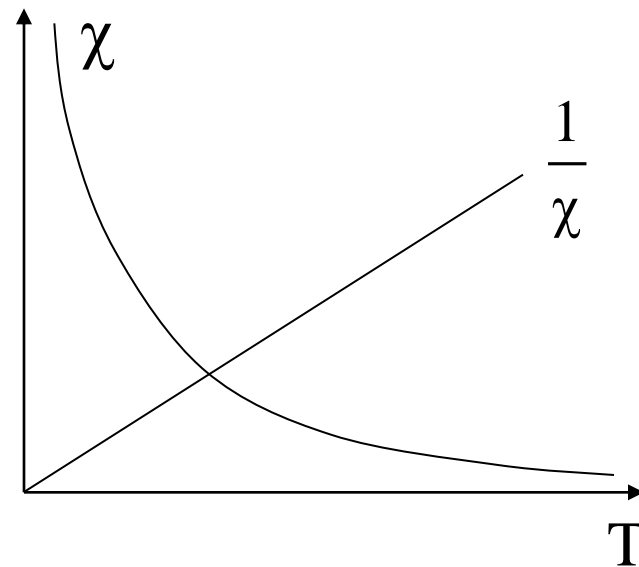
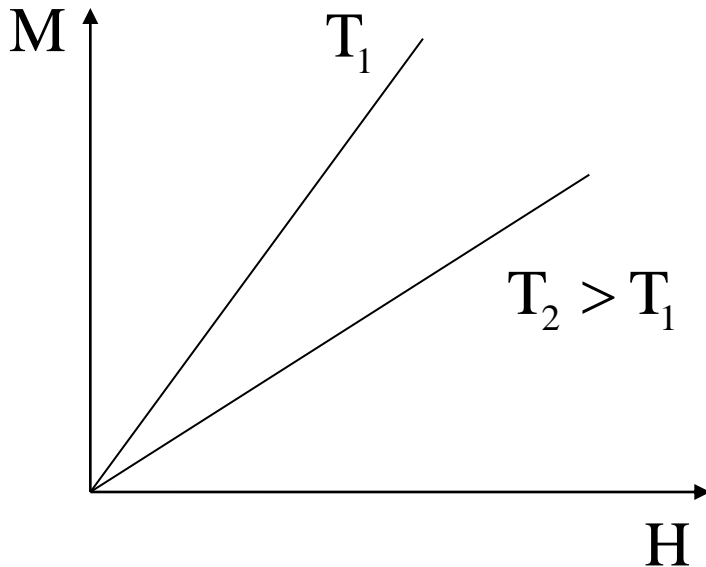


6) Magnétisme des solides

Paramagnétisme

$$\chi > 0 \quad (\sim 10^{-3})$$

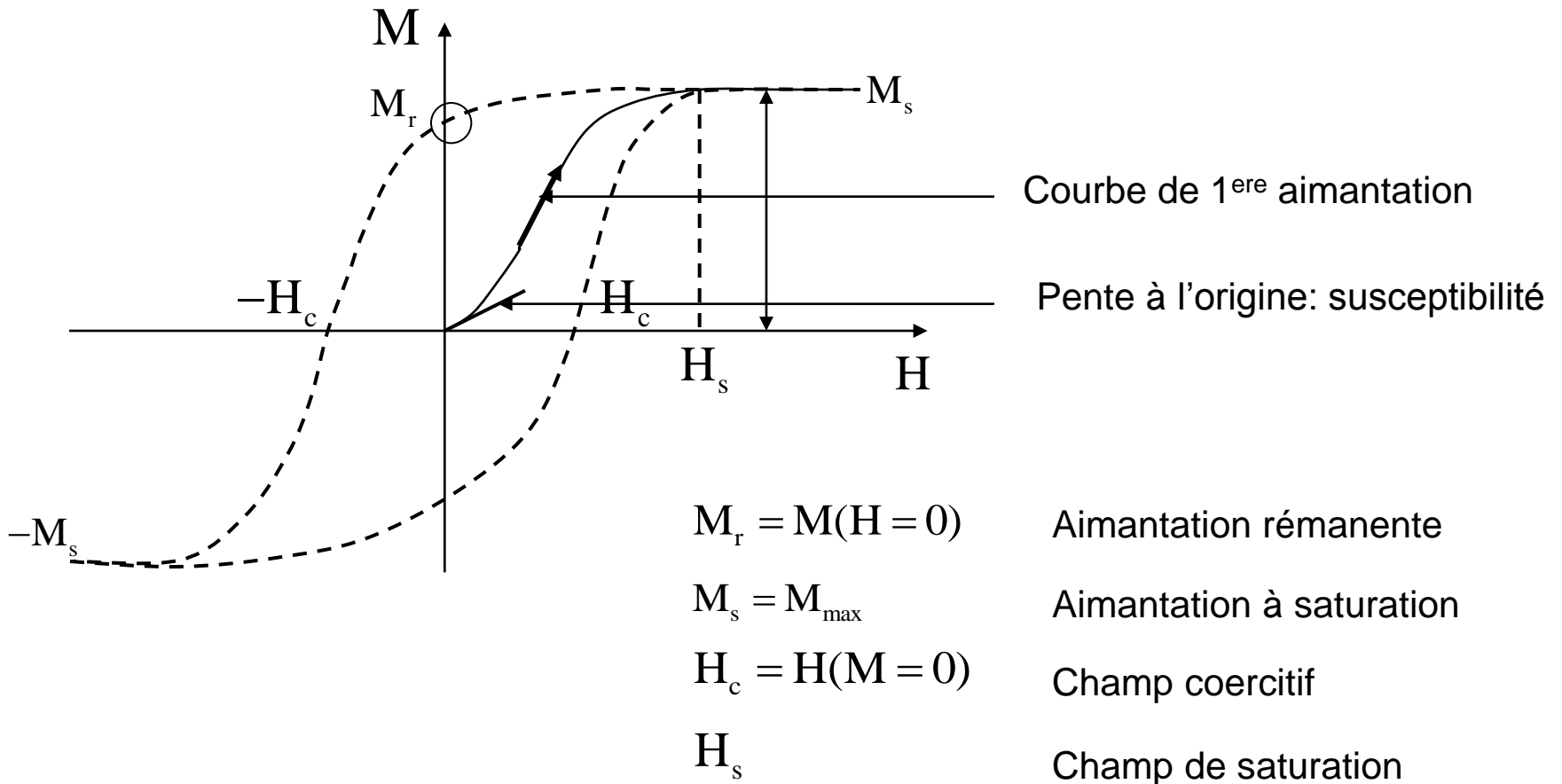
$$\chi = \begin{cases} \frac{C}{T} & \text{si « vrai » paramagnétique} \\ & \text{(sans interaction)} \\ \frac{C}{T - \theta} & \text{si il existe des interactions} \\ & \text{(ferro, ferri antiferro etc.)} \end{cases}$$



6) Magnétisme des solides

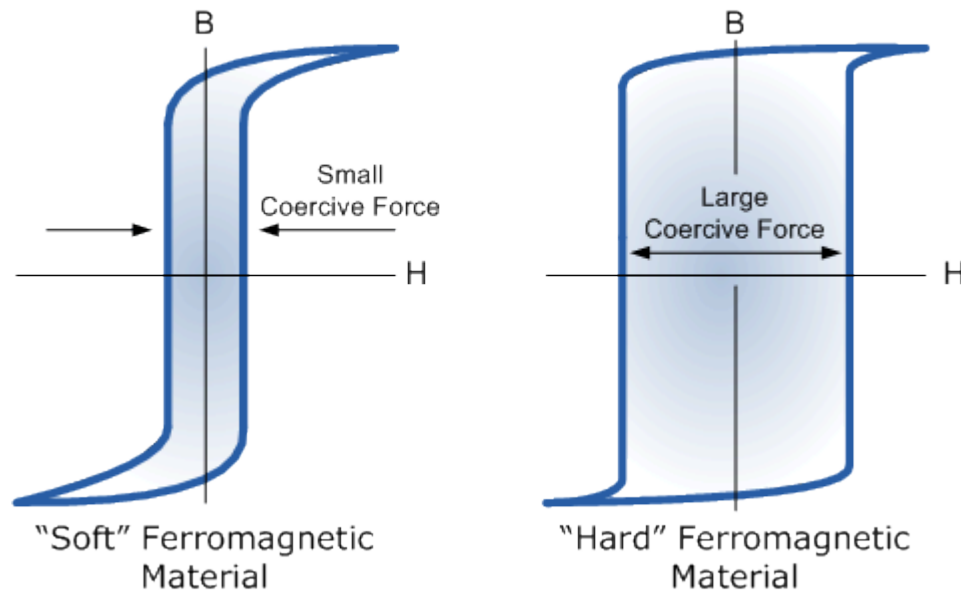
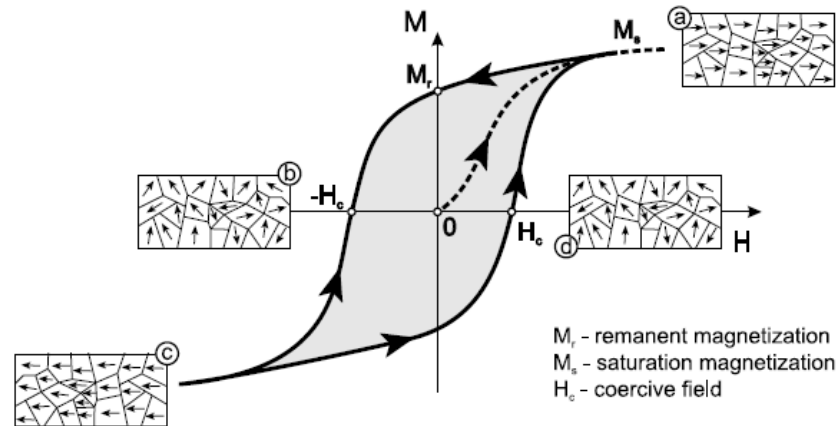
Ferromagnétisme

$T < T_c$ Aimantation spontanée non nulle



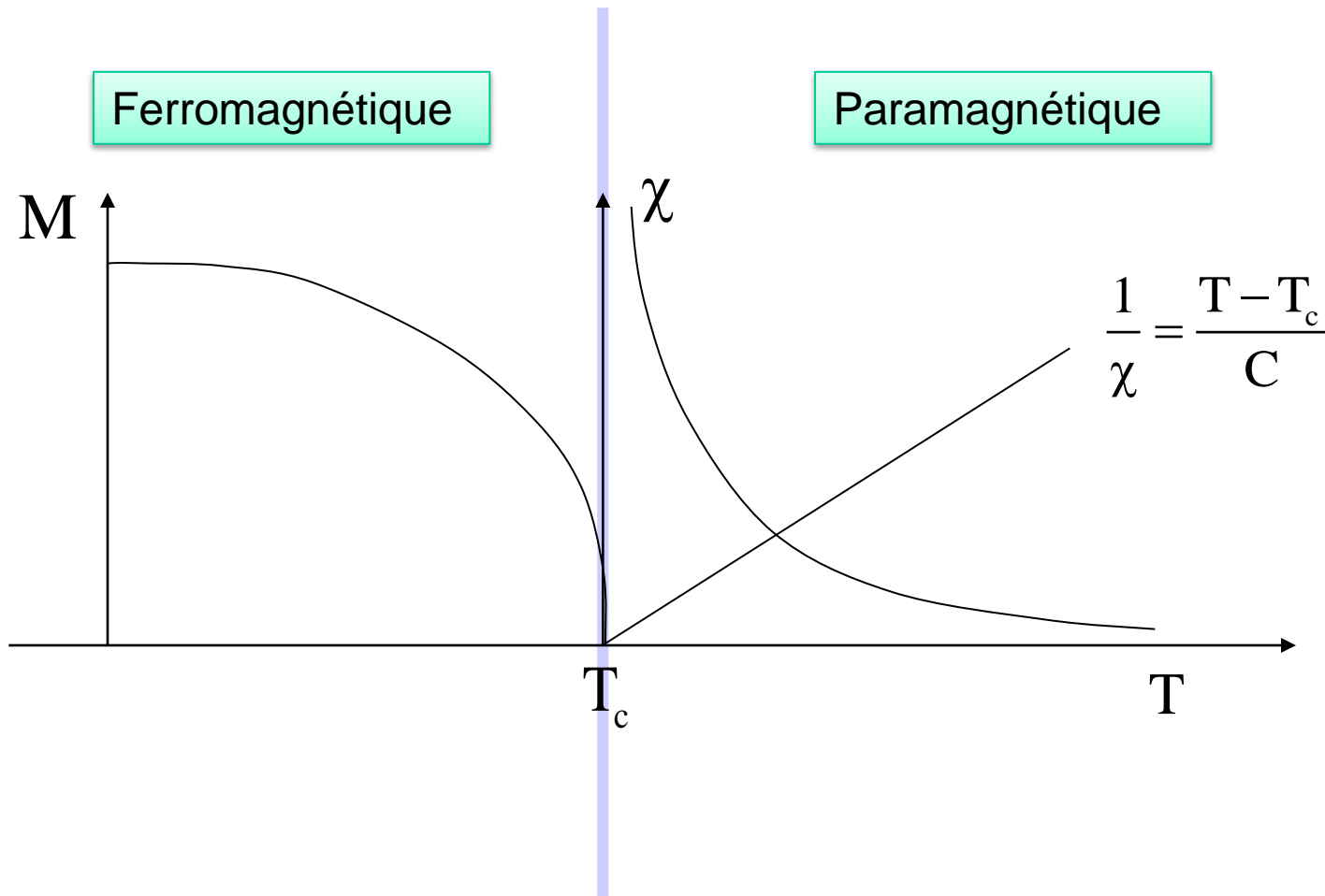
6) Magnétisme des solides

Ferromagnétisme



6) Magnétisme des solides

Ferromagnétisme

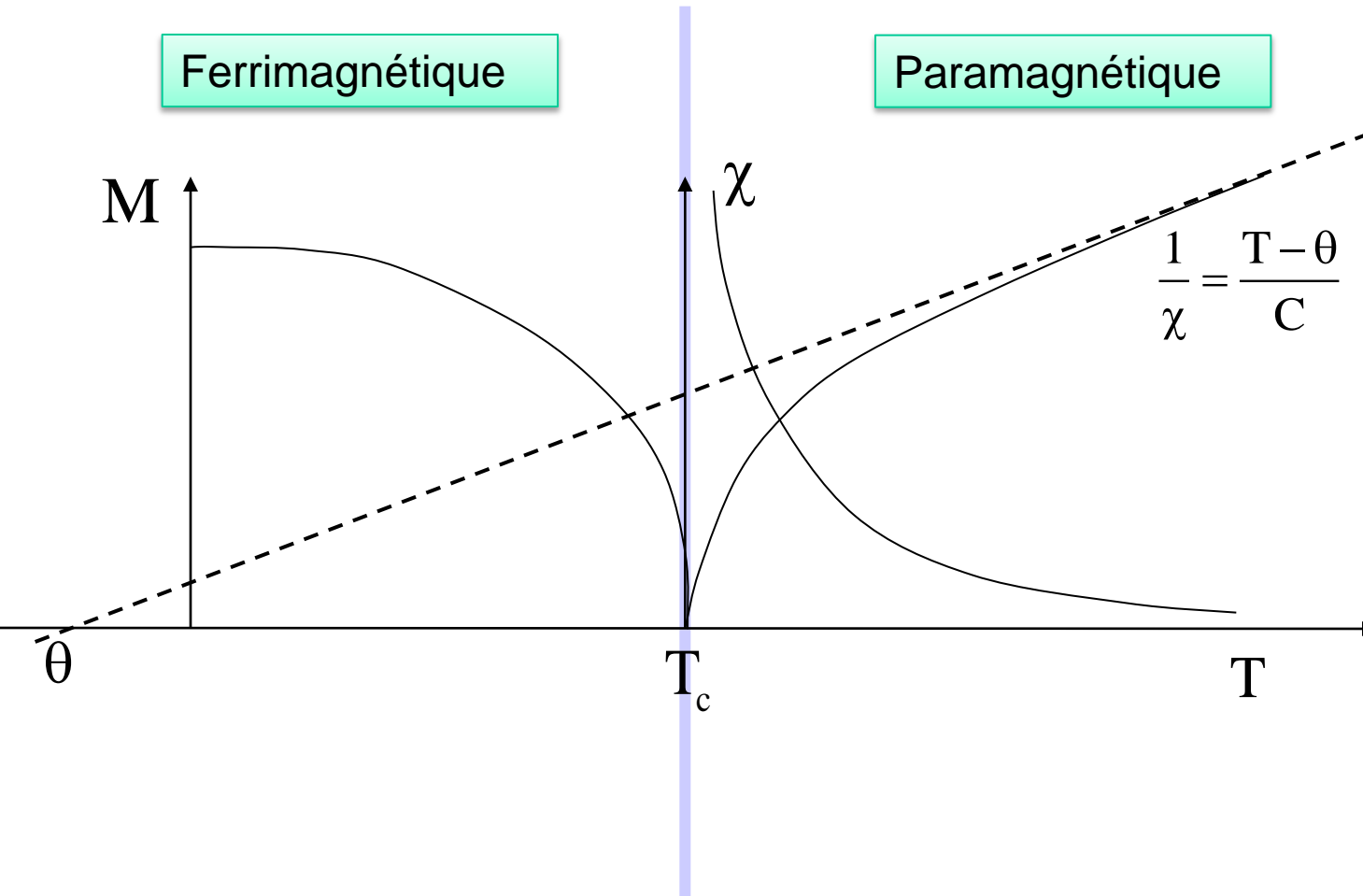


6) Magnétisme des solides

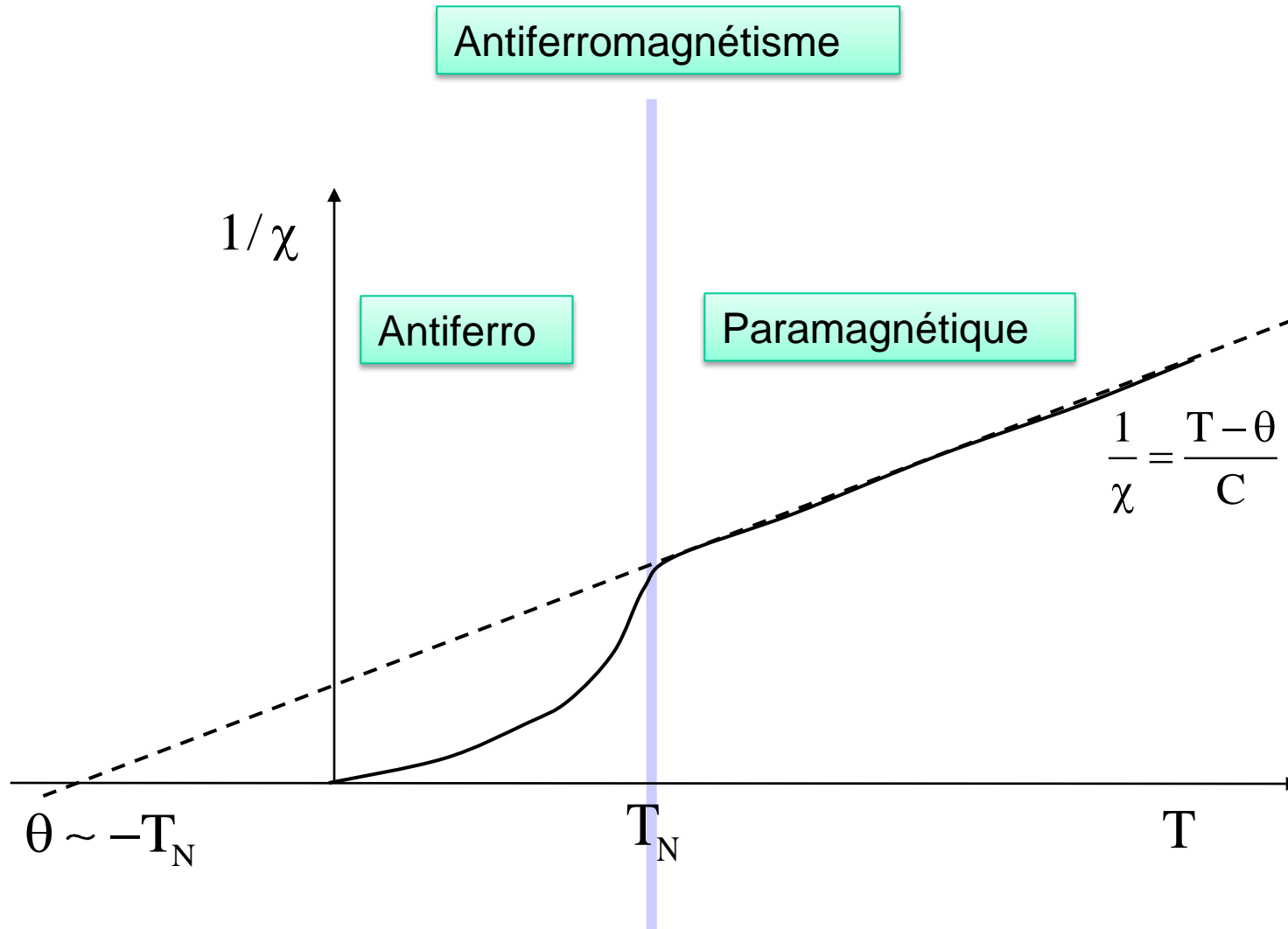
Ferrimagnétisme ~ Ferromagnétisme

Ferrimagnétique

Paramagnétique



6) Magnétisme des solides



6) Magnétisme des solides

Tableau récapitulatif

type	$\chi=f(M)$	$\chi=f(T)$	hystérésis	matériau	χ
diamagnétique	NON	NON	NON	eau	$-0,910^{-5}$
paramagnétique	NON	OUI	NON	aluminium	$2 \cdot 10^{-5}$
ferromagnétique	OUI	OUI	OUI	fer	3000
antiferromagnétique	OUI	OUI	OUI	chrome	$\sim 10^{-2}$
ferrimagnétique	OUI	OUI	OUI	Ferrite Fe_3O_4	~ 1000

6) Magnétisme des solides

Très peu d'éléments simples sont magnétiques en phase solide

	1A 1																		8A 18	
Core	1 H 1s ¹	2A 2																	2 He 1s ²	
[He]	3 Li 2s ¹	4 Be 2s ²																		
[Ne]	11 Na 3s ¹	12 Mg 3s ²	3B 3	4B 4	5B 5	6B 6	7B 7	8 8	9 9	10 10	1B 11	2B 12	13 Al 3s ² 3p ¹	14 Si 3s ² 3p ²	15 P 3s ² 3p ³	16 S 3s ² 3p ⁴	17 Cl 3s ² 3p ⁵	18 Ar 3s ² 3p ⁶		
[Ar]	19 K 4s ¹	20 Ca 4s ²	21 Sc 3d ¹ 4s ²	22 Ti 3d ² 4s ²	23 V 3d ³ 4s ²	24 Cr 3d ⁵ 4s ¹	25 Mn 3d ⁵ 4s ²	26 Fe 3d ⁶ 4s ²	27 Co 3d ⁷ 4s ²	28 Ni 3d ⁸ 4s ²	29 Cu 3d ¹⁰ 4s ¹	30 Zn 3d ¹⁰ 4s ²	31 Ga 3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹	32 Ge 3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	33 As 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³	34 Se 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴	35 Br 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	36 Kr 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶		
[Kr]	37 Rb 5s ¹	38 Sr 5s ²	39 Y 4d ¹ 5s ²	40 Zr 4d ² 5s ²	41 Nb 4d ³ 5s ²	42 Mo 4d ⁵ 5s ¹	43 Tc 4d ⁵ 5s ²	44 Ru 4d ⁷ 5s ¹	45 Rh 4d ⁸ 5s ¹	46 Pd 4d ¹⁰	47 Ag 4d ¹⁰ 5s ¹	48 Cd 4d ¹⁰ 5s ²	49 In 4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹	50 Sn 4d ¹⁰ 5s ² 5p ²	51 Sb 4d ¹⁰ 5s ² 5p ³	52 Te 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴	53 I 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵	54 Xe 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶		
[Xe]	55 Cs 6s ¹	56 Ba 6s ²	71 Lu 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ²	72 Hf 4f ¹⁴ 5d ² 6s ²	73 Ta 4f ¹⁴ 5d ³ 6s ²	74 W 4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ²	75 Re 4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s ²	76 Os 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²	77 Ir 4f ¹⁴ 5d ⁷ 6s ²	78 Pt 4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s ¹	79 Au 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹	80 Hg 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ²	81 Tl 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹	82 Pb 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²	83 Bi 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³	84 Po 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴	85 At 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵	86 Rn 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶		
[Rn]	87 Fr 7s ¹	88 Ra 7s ²	103 Lr 5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ²	104 Rf 5f ¹⁴ 6d ² 7s ²	105 Db 5f ¹⁴ 6d ³ 7s ²	106 Sg 5f ¹⁴ 6d ⁴ 7s ²	107 Bh 5f ¹⁴ 6d ⁵ 7s ²	108 Hs 5f ¹⁴ 6d ⁶ 7s ²	109 Mt 5f ¹⁴ 6d ⁷ 7s ²	110	111	112		114		116				

Métaux de transition

Terres rares

Lanthanide series	57 La 5d ¹ 6s ²	58 Ce 4f ¹ 5d ¹ 6s ²	59 Pr 4f ³ 6s ²	60 Nd 4f ⁴ 6s ²	61 Pm 4f ⁵ 6s ²	62 Sm 4f ⁶ 6s ²	63 Eu 4f ⁷ 6s ²	64 Gd 4f ⁷ 5d ¹ 6s ²	65 Tb 4f ⁹ 6s ²	66 Dy 4f ¹⁰ 6s ²	67 Ho 4f ¹¹ 6s ²	68 Er 4f ¹² 6s ²	69 Tm 4f ¹³ 6s ²	70 Yb 4f ¹⁴ 6s ²
Actinide series	89 Ac 6d ¹ 7s ²	90 Th 6d ² 7s ²	91 Pa 5f ² 6d ¹ 7s ²	92 U 5f ³ 6d ¹ 7s ²	93 Np 5f ⁴ 6d ¹ 7s ²	94 Pu 5f ⁶ 7s ²	95 Am 5f ⁷ 7s ²	96 Cm 5f ⁷ 6d ¹ 7s ²	97 Bk 5f ⁹ 7s ²	98 Cf 5f ¹⁰ 7s ²	99 Es 5f ¹¹ 7s ²	100 Fm 5f ¹² 7s ²	101 Md 5f ¹³ 7s ²	102 No 5f ¹⁴ 7s ²

Metals
 Metalloids
 Nonmetals