

## 6) Magnétisme des solides

### 6.1 Origine du magnétisme

#### 6.1.1 Moment magnétique orbital de l'électron

• Traitement classique

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

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

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

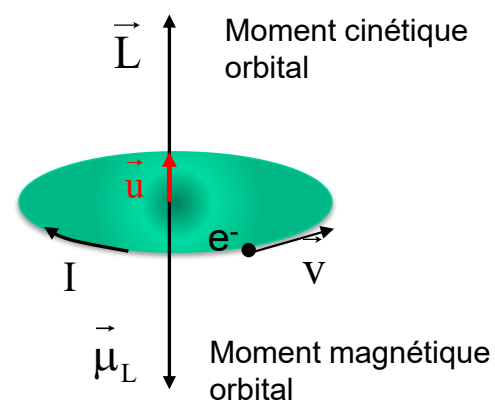
$$\vec{\mu}_L = -\frac{e}{2m} \vec{L}$$

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

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

Magnéton de Bohr

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



## 6) Magnétisme des solides

### • Traitement quantique

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

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

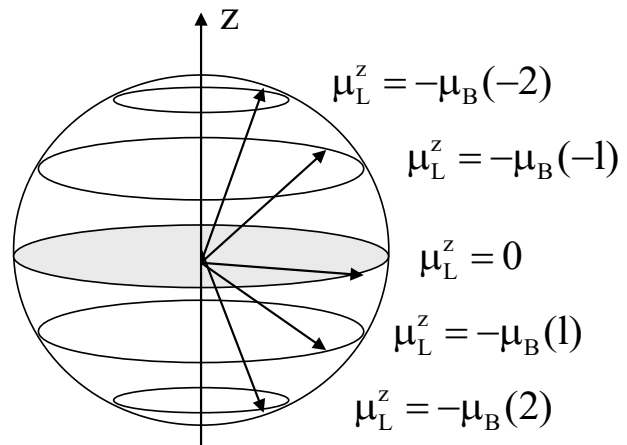
$$\vec{\mu}_L = -\mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar} = -\mu_B \vec{l}$$

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

#### 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

Matrices de Pauli

Moment cinétique de spin  $\vec{S} = \frac{\hbar}{2} \vec{\sigma}$

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

$|\uparrow\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$   $|\downarrow\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  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  $\vec{\mu}_s = -2\mu_B \vec{S} = -\mu_B \vec{\sigma}$   $\vec{S} = \frac{\hbar}{2} \vec{\sigma} = \frac{1}{2} \vec{\sigma}$   $\mu_s^z = \pm \mu_B$

$$\vec{\mu}_s = -g\mu_B \vec{S} \quad g_s = 2.002319304\dots$$

Rq: pour le proton  $\vec{\mu}_s = -g_p \mu_p \vec{S}$   $g_p = 5.585\dots$   $\mu_p = \frac{e\hbar}{2m_p} \sim \frac{\mu_B}{2000}$

## 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  $\hat{J}^2, \hat{J}_z \longrightarrow |J, M_J\rangle$

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

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

## 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:

$$\mathbf{J \ minimum} \text{ pour les couches moins qu'à moitié remplie } J = |L - S|$$

$$\mathbf{J \ maximum} \text{ pour les couches plus qu'à moitié remplie } J = L + S$$

## 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...

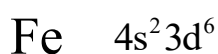
- Règle no 3

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], $4s^2 3d^1$	$\frac{4}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{2}$	-0.8	-1.2	${}^2D_{3/2}$
Ti	[Ar], $4s^2 3d^2$	$\frac{6}{2}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{4}{2}$	-0.67	-1.33	${}^3F_{2/2}$
V	[Ar], $4s^2 3d^3$	$\frac{6}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	-0.40	-0.60	${}^4F_{3/2}$
Cr*	[Ar], $4s^1 3d^5$	0   0	$\frac{1}{2}$   $\frac{5}{2}$	$\frac{1}{2}$   $\frac{5}{2}$	-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], $4s^2 3d^6$	$\frac{4}{2}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{8}{2}$	-1.5	-6.0	${}^5D_{8/2}$
Co	[Ar], $4s^2 3d^7$	$\frac{6}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{9}{2}$	-1.33	-6.0	${}^4F_{9/2}$
Ni	[Ar], $4s^2 3d^8$	$\frac{6}{2}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{8}{2}$	-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

### La tableau périodique

Quantum number  $n$

Quantum number  $l$

$l=0$   $l=1$   $l=2$   $l=3$   $l=4$   $l=5$

$n=1$  1s

$n=2$  2s 2p

$n=3$  3s 3p 3d

$n=4$  4s 4p 4d 4f

$n=5$  5s 5p 5d 5f 5g

$n=6$  6s 6p 6d 6f 6g 6h

$n=7$  7s 7p 7d 7f 7g 7h 7i

8s 8p 8d 8f 8g 8h 8i 8j

Sequence with which the orbitals fill with electrons

## 6) Magnétisme des solides

### •Moment magnétique total

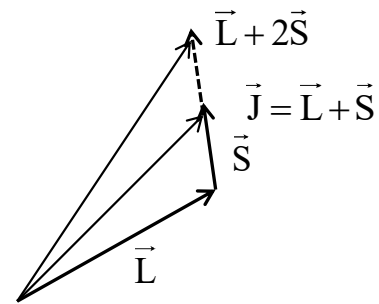
$$\vec{\mu}_{\text{tot}} = -\frac{\mu_B}{\hbar} (\vec{L} + 2\vec{S})$$

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

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

Rapport gyromagnétique

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

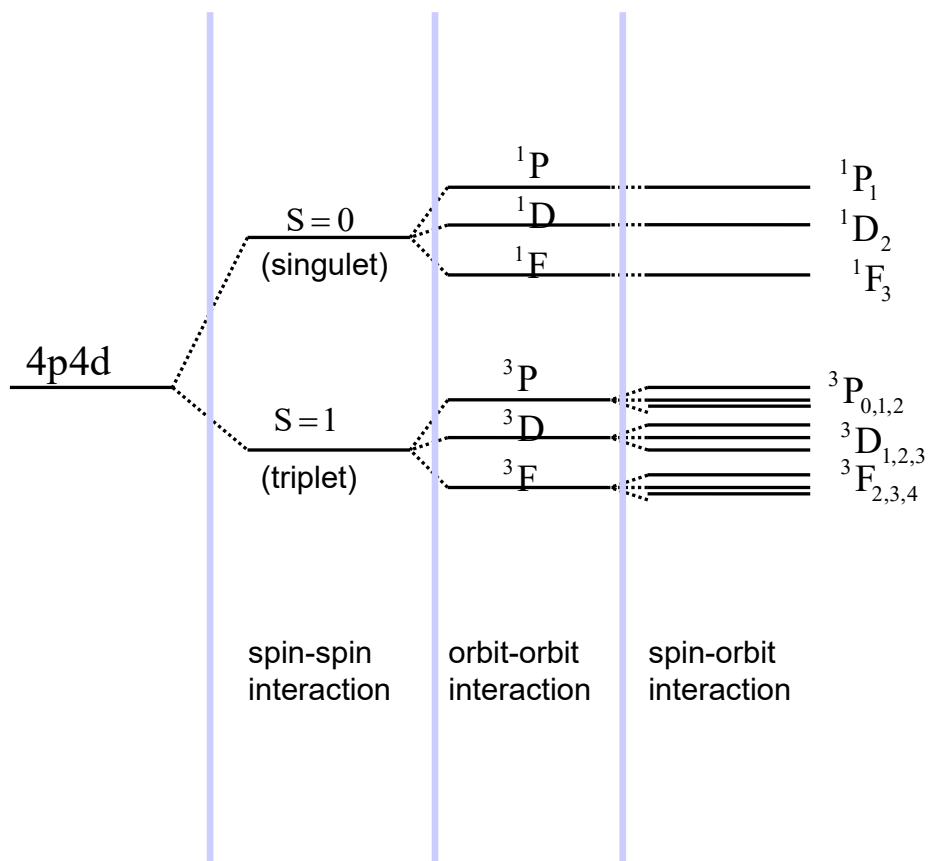


Si  $L=0$  alors  $J=S$  et  $g=2$  (se produit pour les couches  $\frac{1}{2}$  remplies)

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

### 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  $H_1 = \mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar} \cdot \vec{B} = -\vec{\mu}_L \cdot \vec{B} \quad \mu_B = -\frac{q\hbar}{2m} = \frac{e\hbar}{2m}$

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

## 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  $\Delta E_2 \ll \Delta E_1$  sauf si  $\Delta E_1 = 0$

## 6) Magnétisme des solides

### 6.2 Différents états magnétiques de la matière

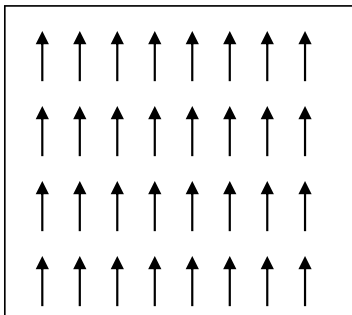
#### 6.2.1 Magnétisme microscopique et macroscopique

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

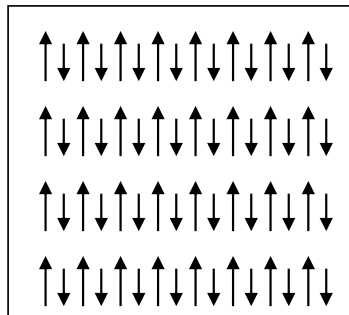
•matériau macroscopiquement aimanté

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

Ferromagnétique



Ferrimagnétique



## 6) Magnétisme des solides

- matériau macroscopiquement non aimanté

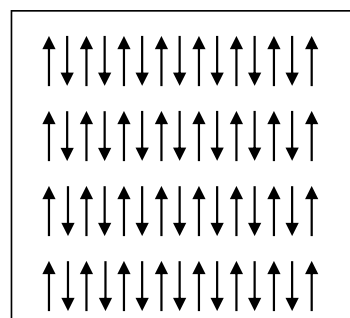
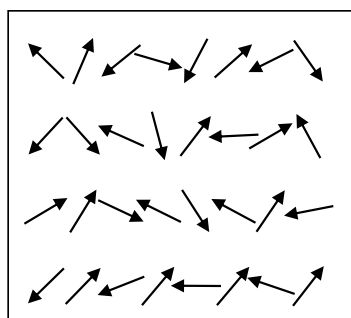
$$\vec{M} = \sum_i \vec{\mu}_i = 0$$

Non magnétique

Paramagnétique

Antiferromagnétique

$$\forall i, \vec{\mu}_i = \vec{0}$$



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

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

$\chi$  susceptibilité magnétique (sans dimension)

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

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	$\vec{H} \rightarrow (\text{A}/\text{m})$	$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$
Perméabilité du vide	$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{H}/\text{m}$	$\text{T} = \text{Wb}/\text{m}^2$ (Tesla) $\text{H} = \text{Vs}/\text{A}$ (Henry)
Aimantation	$\vec{M} \rightarrow (\text{A}/\text{m})$	$\text{J} = \text{CV}$ (Joule) $\text{Wb} = \text{Vs}$ (Weber)
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	$h/2e = 2,0678 \cdot 10^{-15} \text{Wb}$	

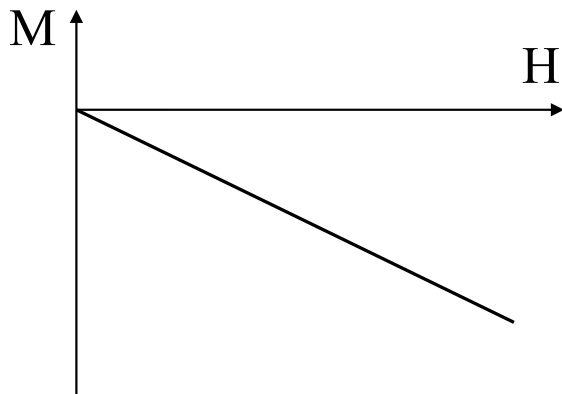
## 6) Magnétisme des solides

### 6.2.4 Les différents états magnétiques

#### diamagnétisme

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

$\chi$  indépendant de T



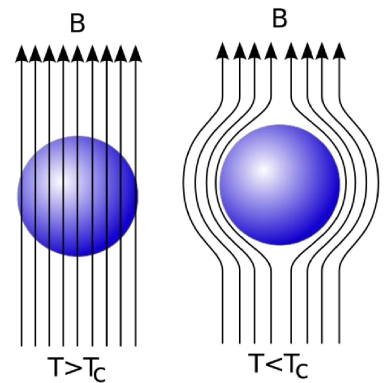
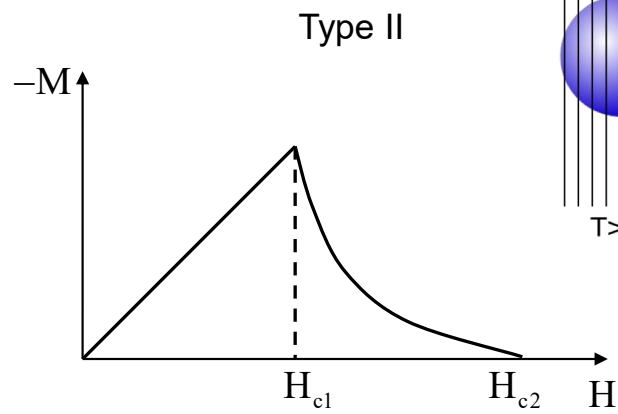
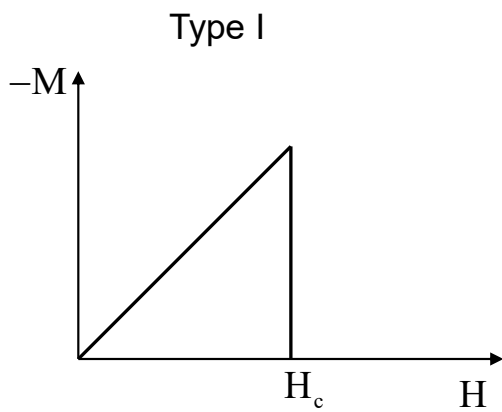
élément	$\chi$ ( $10^{-5}$ )
Cu	-1,0
Pb	-1,8
C (diam)	-2,1
Ag	-2,6
Hg	-2,9

## 6) Magnétisme des solides

Supraconducteur = diamagnétique parfait

$$\chi = -1$$

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

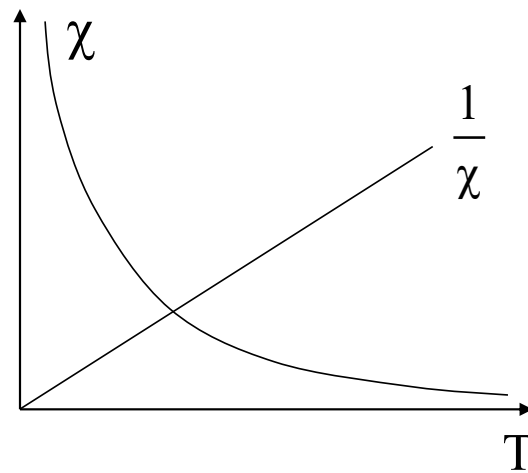
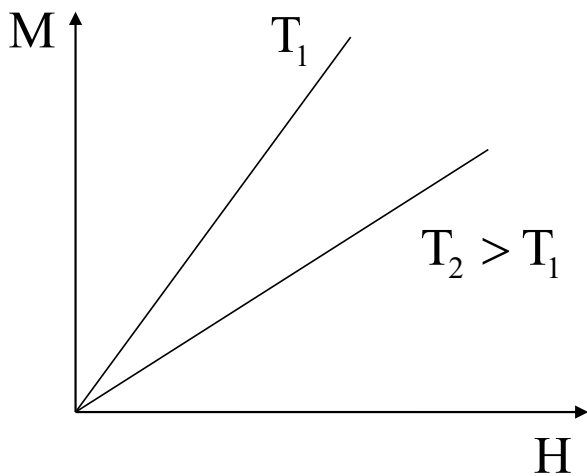


## 6) Magnétisme des solides

### Paramagnétisme

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

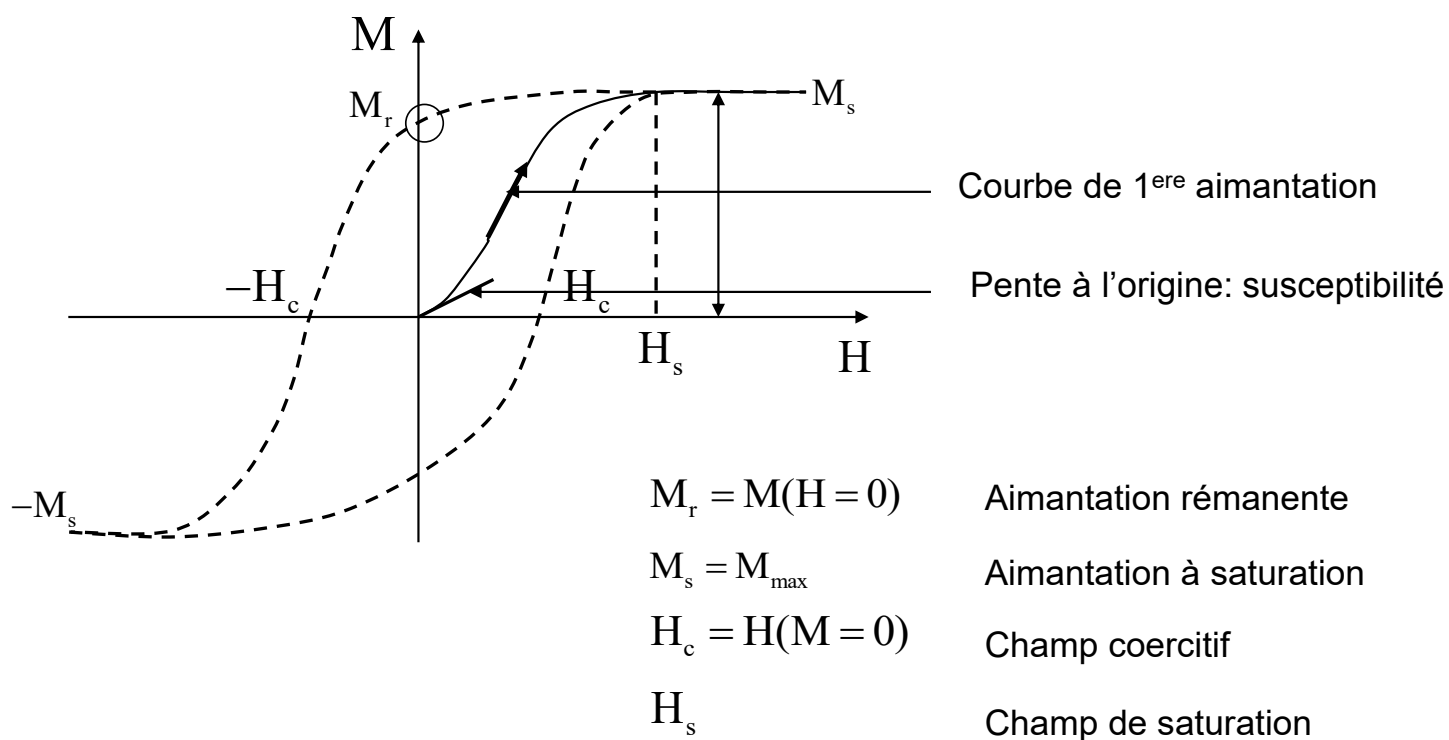
$$\chi = \begin{cases} \frac{C}{T} & \text{si « vrai » paramagnétique} \\ & \text{(sans interaction)} \\ \frac{C}{T - \theta} & \text{si il existe des interactions} \\ & \text{(ferro, ferri antiferro etc.)} \end{cases}$$



## 6) Magnétisme des solides

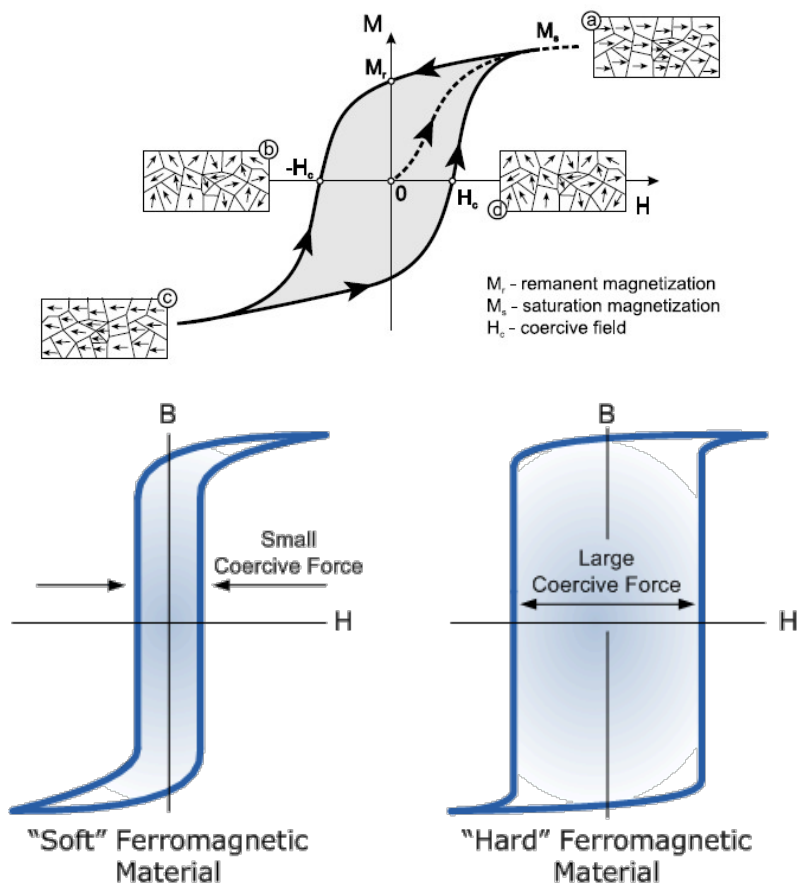
### Ferromagnétisme

$T < T_c$  Aimantation spontanée non nulle



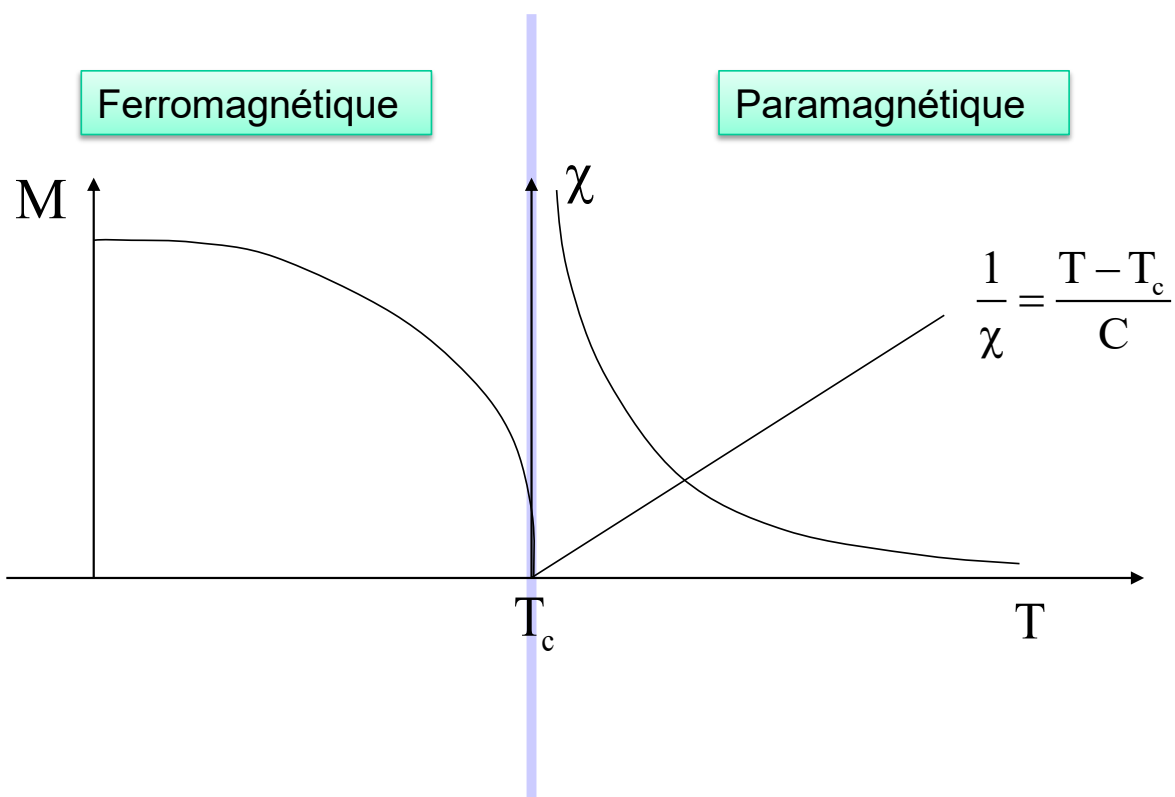
## 6) Magnétisme des solides

### Ferromagnétisme



## 6) Magnétisme des solides

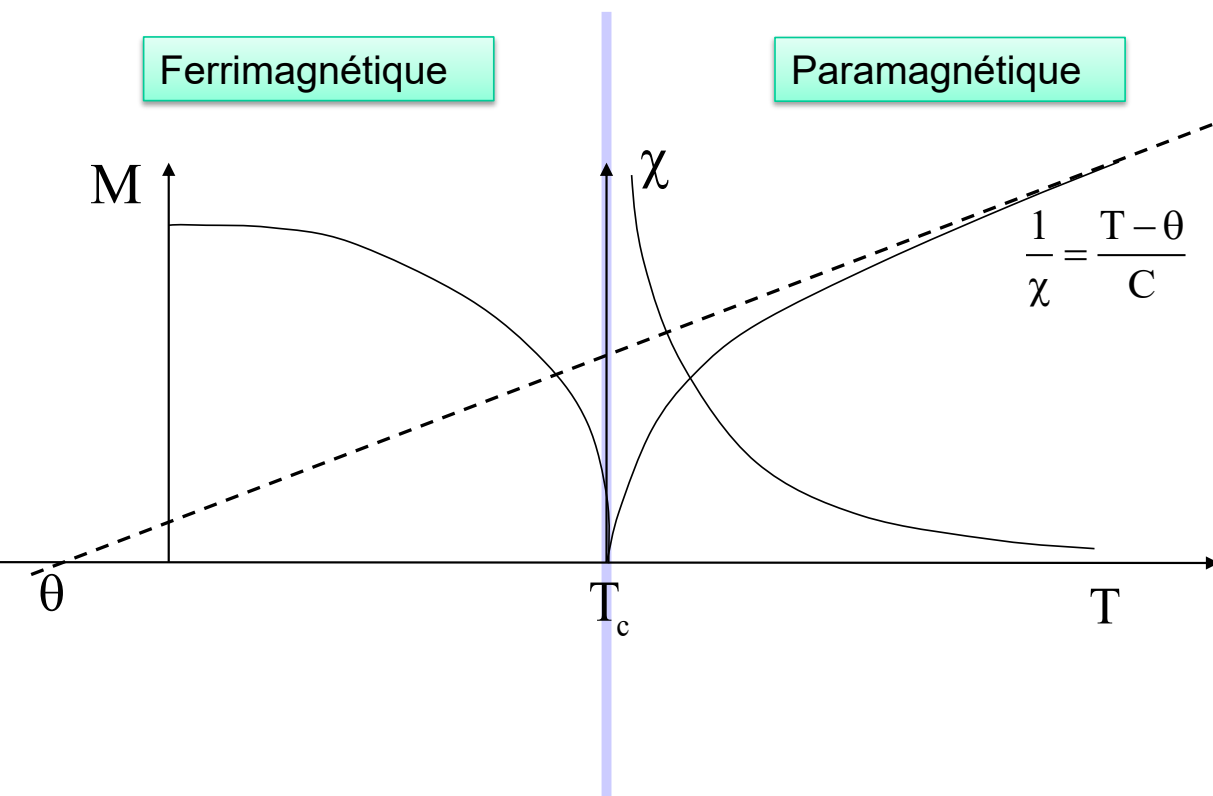
Ferromagnétisme



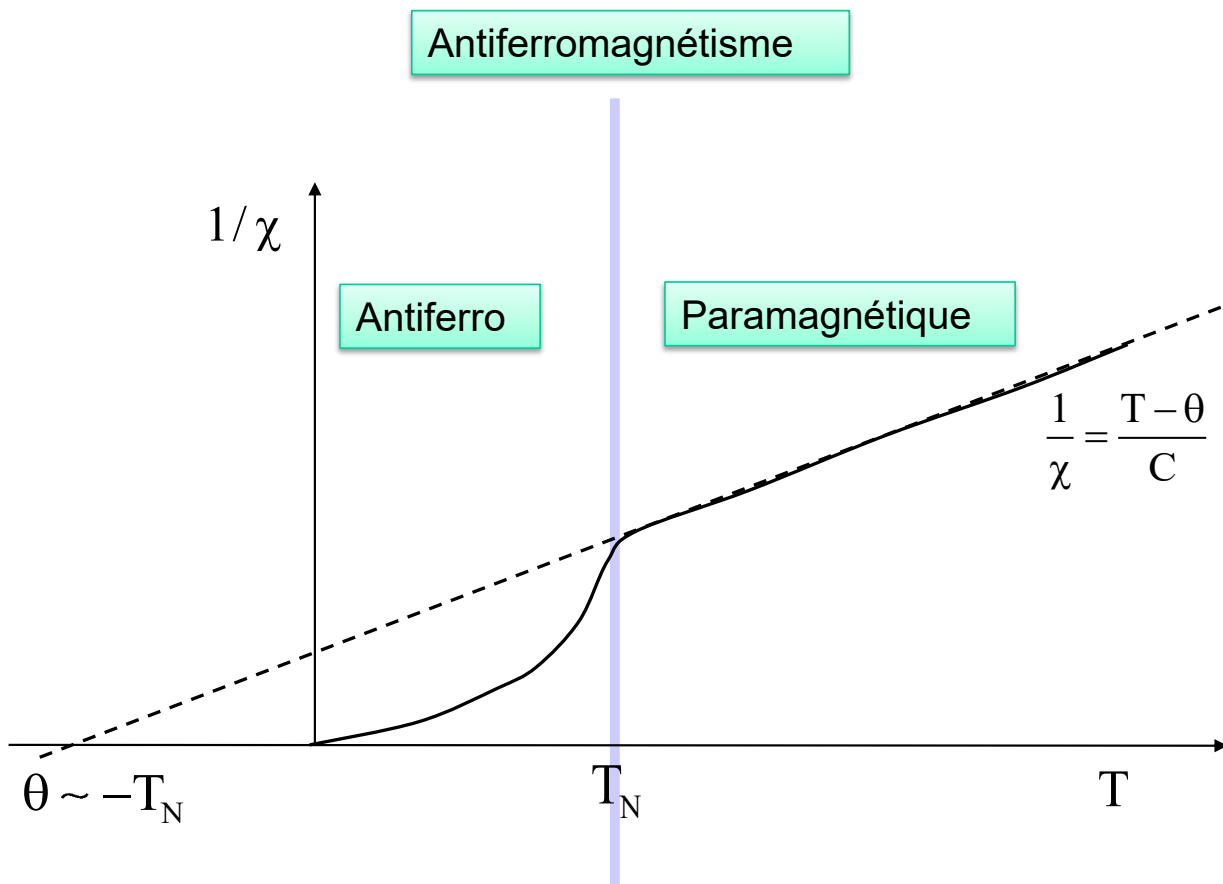


## 6) Magnétisme des solides

Ferrimagnétisme ~ Ferromagnétisme



## 6) Magnétisme des solides



## 6) Magnétisme des solides

---

Tableau récapitulatif

type	$\chi=f(M)$	$\chi=f(T)$	hystérésis	matériau	$\chi$
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 $\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\sim 1000$

## 6) Magnétisme des solides

Très peu d'éléments simples sont magnétiques en phase solide

	1A 1																					8A 18	
Core	1 H 1s <sup>1</sup>	2A 2																					2 He 1s <sup>2</sup>
[He]	3 Li 2s <sup>1</sup>	4 Be 2s <sup>2</sup>																					
[Ne]	11 Na 3s <sup>1</sup>	12 Mg 3s <sup>2</sup>	3B 3	4B 4	5B 5	6B 6	7B 7	8	9	10	1B 11	2B 12	13 Al 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>	14 Si 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>	15 P 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>	16 S 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>	17 Cl 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>	18 Ar 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>					
[Ar]	19 K 4s <sup>1</sup>	20 Ca 4s <sup>2</sup>	21 Sc 3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup>	22 Ti 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>	23 V 3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>	24 Cr 3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup>	25 Mn 3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>	26 Fe 3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>	27 Co 3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>	28 Ni 3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>	29 Cu 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	30 Zn 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>	31 Ga 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup>	32 Ge 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>	33 As 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup>	34 Se 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup>	35 Br 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup>	36 Kr 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>					
[Kr]	37 Rb 5s <sup>1</sup>	38 Sr 5s <sup>2</sup>	39 Y 4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup>	40 Zr 4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup>	41 Nb 4d <sup>3</sup> 5s <sup>2</sup>	42 Mo 4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup>	43 Tc 4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup>	44 Ru 4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup>	45 Rh 4d <sup>8</sup> 5s <sup>1</sup>	46 Pd 4d <sup>10</sup>	47 Ag 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	48 Cd 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>	49 In 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup>	50 Sn 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup>	51 Sb 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup>	52 Te 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup>	53 I 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup>	54 Xe 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>					
[Xe]	55 Cs 6s <sup>1</sup>	56 Ba 6s <sup>2</sup>	71 Lu 4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	72 Hf 4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup>	73 Ta 4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>	74 W 4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	75 Re 4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>	76 Os 4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	77 Ir 4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	78 Pt 4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup>	79 Au 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup>	80 Hg 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	81 Tl 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup>	82 Pb 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>	83 Bi 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup>	84 Po 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup>	85 At 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup>	86 Rn 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup>					
[Rn]	87 Fr 7s <sup>1</sup>	88 Ra 7s <sup>2</sup>	103 Lr 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	104 Rf 5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>	105 Db 5f <sup>14</sup> 6d <sup>3</sup> 7s <sup>2</sup>	106 Sg 5f <sup>14</sup> 6d <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup>	107 Bh 5f <sup>14</sup> 6d <sup>5</sup> 7s <sup>2</sup>	108 Hs 5f <sup>14</sup> 6d <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>	109 Mt 5f <sup>14</sup> 6d <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	110	111	112		114		116							
[Xe]	Lanthanide series		57 La 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	58 Ce 4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	59 Pr 4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>	60 Nd 4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	61 Pm 4f <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>	62 Sm 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	63 Eu 4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	64 Gd 4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	65 Tb 4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup>	66 Dy 4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	67 Ho 4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup>	68 Er 4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup>	69 Tm 4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup>	70 Yb 4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>							
[Rn]	Actinide series		89 Ac 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	90 Th 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>	91 Pa 5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	92 U 5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	93 Np 5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	94 Pu 5f <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>	95 Am 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	96 Cm 5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	97 Bk 5f <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup>	98 Cf 5f <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>	99 Es 5f <sup>11</sup> 7s <sup>2</sup>	100 Fm 5f <sup>12</sup> 7s <sup>2</sup>	101 Md 5f <sup>13</sup> 7s <sup>2</sup>	102 No 5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup>							
			Metals	Metalloids	Nonmetals																		

Métaux de transition

Terres rares