

LP-45 : Paramagnétisme, ferromagnétisme,  
approximation du champ moyen

2019-2020

## Rappel sur l'aimantation

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad \text{et} \quad \mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \frac{\mathbf{M}(1 + \chi_m)}{\chi_m} \leftrightarrow \mathbf{M} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \frac{\chi_m}{1 + \chi_m}$$

Pour les corps paramagnétiques,  $\chi_m \ll 1$  :

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \chi_m$$

## Ordres de grandeur de la susceptibilité magnétique

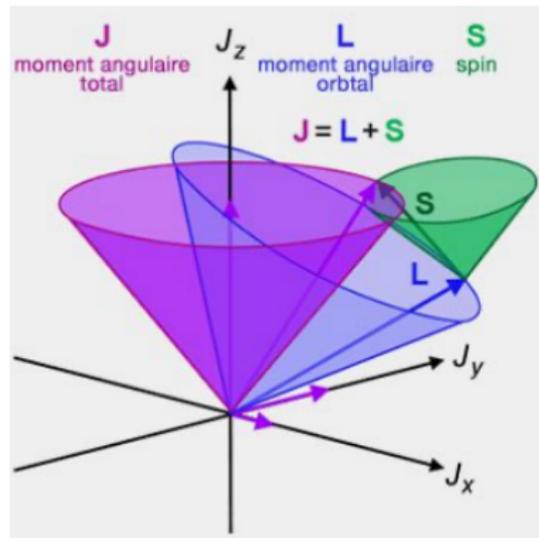
Type de matériau	Ordre de grandeur de $\chi_m$
Diamagnétique	$10^{-5}$
Paramagnétique	$10^{-2}$
Ferromagnétique	$10^2$ à $10^6$

Table 1: Ordres de grandeur de la susceptibilité magnétique

# Interaction électrostatique et spin orbite

- ▶ L lié au moment cinétique orbital total :  $L = \sum_{i=1}^n l_i$
- ▶ S lié au moment cinétique de spin total :  $S = \sum_{i=1}^n s_i$
- ▶ J est lié au moment cinétique total :

$$J = \sum_{i=1}^n j_i = \sum_{i=1}^n (l_i + s_i)$$



## Quantification du moment magnétique de l'atome : Exemple avec l'oxygène

- ▶  $n = 2 \rightarrow l = 0, 1$
- ▶  $M_L = \sum_{i=1}^n m_l \rightarrow L = 0$
- ▶  $m_s = \pm 1/2$  et  $M_S = \sum_{i=1}^n m_s = -1, 0, +1$   
 $\rightarrow S = 1 \rightarrow S_z = M_S \hbar \rightarrow S_z = -\hbar, 0, \hbar$

Ainsi comme  $\mathbf{J} = \mathbf{S} + \mathbf{L}$  et  $\mathbf{L} = \mathbf{0}$  on a  $\mathbf{J} = \mathbf{S}$

# Fonction de Brillouin

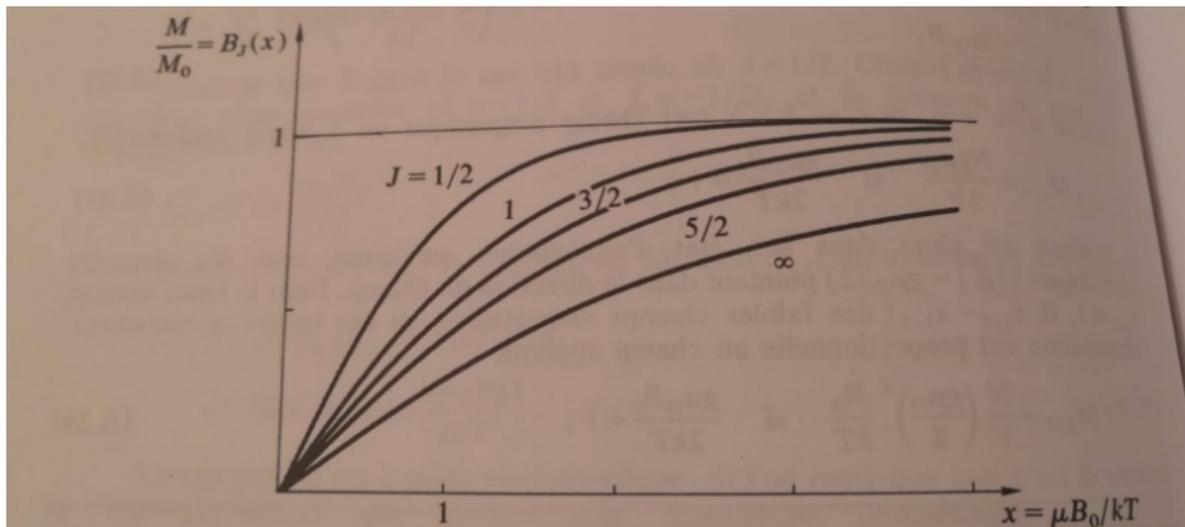


FIGURE 1

Aimantation d'un paramagnétique, rapportée à sa valeur maximum  $M_0 = N\mu/V$ , en fonction du paramètre  $\mu B_0/kT$  pour plusieurs valeurs de  $J$ . On notera que  $B_{1/2}(x) \equiv \text{th } x$  et  $B_\infty(x) \equiv \mathcal{L}(x) \equiv \coth x - 1/x$ .

Figure 1: fonction de Brillouin

# Origine microscopique du ferromagnétisme

Élément ferromagnétique	Température de Curie (K)
Fe	1043
Co	1388
Ni	627

Table 2: Température de Curie de plusieurs éléments ferromagnétiques

- ▶ Comparé au 0,6 K trouvé auparavant, cela prouve que les interactions dipolaires entre les moments magnétiques de l'atome sont insuffisantes pour expliquer le ferromagnétisme.

# Origine microscopique du ferromagnétisme

[Chap. 8] Ferromagnétisme

191

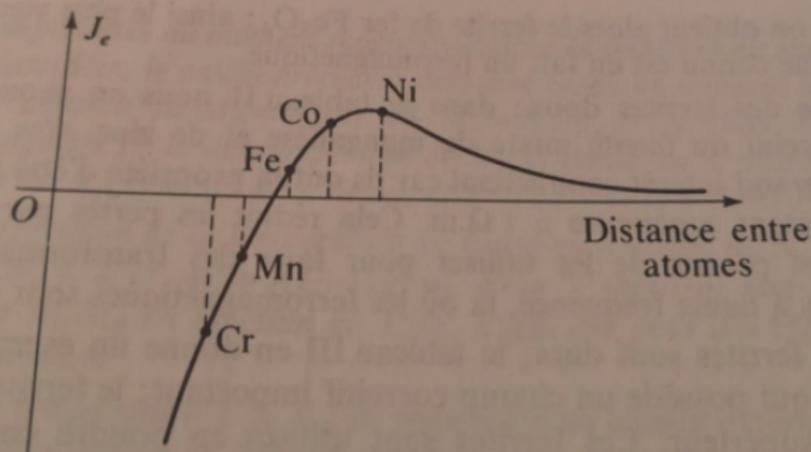


Fig. 13. L'intégrale d'échange  $J$  est positive pour les ferromagnétiques.

Figure 2: Intégrales d'échange pour les matériaux ferromagnétiques

## Résolution de l'équation d'auto cohérence

On a :

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2}ng\mu_B th \left( \frac{g\mu_B}{2k_B T} \lambda \mathbf{M} \right)$$

Soit  $\mathbf{M}_\infty$  l'aimantation maximale (à saturation) :

$$\mathbf{M}_\infty = \frac{1}{2}ng\mu_B$$

On note :

$$\frac{\mathbf{M}}{\mathbf{M}_\infty} = th \left( \frac{g\mu_B}{2k_B T} \lambda \mathbf{M} \right) = th \left( \frac{\rho J_e \hbar^2}{2k_B T ng\mu_B} \mathbf{M} \right)$$

## Résolution de l'équation d'auto cohérence

On la résout graphiquement en traçant :

$$\frac{M}{M_{\infty}} = th(x)$$

et

$$\frac{M}{M_{\infty}} = \frac{4k_B T}{\rho J_e} x$$

avec :  $x = \frac{\rho J_e \hbar^2}{2k_B T n g \mu_B}$

# Résolution de l'équation d'auto cohérence

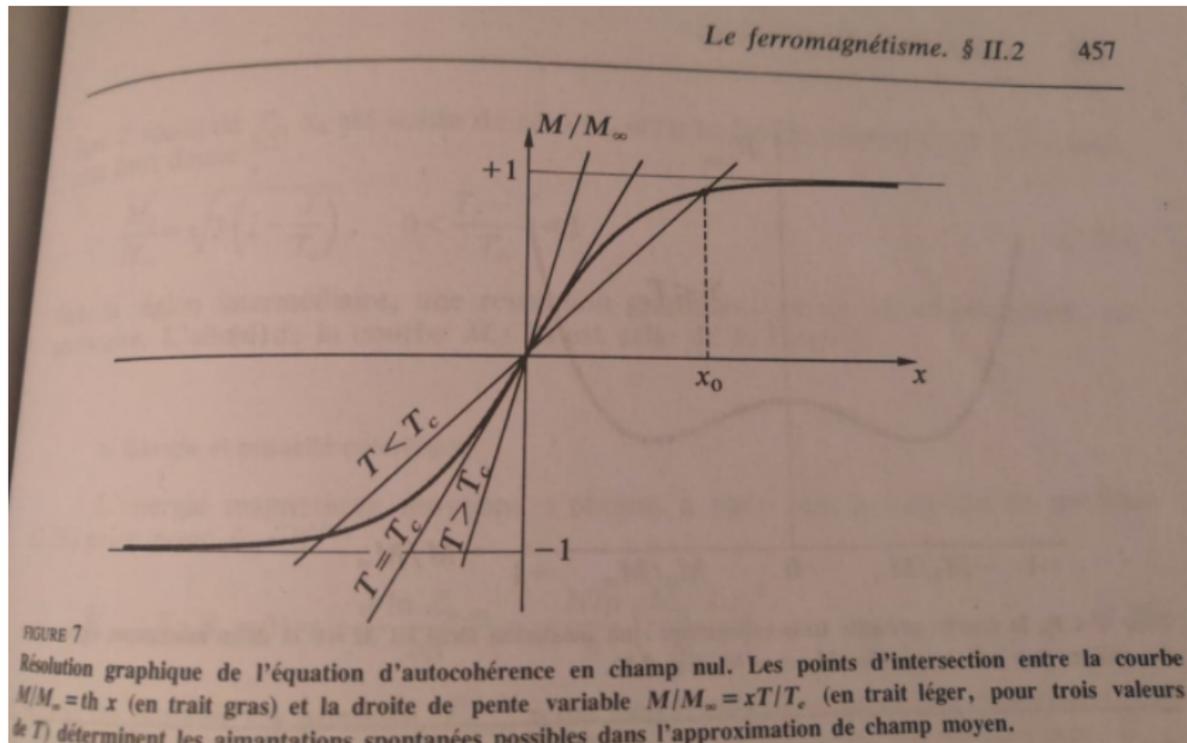


Figure 3: Résolution graphique de l'équation d'auto-cohérence