MASTER PHYSIQUE APPLIQUEE ET INGENIERIE PHYSIQUE (PAIP)

Semestre 8 : 2019-2020

Module : Magnétisme dans les solides / Nanomagnétisme
Epreuve du magnétisme dans les solides
Session ordinaire : 16 juillet 2020
Corrigé

==

I-

1) Le paramagnétisme résulte de l’orientation des moments magnétiques microscopiques permanents dans le matériau, sous l’action d’un champ magnétique appliqué.

2)

2.1 L'énergie magnétostatique d'un dipôle magnétique de moment $\vec{«}$ dans un champ magnétique $\vec{B}_0$ est donnée par la relation suivante :

$$¶ = -\vec{«}.\vec{B}_0$$

Dans le cas où seules deux orientations, parallèle et antiparallèle au champ, sont possibles et où les interactions entre dipôles sont négligées on :

- dipôle parallèle à $\vec{B}_0$: $¶_1 = -«_B B_0$

- dipôle antiparallèle à $\vec{B}_0$: $¶_2 = «_B B_0$

2.2 Population des deux niveaux d’énergie :

A l'équilibre thermodynamique, les dipôles obéissent à la statistique de Maxwell-Boltzmann, le nombre de populations des niveaux d'énergies $¶_1$ et $¶_2$ sont donnés par :

$$N_1 = A\exp(-¸_1/kT) = A\exp(«_B B_0/kT)$$

$$N_2 = A\exp(-¸_2/kT) = A\exp(-«_B B_0/kT)$$

Comme il n'y a que deux états possibles, en appelant N* le nombre de dipôles par unité de volume on a aussi:

$$N_1 + N_2 = N*$$

on en déduit:

$$N_1 = \frac{N*.e^x}{e^x + e^{-x}} \;;\; N_2 = \frac{N*.e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \;; \quad \text{avec } x = «_B B_0/kT$$

2.3 Aimantation du milieu

Le vecteur aimantation $\vec{M}$ est alors : $\vec{M} = (N_1 - N_2)\vec{«} = N*.\text{th}x.\vec{«}$

a- Cas où $«_B B_0 << kT$; $x << 1$; $th(x) \approx x$,

$$M = N*.x.«_B = N*.\frac{«_B^2 B_0}{k.T}$$

b- Cas où $\mu_B B_0 >> \mathrm{kT}$; $x >> 1$; $th(x) \approx 1$,

$$\mathrm{M} = \mathrm{N}^* . \mu_B$$

Cette expression représente l'aimantation de saturation.

2.4 Susceptibilité magnétique du milieu dans le cas a) qui correspond au domaine de validité de la loi de Curie

On est dans le cas $x << 1$, donc :

$$\mathrm{M} \approx \frac{\mu_B^2 \mathrm{N}^* B_0}{\mathrm{kT}} = \frac{\mu_0 \mu_B^2 \mathrm{N}^*}{\mathrm{kT}} \mathrm{H} = \chi_m \mathrm{H}$$

Soit,

$$\chi_m = \frac{\mu_0 \mu_B^2 \mathrm{N}^*}{\mathrm{kT}}$$

On retrouve la loi de Curie en $\chi_m = \dfrac{\mathrm{C}}{\mathrm{T}}$, avec $C = \dfrac{\mu_0 \mu_B^2 \mathrm{N}^*}{\mathrm{k}}$

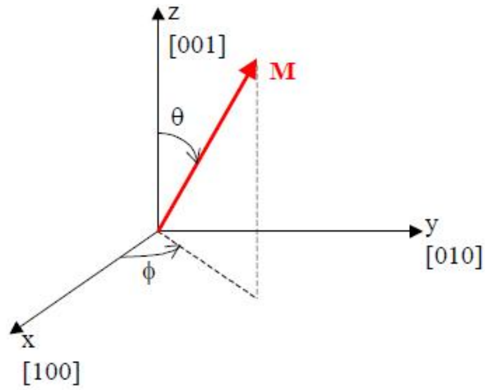
II-Anisotropie magnéto-cristalline

1. Densité d'énergie de l'anisotropie magnéto-cristalline :

$$\mathrm{E_{mc}} = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2$$

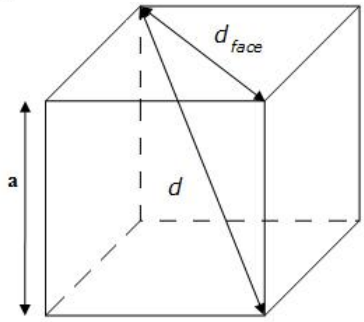
2. Cas du Nickel dont la structure est cubique de paramètre cristallin **a** et de constantes d'anisotropie $k_1 = -0.55.10^4$ J/m^3 et $k_2 = -0.24.10^3$ J/m^3

$$\begin{cases} \alpha_1 = \sin\theta \cos\varphi \\ \alpha_2 = \sin\theta \sin\varphi \\ \alpha_3 = \cos\theta \end{cases}$$



α_1, α_2 et α_3 sont les cosinus directeurs de l'aimantation par rapport aux axes cubiques.

$\theta = (\vec{M}, Oz)$



Longueur de la grande diagonale : $\mathrm{d} = \mathrm{a}.\sqrt{3}$

Longueur de la petite diagonale : $\mathrm{d_{face}} = \mathrm{a}.\sqrt{2}$

♦♦ Energie anisotropique suivant la diagonale [111] :

L'aimantation $\vec{\mathrm{M}}$ est suivant la grande diagonale du cube de longueur d.

$\cos\theta = \frac{a}{d} = \frac{a}{a\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$; soit $\sin\theta = \sqrt{1-\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ et $\sin\varphi = \frac{a}{d_{face}} = \frac{a}{a\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$

ce qui donne $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}$, d'où :

$$\mathrm{E}_{mc} = -0.55.10^4\left[\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2.\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2.\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2.\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2\right] - 0.24.10^3\left[\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2.\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2.\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2\right]$$

$$= -\frac{0.55.10^4}{3} - \frac{0.24.10^3}{27} = -1.839.\ \mathrm{kJ/m^3}$$

♦♦ **Energie anisotropique suivant les arêtes du cube :**

♦ Direction [001] ; l'aimantation $\vec{\mathrm{M}}$ est suivant l'axe Oz : $\theta = 0$; $\varphi = 0$; $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, $\alpha_3 = 1$

$$\mathrm{E}_{\mathrm{mc}} = 0\ \mathrm{J/m^3}$$

♦ Direction [010] ; l'aimantation $\vec{\mathrm{M}}$ est suivant l'axe Oy : $\theta = \frac{\pi}{2}$; $\varphi = \frac{\pi}{2}$; $\alpha_1 = \alpha_3 = 0$, $\alpha_2 = 1$

$$\mathrm{E}_{\mathrm{mc}} = 0\ \mathrm{J/m^3}$$

♦ Direction [100] ; l'aimantation $\vec{\mathrm{M}}$ est suivant l'axe Ox : $\theta = \frac{\pi}{2}$; $\varphi = 0$; $\alpha_2 = \alpha_3 = 0$, $\alpha_1 = 1$

$$\mathrm{E}_{\mathrm{mc}} = 0\ \mathrm{J/m^3}$$

L'énergie d'anisotropie la plus basse est suivant la direction [111], donc c'est la direction facile aimantation (la plus favorisée).