

**Science des matériaux de l'électrotechnique**

**IV Propriétés magnétiques**  
**7. Types de magnétisme**

Science des matériaux de l'électrotechnique  
F.L.S. 2009-2010, 1231F Prof. dr.ing. Florin Ciuprina

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## Structure du cours

Chapitre	Contenu
<b>I Propriétés générales des cristaux</b>	
1	<b>Corps cristallins</b> États des corps Réseaux cristallins Défauts des réseaux cristallins
2	<b>Electrons dans les cristaux</b> Modèles (classique et quantiques) de l'électron. Bandes d'énergie associées aux corps cristallins. Classification des matériaux en conducteurs, semi-conducteurs et isolants.
<b>II Conduction électrique</b>	
3	<b>Conduction électrique des métaux.</b> Conduction aux températures usuelles Supraconductivité électrique.
4	<b>Conduction électrique des semiconducteurs</b> Mécanismes de conduction. Expressions des conductivités intrinsèque et extrinsèques.
5	<b>Conduction électrique des isolants solides</b> Conduction en champs usuels (Conduction électronique, Conduction ionique). Conduction en champs intenses (Claquage des isolants solides).
<b>III Propriétés diélectriques</b>	
6	<b>Polarisation électrique</b> Types de polarisation Polarisation en champs harmoniques. Pertes diélectriques.
<b>IV Propriétés magnétiques</b>	
7	<b>Types de magnétisme</b>

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7. Types de magnétisme

- 7.1 Notions générales
- 7.2 Diamagnétisme
- 7.3 Paramagnétisme
- 7.4 Ferromagnétisme
- 7.5 Ferrimagnétisme et antiferromagnétisme

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7. Types de magnétisme

- 7.1 Notions générales
- 7.2 Diamagnétisme
- 7.3 Paramagnétisme
- 7.4 Ferromagnétisme
- 7.5 Ferrimagnétisme et antiferromagnétisme

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7.1 Notions générales

Intensité du champ magnétique:  $\mathbf{H}$  [A/m]  
 Induction magnétique:  $\mathbf{B}$  [T]

Aimantation: 
$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_i (\mathbf{m}_i)_{\Delta V}}{\Delta V}$$

$\mathbf{M} = \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_p$        $\mathbf{M}_i = \chi_m \mathbf{H}$

$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_p) = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}_p$

$\mu_r = 1 + \chi_m$        $\mu = \mu_0 \mu_r$

$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ , lorsque  $\mathbf{M}_p = 0$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7.1 Notions générales

Matériaux:

- diamagnétiques      – particules non polaires
- paramagnétiques      } particules polaires
- ferromagnétiques      }
- ferrimagnétiques      }
- antiferromagnétiques }

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7.1 Notions générales

Matériaux:

- diamagnétiques – matériaux non magnétiques
- paramagnétiques
- ferromagnétiques  $\chi_m = 10^{-6} - 10^{-2}$
- ferrimagnétiques  $\mathbf{M}_t = \chi_m \mathbf{H}$
- antiferromagnétiques

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7.1 Notions générales

Matériaux:

- diamagnétiques
- paramagnétiques
- ferromagnétiques – matériaux magnétiques
- ferrimagnétiques  $\chi_m = 10^2 - 10^6$
- antiferromagnétiques  $\mathbf{M}_t = \chi_m \mathbf{H}$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7.1 Notions générales

Champ magnétique actif (intérieur):

$$\mathbf{H}_0 = \mathbf{H} + \gamma \mathbf{M}$$

$$\gamma = \text{constante de Weiss} = \begin{cases} 10^3 - 10^4 & \text{- matériau magnétique} \\ 0 & \text{- matériau non magnétique} \end{cases}$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7. Types de magnétisme

- 7.1 Notions générales
- 7.2 Diamagnétisme
- 7.3 Paramagnétisme
- 7.4 Ferromagnétisme
- 7.5 Ferrimagnétisme et antiferromagnétisme

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7.2 Diamagnétisme

Précession Larmor pour un atome de hydrogène

$$\mathbf{m}_d = \sum_{i=1}^Z \Delta \mathbf{m}_i$$

$$\mathbf{M}_d = N \mathbf{m}_d$$

$$\chi_{md} < 0 \quad |\chi_{md}| \approx 10^{-5} \div 10^{-6}$$

$$\mathbf{M}_d = \chi_{md} \mathbf{H} \quad \text{— linéaire}$$

Matériaux diamagnétiques:  
Cu, Au, Ag, Zn, Pb, gaz nobles, etc.

Joseph Larmor (1857-1942)  
mathématicien et physicien irlandais

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7. Types de magnétisme

- 7.1 Notions générales
- 7.2 Diamagnétisme
- 7.3 Paramagnétisme
- 7.4 Ferromagnétisme
- 7.5 Ferrimagnétisme et antiferromagnétisme

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

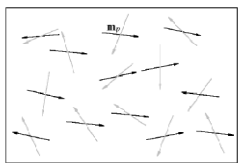
Types de magnétisme

## 7.3 Paramagnétisme

Matériaux paramagnétiques: Al, Cr, Mn, Na, etc.


$\mathbf{m}_p = \mathbf{m}_{oc} + \mathbf{m}_{spe} + \mathbf{m}_{spn}$   
 $\mathbf{m}_p \approx \mathbf{m}_{spe}$

$\xrightarrow{H_e}$

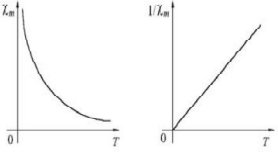


$\chi_m = \frac{\text{const}}{T}$   
 $\chi_{mp} \approx 10^{-3} \div 10^{-4}$

magnéton de Bohr-Procopiu  
 $\beta = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$



Stefan Procopiu (1890-1972), physicien roumain



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7. Types de magnétisme

- 7.1 Notions générales
- 7.2 Diamagnétisme
- 7.3 Paramagnétisme
- 7.4 Ferromagnétisme
- 7.5 Ferrimagnétisme et antiferromagnétisme

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

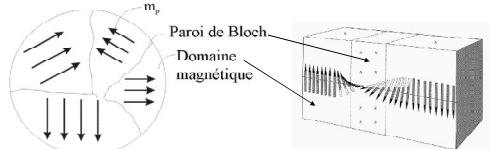
---

Types de magnétisme

## 7.4 Ferromagnétisme

Matériaux ferromagnétiques: Fe, Co, Ni, Gd, alliages.

$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$  - non linéaire  
 $\chi_m = 10^3 - 10^5$



$w = w_p \mid w'_p \mid w_A \mid w_{anis} \mid w_{mgs} \mid w'$

Pierre-Ernest Weiss (1865-1940) physicien français  
 Felix Bloch (1905-1983) physicien américain né en Suisse

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

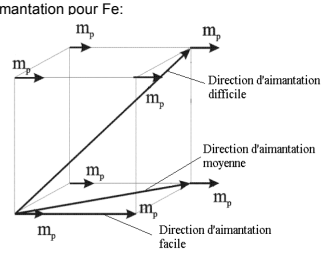
---

Types de magnétisme

## 7.4 Ferromagnétisme

**Énergie d'anisotropie:**

- $w_{aniz} \approx k' \sin^2 \beta + k'' \sin^4 \beta$
- Directions d'aimantation pour Fe:



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

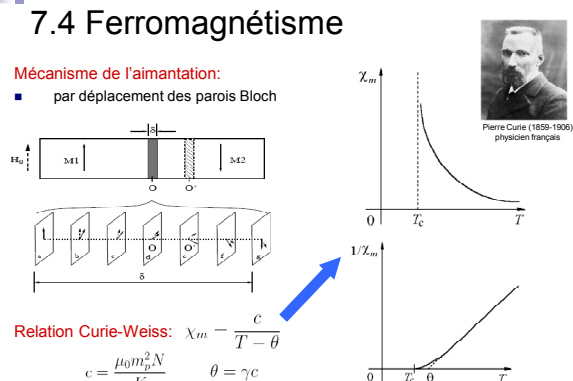
---

Types de magnétisme

## 7.4 Ferromagnétisme

**Mécanisme de l'aimantation:**

- par déplacement des parois Bloch



Pierre Curie (1859-1906)  
physicien français

**Relation Curie-Weiss:**  $\chi_m = \frac{c}{T - \theta}$

$$c = \frac{\mu_0 m_p^2 N}{K} \quad \theta = \gamma c$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

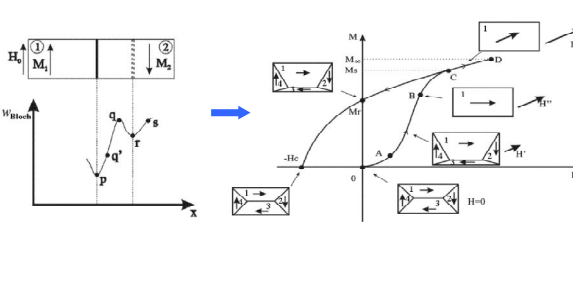
---

---

Types de magnétisme

## 7.4 Ferromagnétisme

**Déplacement des parois Bloch. Courbe d'aimantation (désaimantation)**



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7. Types de magnétisme

- 7.1 Notions générales
- 7.2 Diamagnétisme
- 7.3 Paramagnétisme
- 7.4 Ferromagnétisme
- 7.5 Ferrimagnétisme et antiferromagnétisme

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

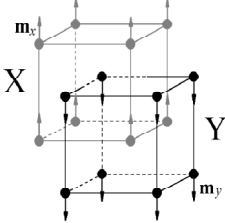
---

Types de magnétisme

## 7.5 Ferrimagnétisme et antiferromagnétisme

- Particules magnétiquement polaires
- Domaines magnétique & parois Bloch
- Moments magnétiques des atomes différents – antiparallèles dans le même dc

- $m_x \neq m_y$  – matériaux ferrimagnétiques
- $m_x = m_y$  – matériaux antiferromagnétiques



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

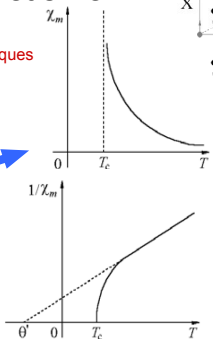
---

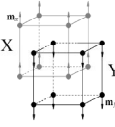
---

Types de magnétisme

## 7.5 Ferrimagnétisme et antiferromagnétisme

- $m_x \neq m_y$  – matériaux ferrimagnétiques
- $(Me_xO_yFe_2O_3)_n$
- $\chi_m = 10^2 - 10^3$
- $\chi_m = \frac{c'}{T + \theta'}$
- $\rho = 10^{-1} - 10^6 \Omega m$





Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Types de magnétisme

## 7.5 Ferrimagnétisme et antiferromagnétisme

- $m_x = m_y$  – matériaux antiferromagnétiques
- $\chi_m = 10^{-3} - 10^{-2}$

$\chi_m$  vs  $T$

$1/\chi_m$  vs  $T$

AIP  
Louis Eugene Felix Néel  
(1904-2000), physicien français

Material	Cr	Mn	MnO	MnS	FeO
$T_N$ [K]	475	100	122	165	198

Science des matériaux de l'électrotechnique, FLS, 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---