

Électromagnétisme

S21 Matériaux magnétiques

Iannis Aliferis

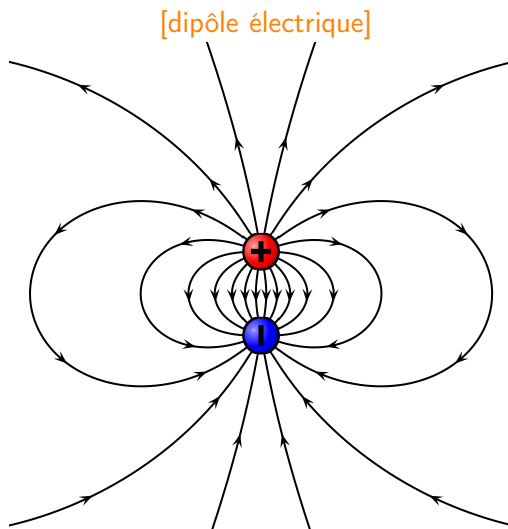
Université Nice Sophia Antipolis

Moment dipolaire magnétique	2
Dipôles : électrique et magnétique	3
Moment dipolaire magnétique	4
Dipôle dans un champ magnétique	5
Champ magnétique uniforme: alignement	6
Champ magnétique non-uniforme: déplacement	7
Dipôles magnétiques dans la matière : le vecteur aimantation	8
Vecteur aimantation	9
Courants liés à la matière	10
Courants surfaciques liés à la matière	11
Courants volumiques liés à la matière	12
Loi d'Ampère dans la matière : le champ H	13
Le champ magnétique \vec{H}	14
Milieux linéaires	15
Milieux LHI	16
Susceptibilité magnétique : quelques valeurs	17
Ferromagnétisme	18
Ferromagnétisme	19

Moment dipolaire magnétique

2

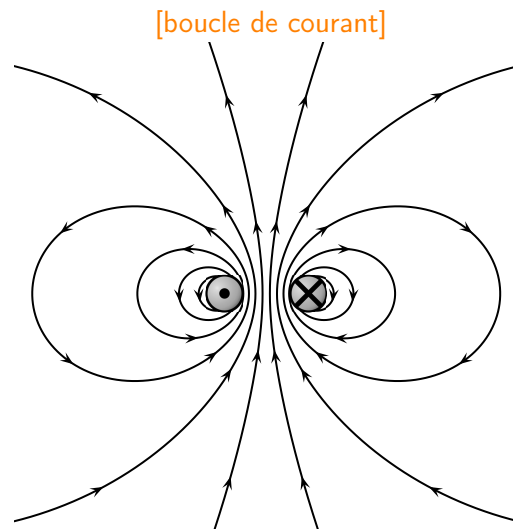
Dipôles : électrique et magnétique



Auteur : Geek3 / CC-BY-SA

$$\vec{E}(0, 0, z) \stackrel{z \gg d}{\approx} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{z^3} \hat{e}_z$$

$$\vec{p} = qd\hat{u}_{- \rightarrow +} = qd\hat{e}_z$$



Auteur : Geek3 / CC-BY-SA

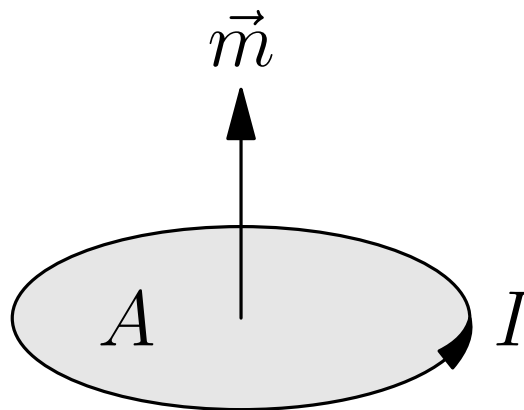
$$\vec{B}(0, 0, z) \stackrel{z \gg R}{\approx} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I\pi R^2}{z^3} \hat{e}_z$$

$$\vec{m} \triangleq I\pi R^2 \hat{e}_z$$

▼ empty

3

Moment dipolaire magnétique



Auteur : Glosser.ca / CC-BY-SA

▼ Quelle que soit la forme de la boucle

$$\vec{m} \triangleq I \int_S \hat{n} dS \stackrel{\text{surface plane}}{=} IA\hat{n} \quad (\text{A m}^2) \quad (1)$$

▼ Sens du courant / orientation de \vec{m} : règle de la main droite

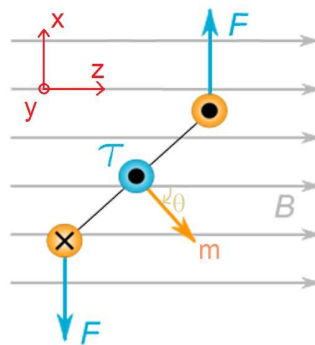
4



Dipôle dans un champ magnétique

5

Champ magnétique uniforme : alignement



Auteur : Lao Chen / GFDL

▼ Force totale [force magnétique courant]

$$\vec{F}_{\text{totale}} = \oint_{\Gamma} (I d\vec{l} \wedge \vec{B}) \stackrel{\vec{B} \text{ uniforme}}{=} I \left(\oint_{\Gamma} d\vec{l} \right) \wedge \vec{B} = \vec{0}$$

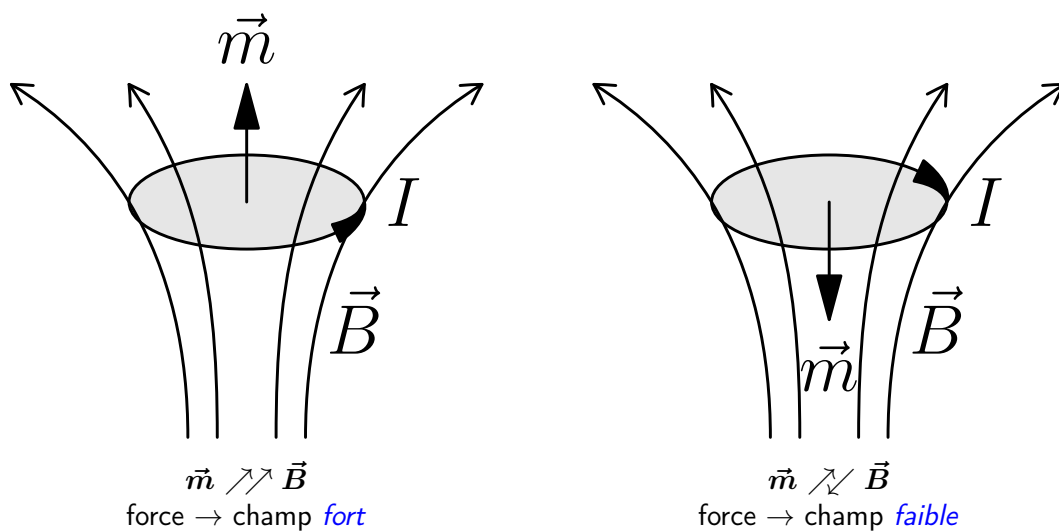
▼ Pas de déplacement

▼ Rotation : \vec{m} s'oriente dans le sens du champ magnétique

$$\text{Couple : } \vec{\tau} = \vec{m} \wedge \vec{B} \quad (2)$$

6

Champ magnétique non-uniforme : déplacement

▼ Champ \vec{B} non-uniforme : force totale $\neq 0$, « attraction » / « répulsion »

▼ Dipôle magnétique élémentaire :

$$\vec{F} = \vec{\nabla}(\vec{m} \cdot \vec{B}) = \vec{\nabla}(mB \cos \theta) \quad (3)$$

7



Dipôles magnétiques dans la matière : le vecteur aimantation

8

Vecteur aimantation

- ▼ Moments magnétiques \vec{m} dans la matière :
 - ▶ « mouvement orbital des électrons »
 - ▶ « rotation des électrons » (spin)
 - ▶ Phénomènes purement *quantiques* !
 - ▶ On continue à *imaginer* des courants microscopiques, *liés à la matière*
- ▼ Sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, les \vec{m} s'orientent :
 - ▶ *parallèlement* au champ : *paramagnétisme*
[dipôle dans un champ magnétique]
 - ▶ *contre* le champ : *diamagnétisme*
 - ▶ *parallèlement* au champ, par domaines : [ferromagnétisme] (aimants)
- ▼ Vue *macroscopique* : $\Delta\mathcal{V} \rightarrow 0$ contient $N_{\text{dip}} \approx 10^3$ dipôles !
- ▼ Vecteur aimantation \vec{M} : [vecteur polarisation]

$$\vec{M}(\vec{r}) \triangleq \lim_{\Delta\mathcal{V} \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\mathcal{V}} \sum_{i=1}^{N_{\text{dip}}} \vec{m}_i \quad (\text{A m}^2 \text{ m}^{-3} = \text{A m}^{-1}) \quad (4)$$

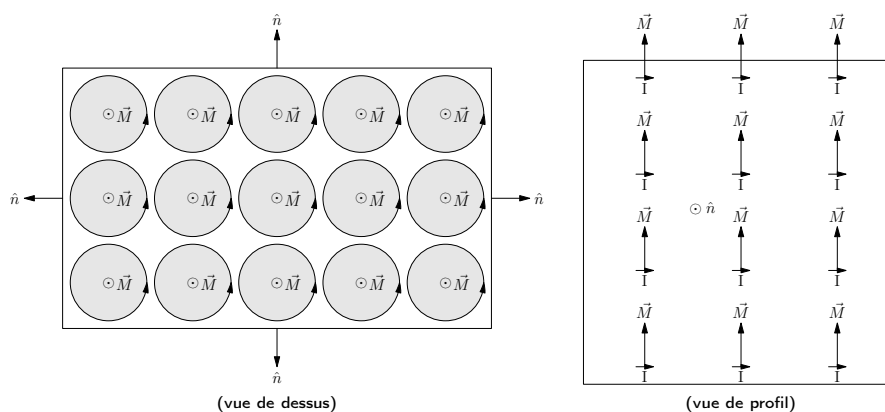
densité volumique du moment dipolaire magnétique

9

Courants liés à la matière

10

Courants surfaciques liés à la matière



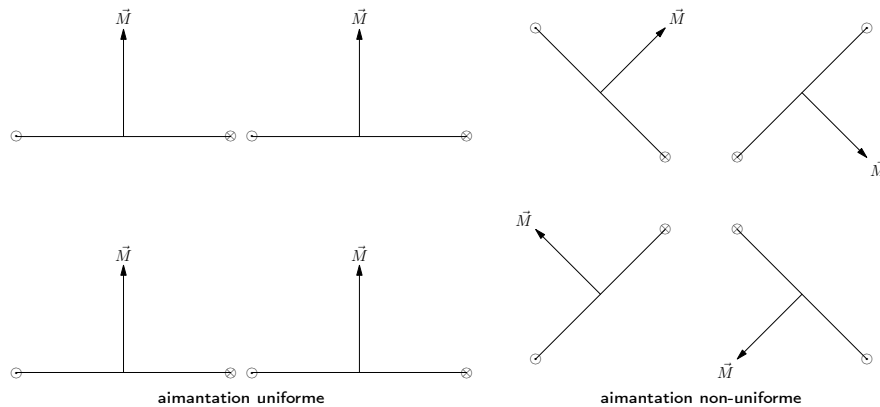
- ▼ Sur la surface

$$\vec{J}_s \text{ liés} = \vec{M} \wedge \hat{n} \quad (\text{A m}^{-1}) \quad (5)$$

11



Courants volumiques liés à la matière



▼ Dans le volume

$$\vec{J}_{\text{liés}} = \vec{\nabla} \wedge \vec{M} \quad (\text{A m}^{-2}) \quad (6)$$

\vec{J}_s liés et $\vec{J}_{\text{liés}}$ créent le champ magnétique d'aimantation (dû à \vec{M})

12

Loi d'Ampère dans la matière : le champ H

13

Le champ magnétique \vec{H}

▼ Deux types de courants :

1. « Libres » : on peut les choisir/placer etc.
2. « Liés » [courants liés à la matière]

▼ [Loi d'Ampère locale] :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J} = \mu_0 (\vec{J}_{\text{liés}} + \vec{J}_{\text{libres}}) = \mu_0 (\vec{\nabla} \wedge \vec{M} + \vec{J}_{\text{libres}})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \right) = \vec{J}_{\text{libres}}$$

$$\boxed{\vec{H} \triangleq \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M}} \quad (\text{A m}^{-1}) \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_{\text{libres}} \quad \oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot \hat{t} \, dl = \int_S \vec{J}_{\text{libres}} \cdot \hat{n} \, dS \quad (8)$$

▼ \vec{H} : « champ H » (excitation magnétique) en A m^{-1}

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \text{ donc } \vec{\nabla} \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = 0 : \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$$

14



Milieux linéaires, homogènes, isotropes : perméabilité magnétique

15

Milieux LHI

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad [\text{loi Ampère matière}]$$

▼ Linéaire :

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (9)$$

χ_m : susceptibilité magnétique

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} \triangleq \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\vec{H} \quad (10)$$

- ▼ μ : perméabilité du milieu, en H m^{-1}
- ▼ $\mu_r = 1 + \chi_m$: perméabilité relative μ/μ_0
- ▼ Homogène : μ_r ne dépend pas de \vec{r}
- ▼ Isotrope : toutes les directions sont équivalentes : μ_r est un scalaire

16

Susceptibilité magnétique : quelques valeurs

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

Matériau para-	χ_m	Matériau dia-	χ_m
Oxygène	1.9×10^{-6}	Or	-3.4×10^{-5}
Sodium	8.5×10^{-6}	Argent	-2.4×10^{-5}
Aluminium	2.1×10^{-5}	Cuivre	-9.7×10^{-6}
Tungsten	7.8×10^{-5}	Eau	-9.0×10^{-6}
Platine	2.8×10^{-4}	CO ₂	-1.2×10^{-8}
Oxygène liquide	3.9×10^{-3}	Hydrogène	-2.2×10^{-9}

- ▼ $\mu_r = 1 + \chi_m \approx 1$
- ▼ Dans un champ magnétique \vec{B} non uniforme :
[dipôle dans un champ magnétique]
 - ▶ Matériau paramagnétique : attiré vers \vec{B} fort
 - ▶ Matériau diamagnétique : repoussé vers \vec{B} faible
- ▼ Para- / dia- : $|\chi_m| \ll 1$, forces négligeables

17

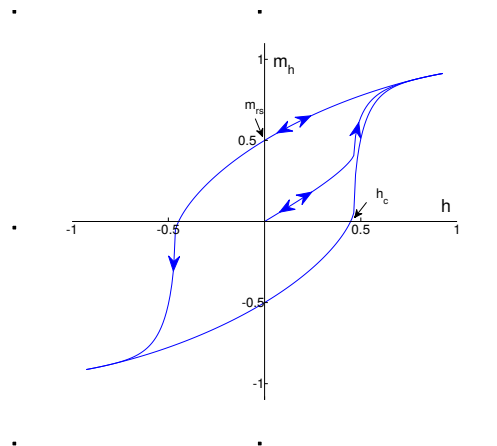


Ferromagnétisme

18

Ferromagnétisme

- ▼ Orientation de \vec{m} par *domaines* ($\approx 10^{20}$ atomes) selon \vec{B}
- ▼ Dans un champ magnétique \vec{B} non uniforme : attraction vers \vec{B} fort
- ▼ Orientation permanente : magnétisation
- ▼ Phénomène d'hystérésis :
l'aimantation \vec{M} (et le champ \vec{B}) dépendent de l'histoire du matériau



- ▼ μ_r entre 10^2 et 10^6 !
- ▼ Température de Curie T_c : nickel 354 °C, fer 770 °C, cobalt 1115 °C

19

