# LPOB 21 : Milieux magnétiques : diamagnétisme, paramagnétisme, ferromagnétisme

**intro** : Les pierres magnétiques ($Fe_3O_4$ magnétite) sont connues depuis l'antiquité.
Elles étaient utilisées comme boussoles pr les marins.

On a d'abord fait des observat° des φ magnétiques avant de pouvoir les expliquer.

Ce n'est qu'au fin XIX$^e$ début XX$^e$ qu'on décrit avec succès les matériaux magtq (Curie, Langevin)

Prérequis :
- moment magtq
- μ magtq des e⁻
- équa de Maxwell ds les milieux
- loi de Lenz
- loi de Faraday
- force de Laplace
- loi de Boltzmann

# I) Présentation des milieux magnétiques :

## 1) Rappels.

* Un matériau est dit magnétique si $\exists\ \vec{B}_{ext}$ ⇒ apparition d'un μ magtq macroscopique.

• On définit le vecteur aimantat° : $\boxed{\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{d\tau}}$ moment magtq apparaissant ds l'élément de volume $d\tau$ ds l'act° de $\vec{B}_{ext}$.

on peut regarder à l'échelle de l'ordre ou molécule

$[M] = A/m = [\vec{H}]$.

apparit° de μ mag ⇒ boucles de courant ⇒ ∃
• courant d'aimantat° : $\boxed{\vec{j}_{liées} = \vec{rot}\,\vec{M}}$

• équation de Maxwell dans les milieux (diapo) dû = spire représentant le moment mgtq à l'ordre

avec notamment $\boxed{\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}}$

excitat° magtq

perméabilité magnétique du vide.

Les équations de Maxwell ne peuvent être résolues que si ∃ des relat° phénoménolgq (car $\vec{D}$ et $\vec{H}$ en ⊕)

Cas des milieux linR ⊕ fréquent.

→ $\underline{\vec{M}} = [\underline{\chi}_m(\omega)]\,\underline{\vec{H}}$ ⟶ $\underline{\vec{M}} = \underline{\chi}_m(\omega)\,\underline{\vec{H}}$ ⟶ $\boxed{\underline{\vec{M}} = \chi_m \underline{\vec{H}}}$

linR. isotrope hmgN.

susceptibilité magnétique.

⇒ $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$

$\vec{B} = \mu_0 \underbrace{(1 + \chi_m)}_{\mu_r} \vec{H}$ ⇒ $\boxed{\vec{B} = \mu_0 \underbrace{\mu_r}_{\mu} \vec{H}}$

perméabilité magnétique relative

Dse la réponse du milieu avec $\chi_m$

## 2) Classification des milieux magnétiques :

D'après les relat° phénoménolgq on classifie [illegible]

comportement est ≠

• On dire certaines moléc ont un μ au niveau atomq mais pas si repos

* Le diamagnétisme : - caractérise les substances qui ne comportent que des atomes non magnétiques (moment magtq individ = $\vec{0}$).

- aimantat° induite pr le champ est très faible et opposé au champ : $\boxed{\chi_m \simeq -10^{-5}}$

- quand $\vec{B} = 0$ ⇒ $\vec{M} = \vec{0}$

exemples de valeurs (diapo) les la plupart des moléc.

- $\chi_m$ quasi indep de T.

* **Remarque** : le magtisme ∃ aussi quand substance possD atomes magtq mais si ⊖ pr masqué par contribut° des atomes magtq.

↗ grand présence

$Al \to 21 \times 10^{-6}$ (c.f. Tab.)

$Li \to 14 \times 10^{-6}$ // //

* **Le paramagnétisme** : - la plupart du tps. provient de substances possédant un $\mu$ magtq permanent (porté par tout ou une partie des atomes) (distance entre eux grdes ⇒ pas d'int°)

- aimantat° induite // au chp $\boxed{\chi_m \simeq 10^{-3}}$

- qd $\vec{B} = \vec{0}$ (⇒ soumis que à l'agit° thq) l'aimantat° globale est nulle.

- $\chi_m \searrow$ qd $T \nearrow$.

dia // ($Au \to -3{,}4 \times 10^{-6}$ (liq), $H_2 \to -2{,}6 \times 10^{-6}$, $Hg \to -29 \times 10^{-6}$ (liq).)

**Rq** : para si $\chi_m$ faible $\forall T$ ($\hat{m}$ petit $T$) ex : $O_2$ (except° Li, Al.)

* **Le ferromagnétisme** : - substances possédant un $\mu$ magtq permanent portés pl atomes dt distance entre eux est faible ⇒ peuvent interagir.

- milieux non linéaires
- s'aligne avec le champ
→ CP restent aimantés (s/s cert$^N$ cond°) même qd $\vec{B} = \vec{0}$

ex : Fer, Nickel, Cobalt

+ en dessous d'une cert$^{NT}$
+ après 1ère aimantat°.

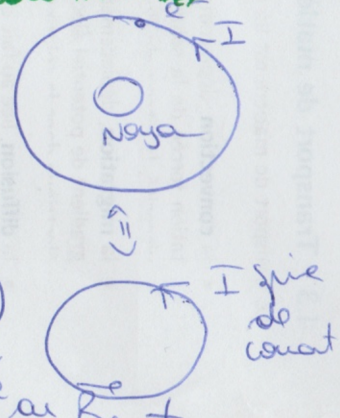
Il existe d'autres catégories tq antiferromagnétisme, ferrimagnétisme,

Mais on va se limiter à l'étude des 3 catégories préc.

Transition : descript° macro phénoménologique des ≠ types de magtisme ⇒ explicat° au niveau micro.

## II) Le diamagnétisme : explication à l'échelle micro.

### 1) Explication qualitative du mo dia



atomes → pas de $\vec{\mu}$ indiv.

→ $B_{ext}$ ⇒ ~~modifie $\vec{\mu}$ de chaque~~.

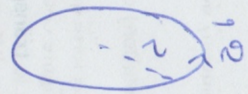
courant modifié.

tp flux créé pl modif° s'oppose au flux de $\vec{B}$ (Loi de Lenz)

⇒ $\vec{\mu}$ magtq orbital créé et opposé au $B_{ext}$.

### 2) Modèle simple du diamagnétisme :

$e^-$ se déplaçant ~~à~~ à $v$ sur une orbite circulaire ($m_e$, $-e$) de rayon $r$ :



on suppose $\vec{B} \perp$ à orbite

• On admet qu'il crée un moment magtq $\vec{m} = \frac{-e r \vec{v}}{2}$

• Loi de Faraday : $e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\pi r^2 \frac{dB}{dt}$ (B unifor)

• Champ eq agissant s/l'$e^-$ le long de l'orbite :

~~symétrie : tt plan contenant $\vec{O}$ et $e^-$ est plan de sym~~
~~$\vec{E} \in$ plans ⇒~~

$\vec{E} \,\#\, \vec{v} \Rightarrow \vec{E}$ selon $\vec{u}_\theta$ ?

invariance selon $\theta$, $E$ ne dépend pas de $\theta$

$\Rightarrow e = \oint \vec{E}.\vec{dl} = \oint E \vec{u}_\theta . r\, d\theta\, \vec{u}_\theta = E r \oint d\theta = E r\, 2\pi.$

D'où : $\boxed{\vec{E} = -\pi r^2 \frac{dB}{dt} \times \frac{1}{2\pi r} \vec{u_\theta} = -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt} \vec{u_\theta}}$

• Force de Lorentz agissant :

$\boxed{\vec{F_L} = -e\vec{E} = \frac{er}{2} \frac{dB}{dt} \vec{u_\theta}}$

$\vec{E} = \vec{E_m}$ en l'absence de potentiel scalaire et de mvt d'entraînt

• ~~...~~ PFD : {e⁻} ds réf supp galiléen :

$\vec{F_L} = m\vec{a} = m\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{er}{2}\frac{dB}{dt}\vec{u_\theta}$.

• On intègre :

$\Delta v = \frac{er}{2m_e}\int_0^B dB = \frac{er}{2m_e} B \Rightarrow \boxed{\Delta m = -\frac{(er)^2}{4m_e} B.}$

On s'attend à $\chi_m \ll 1$ donc $\vec{H} \simeq \frac{\vec{B}}{\mu_0}$

$\Rightarrow \vec{M} = \chi_m \vec{H} \simeq \chi_m \frac{\vec{B}}{\mu_0} = -\frac{3e^2}{16\pi m r}\vec{B_0}$.

$\Rightarrow \boxed{\chi_m = -\frac{3\mu_0 e^2}{16\pi m r}}$ } pas de dép en T.

OK.

si m pe. OK !

Schéma p90 magnétisme

1

AN : $r = 1$ Å

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H.m⁻¹

$m = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg.

$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

$\Rightarrow \boxed{\chi_m = -2 \cdot 10^{-5}}$ ||

3

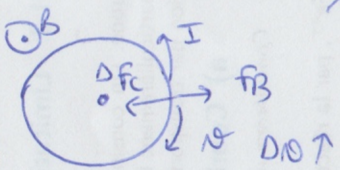
Justification rayon cst :

à l'applicat° du chp : appari° de 2 forces :

→ $F_B = evB$

→ variat° force centrifuge car variat° du v :

$\Delta F_c = \frac{2m_e v \Delta v}{r} = \frac{2m_e v}{r} \times \frac{er}{2m_e} \times B = evB$



$\boxed{\vec{M} = \frac{\vec{\Delta m}}{d\tau} = \frac{-(er)^2}{4m_e}\vec{B} \times \frac{3}{4\pi r^3} = -\frac{3e^2}{16\pi m_e r}\vec{B_0}}$

→ atome dans une sphère de rayon r.

sph. empilées ; compact (+) ⇒ Volume ~~...~~minoré ⇒ $\chi_m$ majoré.

comment dis

autre modèle dia : de Langevin : Z e⁻.

Transition : Dia ⇒ créat° de dipôles qui s'opposent au champ $\vec{B}$.

On a aussi para qui eux ont déjà dipôles qui s'orientent juste.

## III) Le paramagnétisme : explicat° à l'échelle micro.

### 1) Explication qualitative :

on rappelle ∅ ext

$\vec{B} = \vec{0}$ : agitat° therm ⇒ aimant° globale nulle.

$\vec{B} \neq \vec{0}$ : s'oriente selon $\vec{B}$ (couple $\vec{m} \wedge \vec{B}$)

(alignement partiel car $T \neq 0 \Rightarrow \chi_m$ pas trop grand)

Quand T ↗ agit° therm ↗ ont plus de mal à s'orienter ⇒ $\chi_m$ ↘. (moins bon ordre).

~~$\chi_m = \frac{C}{T}$ loi de~~

traduit° quantitativement?

## 2) Modèle du paramagnétisme de Langevin :

idée : loi quantitative de la variat° en T ;

$$\boxed{\chi_m = \frac{C}{T}} \quad \text{loi de Curie.}$$

modèle : n particules $\not\perp$ ent. par unité de volume

$\vec{B} \neq \vec{0} \Rightarrow$ s'orientent selon $\vec{B}$ mais ↗ agit° therm.

$\Rightarrow M = n m_0 \mathcal{L}(\alpha)$

Aux basses T° : $\mathcal{L}(\alpha)$ sature vers 1 (ts les $\vec{m}$ sont orientés $\chi_m$ max)

+ agi° a peu d'effet

Aux hautes T° : $\alpha \to 0$ $\mathcal{L}(\alpha) \simeq \frac{\alpha}{3}$

$\Rightarrow M = n \frac{m_0^2 B}{3 k_B T}$

⇒ loi de Boltzmann

statistique.

proba pour que le moment fasse un angle entre $\theta$ et $d\theta + \theta$

$$dp(\theta) = \frac{e^{\frac{-E}{k_B T}} (2\pi \sin\theta d\theta)}{\int_0^\pi e^{-E/k_B T} (2\pi \sin\theta d\theta)}$$

diapo schéma p 256

4 p odes

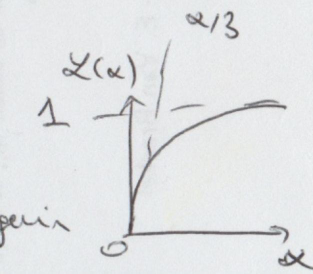
(2)

avec $E = -\vec{m}.\vec{B} = -mB\cos\theta$.

$\langle m \rangle_T = \int_0^\pi m_0 \cos\theta \, dp(\theta)$

$= m_0 \mathcal{L}(\alpha)$

$\coth(x) - \frac{1}{x}$ fct° de Langevin




avec $\alpha = \frac{m_0 B}{k_B T}$

avec $B \simeq \mu_0 H$

$\Rightarrow M = n \frac{m_0^2 \mu_0 H}{3 k_B T}$

$= \chi_m H$ $\Rightarrow$ $\boxed{\chi_m = + \frac{n m_0^2 \mu_0}{3 k_B T}}$

C constante de Curie

avec MQ : $C = \frac{\mu_0 \, n \, m_{eff}^2}{3 k_B}$, $m_{eff} = g_J \mu_B \sqrt{J(J+1)}$

($E = \mu_0 g_J \mu_B M_J H$

$\in [-J ; J]$ valeurs discrètes)

AN : $k_B = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J.K$^{-1}$ ; $n = 2 \cdot 10^{28}$ m$^{-3}$ (dense)

$m = 2{,}2 \cdot 10^{-24}$ Am$^2$ ?

à 295 K $\Rightarrow \chi_m = 10^{-5} \ll 1$

et on voulait $\alpha \ll 1$ or $\frac{k_B T}{m} = 1850$ T $\gg B$ usuels. OK

5

Rq: $\vec{B}$ qd ≃ 0,1T , 1T

$\boxed{\text{diapo schéma p80 magtsme}}$ ?

Transition : Absence d'int° au niveau µco ⇒ $\chi_m$ faible → para qd tu faible ∀T

Fce ⇒ ferro. explicat° d'observat° :

# IV) Le ferromagnétisme :

## 1) Approche qualitative :

~~Courbe d'ai~~

• ∃ interact° ⇒ s'alignent collectivement ~~avec chp ext~~ entre eux.
(domaines de Weiss ≃ µm)

• Mais ∃ agitat° thq donc chaque domN → aimat° ≠
⇒ $\vec{M} \neq \vec{0}$

$\boxed{\text{diapo p222 lpoda}}$ 5

• courbe de 1ère aimat° :
↳ aimat° à saturat°

• qd H↓ (i↓) on ne repasse pas aux n états ⇒ cycle hystérésis.

aimantat° rémanente ⇒ crée Brémanent.

excitat° coercitive = pour annuler aimantat°.

⇒ NON linéaire.

milieu doux, dur $\boxed{\text{diapo p674 Dunod}}$ 4

↓
Hc faible cycle étroit

• si on applique $\vec{B}$ ⇒ chaque domaine s'oriente

s'ils sont déjà tous pareils ds 1 domN ≠
aimat° ↗ (≫ paramagnétq)

• si on enlève $\vec{B}$, domaines reprennent partiellement leur indép mais reste ds int° résiduelles ⇒ aimantat° spontanée

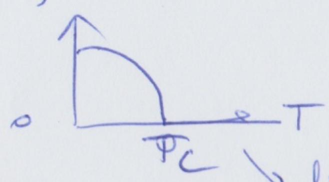
⇒ au niveau macro : un ferro acquiert une aimat° ss act° d'un champ.

## 2) Cycle d'hystérésis.)

$\boxed{\text{diapo p83 magnétisme}}$ 3

## 3) Transit° ferro para :

au-delà d'une certaine T = Tc comportement para




↳ loi de Curie Weiss : $\chi_m = \frac{C}{T - T_c}$.

CCL :

- ∃ ≠ catégories d'abord + observat° macroscop.
  mais s'explique µscop^t.

- Tableau rappel : matériaux sans ordre magnét à l'état naturel

|  | para | dia |
|---|---|---|
| macro | $\chi_m \geq 0$ | $\chi_m \leq 0$ |
| micro | orientat° dipôles | création dipôle. |

∃ ordre → non linéaire ferro
↳ applicat° : (TP) caractériser
→ une magnétisation

$$\vec{m} = I\vec{S}$$
$$= I \pi r^2 \vec{e_z}$$
$$= \frac{-e}{T} \pi r^2 \vec{e_z}$$
$$= -e \times \frac{\omega}{2\pi} \times \pi r^2 \vec{e_z}$$
$$\vec{m} = -\frac{e\,\omega r^2}{2} \vec{e_z}$$

6