

# LP22: Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Alexandre Fafin

31/05/18

## Références

- [1] M. Bertin, J.P. Faroux, and J. Renault. *Electromagnétisme 4 : milieux diélectriques et aimantés*. Dunod, 1984.
- [2] P. Brenders, L. Douchet, and M. Sauzeix. *Electrotechnique, Conversion de puissance (PSI)*. Bréal, 2004.
- [3] J.Ph. Pérez. *Electromagnetisme : fondements et applications*. Dunod, 2011.

## Niveau

L2

## Pré-requis

- Equations de Maxwell
- Notion d'induction

## Objectifs

- Propriétés des corps ferromagnétiques
- Reconnaître, tracer et exploiter un cycle d'hystérésis

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Caractérisation du ferromagnétisme</b>	<b>2</b>
1.1	Observations expérimentales . . . . .	2
1.2	Equations de Maxwell . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Aimantation d'un corps ferromagnétique</b>	<b>2</b>
2.1	Première aimantation . . . . .	2
2.2	Dispositif expérimental[2] . . . . .	3
2.3	Cycle d'hystérésis . . . . .	3
2.4	Pertes fer . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Applications : électroaimant[3]</b>	<b>3</b>

## Introduction

Certains solides présentent une aimantation en l'absence de champ magnétique appliqué. Ces solides sont dits ferromagnétiques. Introduction historique [1]

# 1 Caractérisation du ferromagnétisme

## 1.1 Observations expérimentales

**Manip** : Mesure du champ  $\vec{B}$  d'une bobine alimentée avec et sans noyau de fer doux à l'intérieur. Sans courant il reste un champ  $\vec{B}$  rémanent, le matériau est aimanté. Le matériau n'est pas dans le même état avant et après.

Les propriétés ferromagnétiques concernent certains corps simples (ex : fer, cobalt, nickel) et beaucoup d'alliages. Les propriétés ferromagnétiques ne concernent que l'état condensé. Le ferromagnétisme résulte d'une interaction entre atomes.

Ces phénomènes expérimentaux sont interprétés à l'échelle macroscopique par l'hypothèse que tout élément de volume d'un matériau aimanté possède un moment dipolaire magnétique  $\vec{m}$ . Le phénomène d'aimantation sera alors caractérisé par la densité volumique de moments dipolaires  $\vec{M}$  :

$$\vec{M} = \frac{\partial \vec{m}}{\partial V} \quad (1)$$

## 1.2 Equations de Maxwell

Dans la suite on ne s'intéresse pas au champ électrique.

Nous avons déjà vu que l'on pouvait associer un moment magnétique à une boucle de courant. On va faire l'hypothèse que l'on peut définir une densité de courant  $\vec{j}_{lie}$  (boucles de courant fictive) au vecteur aimantation  $\vec{M}$  :

$$\vec{j}_{lie} = \text{rot} \vec{M} \quad (2)$$

$\vec{j}_{lie}$  en  $A.m^{-2}$  et  $\vec{M}$  en  $A.m^{-1}$ .

### Equation de Maxwell Ampère

En négligeant le courant de déplacement on peut écrire l'équation de Maxwell-Ampère sous la forme :

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 (\vec{j}_{libre} + \vec{j}_{lie})$$

Cela amène à introduire un champ annexe  $\vec{H}$  (induction magnétique ou champ d'excitation) qui est directement relié aux courants d'excitations imposés.

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \\ \text{rot} \vec{H} = \vec{j}_{libre} \end{cases} \quad (4)$$

On a également :

$\vec{B}$  est donc la somme de l'excitation magnétique (extérieur) et de l'aimantation du matériau (réponse du milieu)

### Théorème d'Ampère

Il s'écrit maintenant :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{enlacee, libre} \quad (5)$$

On peut étudier la proportionnalité entre le champ  $\vec{H}$  et l'aimantation du matériau  $\vec{M}$ . L'aimantation  $\vec{M}$  acquise par la matière en un point est fonction du champ  $\vec{H}$  en ce On peut alors distinguer différents milieux magnétiques

- Diamagnétique  $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$  avec  $\chi_m \approx -10^{-5}$
- Paramagnétique  $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$  avec  $\chi_m \approx 10^{-3}$
- Ferromagnétique (plus de linéarité)  $\|\vec{M}\| \approx \chi_m \|\vec{H}\|$  avec  $\chi_m \approx 10^5$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (6)$$

## 2 Aimantation d'un corps ferromagnétique

### 2.1 Première aimantation

Tracer M(H) et B(H). M(H) sature quand B(H) pour H grand est linéaire.

(3) Donner des ordres de grandeur pour la saturation.

## 2.2 Dispositif expérimental[2]

Présentation du dispositif expérimental. Mesure de H et B.  
Avec le théorème d'Ampère :

$$Hl = N_1 i_1 \quad (7)$$

Avec la loi de Faraday (en considérant  $i_2 = 0$ )

$$e_2 = u_2 = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dBSn_2}{dt} \quad (8)$$

A la sortie de l'intégrateur :

$$u_s = -\frac{1}{RC} \int u_2(t) dt \quad (9)$$

La voie de sortie est proportionnelle à B et la voie d'entrée à H.

## 2.3 Cycle d'hystérésis

Tracer le cycle d'hystérésis. Champ coercitif et champ rémanent.

## 2.4 Pertes fer

La puissance dissipée par les pertes fer est reliée à l'aire du cycle :

$$P_f = fVA \quad (10)$$

avec  $V$  le volume du matériau et  $A$  l'aire du cycle. Calculer l'air du cycle et en déduire les pertes fers. Comparer à la littérature.

Parler des ferromagnétiques durs et doux.

## 3 Applications : électroaimant[3]

Le but de l'électroaimant est de créer des champs  $\vec{B}$  élevés.

## Conclusion

Ouvrir sur les applications (moteurs par exemple) et parler de l'interprétation microscopique.