

LP46 PROPRIÉTÉS MACROSCOPIQUES DES CORPS FERROMAGNÉTIQUES

12 juin 2020

MONNET Benjamin &

Niveau : L3

Commentaires du jury

2016 Un **bilan de puissance** soigné est **attendu**.

Jusqu'en 2013, le titre était : *Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques. Applications.*

2010, 2009 L'intérêt du champ $\vec{H}$ doit être clairement dégagé. L'obtention expérimentale du cycle d'hystérésis doit être analysée.

Jusqu'en 2004, le titre était : Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques : applications aux circuits magnétiques.

2001 Il faut **consacrer du temps aux applications** (stockage des données, transformateurs, électroaimants, ...) en justifiant l'adéquation du type de matériau ferromagnétique à la fonction visée.

1999 Les intensités, les forces électromotrices et les flux doivent être donnés de manière algébrique. Les diverses **sources de pertes** doivent être mentionnées. Il est souhaitable de distinguer plus nettement les domaines d'application des ferro doux et des ferro durs (par exemple pourquoi une tête de lecture est-elle en ferro doux alors que le support d'enregistrement est en ferro dur?).

Bibliographie

↗ *EM4*, **BFR**

↗ *Électrotechnique PSI*, **Le Bréal**

↗ *Magnétisme I et II*, **Trémolet**

→ La base du cours

→ Cycle d'hystérésis

→ Pour compléter

Prérequis

➤ Équations de Maxwell

➤ Électronique

➤ Paramagnétisme

Expériences



Table des matières

1	Description du ferromagnétisme	2
1.1	Équations de Maxwell	2
1.2	Relation constitutive	2
1.3	Réductance magnétique	3
2	Aimantation d'un matériau ferromagnétique	3
2.1	Cycle d'hystérésis	3
2.2	Aspects énergétiques	4
2.3	Interprétation mésoscopique	5
2.4	Température de Curie	6

3 Applications du ferromagnétisme	6
3.1 Modèle du transformateur parfait	6
3.2 Stockage d'informations	7
3.3 Paléomagnétisme	8

Introduction

Nous avons déjà pu parler dans de précédentes leçons de corps paramagnétiques, dont les moments magnétiques s'alignent avec le champ magnétique et des corps diamagnétiques, dont les moments magnétiques s'orientent dans le sens inverse. Néanmoins, dans les deux cas, l'existence d'une aimantation nécessitait la présence d'un champ extérieur. Ces deux types de magnétisme n'expliquent donc pas qu'ils puissent exister des aimants permanents comme on connaît.

Nous allons donc introduire dans ce cours la notion de matériau ferromagnétique ainsi que leurs caractéristiques, afin de comprendre comment il est possible d'obtenir des aimantation permanentes.

1 Description du ferromagnétisme

1.1 Équations de Maxwell

On rappelle que l'on a déjà vu que les équations de Maxwell dans les milieux magnétiques s'écrivent en statique :

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ r \vec{\otimes} \vec{H} &= \vec{j}_{libres} \\ \vec{H} &= \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \end{aligned}$$

$\vec{H}$ est le **vecteur d'excitation magnétique**, de même unité que l'aimantation $\vec{M} : \text{A.m}^{-1}$. Dans l'état actuel des choses nous avons :

- 6 équations (1+2+3)
- 9 inconnues

Le système n'est donc pas fermé et on ne peut pas le résoudre. Il faut donc rajouter une **relation constitutive**

1.2 Relation constitutive

L'aimantation $\vec{M}$ variant avec l'excitation magnétique $\vec{H}$, on peut donc poser une relation constitutive de la forme :

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

- Pour rappel, dans le cas des matériaux paramagnétiques et diamagnétiques, nous avons vu que la susceptibilité magnétique χ_m était indépendante de $\vec{H}$. Pour un matériau paramagnétique, $\chi_m > 0$ et $\chi_m \approx 10^{-3} - 10^{-6}$. Pour un matériau diamagnétique, $\chi_m < 0$ et $\chi_m \approx 10^{-6} - 10^{-9}$
- Pour les ferromagnétiques, χ_m dépend de l'excitation magnétique et sa valeur est beaucoup plus importante : Fer $\chi_m = 200$, Ni $\chi_m = 114$, Permalloy (alliage) $\chi_m = 100000$

La relation entre $\vec{M}$ et $\vec{H}$ n'étant plus linéaire, on peut avec $\vec{M} \neq \vec{0}$ alors que $\vec{H} = \vec{0}$! On voit donc qu'il est possible d'avoir des aimants permanents. Finalement, on va la relation constitutive que l'on vient de poser, on peut réécrire $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{avec} \quad \mu = \mu_0(1 + \chi_m) \quad \text{la perméabilité}$$

On voit alors une forte analogie avec l'électrostatique dans les milieux diélectriques où l'on avait introduit la permittivité électrique.

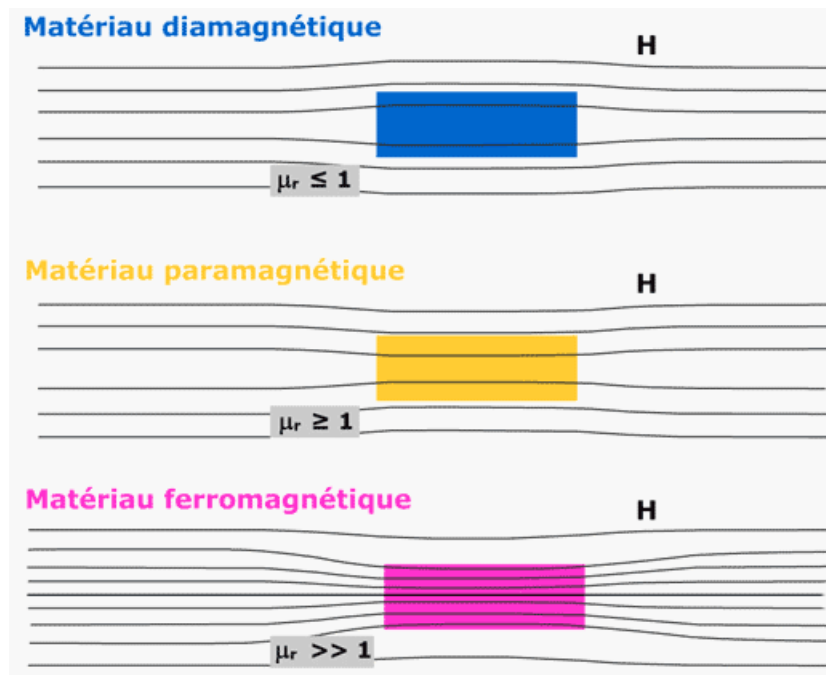


1.3 Réluctance magnétique

🔗 Tremolet II p137

Relation	Electrique	Magnétisme
Relation constitutive	$\vec{j} = \sigma \vec{E}$	$\vec{B} = \mu \vec{H}$
Flux	$i = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$	$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$
Potentiel	$U = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$	$C = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$
Loi macroscopique	$U = Ri$	$C = R_m \Phi$
Résistance, réluctance	$R = \int_C \frac{dl}{\sigma S}$	$R_m = \int_C \frac{dl}{\mu S}$

Les lignes de champs suivent donc le chemin de moindre réluctance. Autrement dit, un matériau ferromagnétique canalise les lignes de champs !

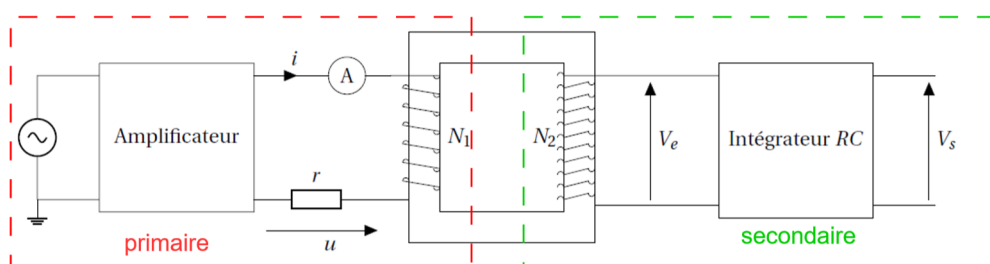


Maintenant que l'on a posé les bases théoriques du modèle, on aimerait pouvoir remonter à l'évolution de $\vec{B}$ et/ou $\vec{M}$ en fonction de $\vec{H}$, dont le comportement est pilotée par χ_m .

2 Aimantation d'un matériau ferromagnétique

2.1 Cycle d'hystérésis

Il nous faut donc un montage capable de mesurer les deux grandeurs qui nous intéressent. Pour cela, on utilise le montage suivant :



Au primaire, avec le théorème d'Ampère, on obtient :

$$\int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = i_{enlacé} \Leftrightarrow H = \frac{N_1}{rl} u$$

Avec la tension u , on remonte donc à l'excitation magnétique ! Dans le secondaire, on a dans un premier temps avec la loi de Faraday :

$$V_e = -\frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt}$$

Et donc, après l'intégrateur :

$$V_s = \frac{N_2 S}{RC} B + V_s(B=0)$$

On peut donc remonter aux deux grandeurs qui nous intéressent !

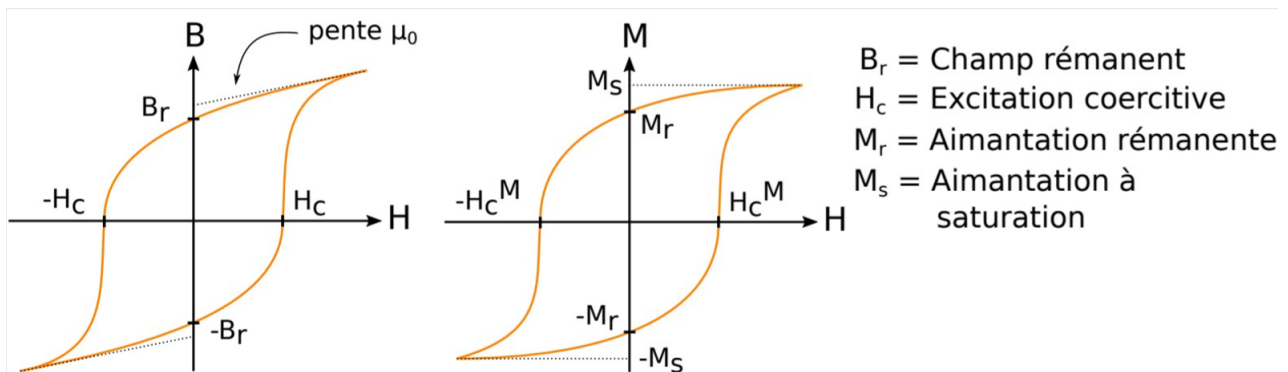


Tracé d'un cycle d'hystérésis

⚡ Duffait ?



- **Bien expliquer** le montage : où est le primaire, le secondaire, ect...
- Justifier le choix de la fréquence
- Pour un acier dur on a $B_r \approx 0.2T$ et $H_c \approx 10000 A/m$
- On montre en mode XY (oscillo ou Latis pro ?)



On introduit le notion d'hystérèse, de **champ rémanent**, qui explique l'existence d'aimant permanent, de **champ coercitif**, d'**aimantation rémanente** et à **saturation**.

On distingue alors deux catégories de ferromagnétiques :

- **Les matériaux doux** : faible champ coercitif, $H_c \leq 100 A/m$. Exemple : Fe, Si 3%. Il est facile d'en modifier l'aimantation.
- **Les matériaux durs** : fort champ coercitif. Il est difficile de leur enlever leur champ rémanent.

2.2 Aspects énergétiques

⚡ Précis p64

On va montrer que la présence d'un cycle d'hystérésis donne lieu à des pertes énergétiques. La puissance consommée au primaire vaut :

$$P = ui = \left(ri - N_1 \frac{d\Phi}{dt} \right) i$$

Avec les expressions précédentes, on a :

$$i = \frac{lH}{N_1} \quad N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = N_1 S \frac{dB}{dt}$$

On trouve donc en puissance moyenne :

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T R_1 i^2 dt + lS \frac{1}{T} \int_0^T H(t) dB(t)$$

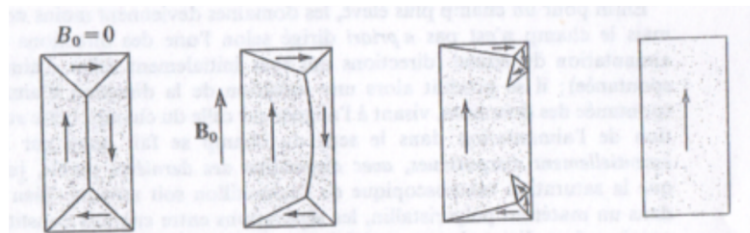
- Le premier terme est la puissance dissipée par **effet Joule**
- Le deuxième terme est un terme de perte fer et est relié à l'aire du cycle d'hystérésis
- Attention, tout n'est pas pris en compte dans ses calculs. Il y a en réalité aussi des pertes par courants de Foucault qui dépendent de la fréquence ! Plus la fréquence est élevée, plus les pertes sont élevées. (Ce sont des pertes fer)

Par conséquent, on utilise des ferromagnétiques durs pour faire des aimants permanents. Mais pour des utilisations industrielles (transformateur par exemple), on utilise des ferromagnétiques doux pour limiter la perte par hystérésis.

2.3 Interprétation mésoscopique

L'interprétation du ferromagnétisme est basée sur l'hypothèse du physicien français Pierre Weiss, qui suppose en 1907 qu'un matériau ferromagnétique est divisé en domaines appelés **domaine de Weiss**. Chacun de ses domaines est aimanté : tous les dipôles qu'il contient sont aimantés dans la même direction. Ces domaines sont le résultat de la compétition de 2 énergies :

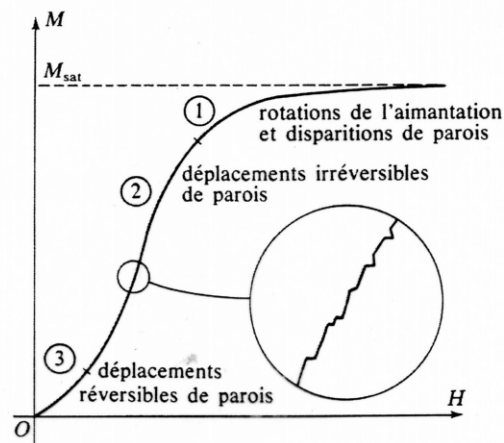
- **Une énergie volumique** : plus le champ magnétique totale du matériau est grand, plus l'énergie associée est grande. En ayant des orientations différentes, le vecteur $\vec{B}$ résultant est plus faible et donc l'énergie est plus faible.
- **Une énergie surfacique** : les parois entre les différents domaines génèrent des barrières d'énergie.



Lorsque l'on applique un champ extérieur, les domaines de Weiss orientés dans le sens du champ vont s'agrandir, afin de minimiser l'énergie.

- **Pour les champs faibles**, ces déplacements sont réversibles et si le champ extérieur disparaît, l'aimantation du matériau reste nulle
- **Pour les champs forts** : les parois des domaines bougent et rencontrent des impuretés ou des défauts, ce qui rend leur déplacement **irréversible**. Si le champ magnétique extérieur est éteint, les domaines de Weiss ne reviennent pas à l'état initial à cause des défauts du cristal.
- **Pour des champs très forts (à saturation)** : tout le matériau est orienté selon le champ extérieur et son aimantation ne peut donc plus augmenter : on est à l'aimantation à saturation.

Courbe de 1ère aimantation et domaine de Weiss



↓ Voyons à quoi peuvent servir les matériaux ferromagnétiques !

2.4 Température de Curie

Il reste une dernière propriété des ferromagnétiques à voir : la température de Curie. C'est la température à laquelle la matériau transite d'un comportement ferromagnétique à un comportement paramagnétique. Cette température est en générale proche des 1000 K.

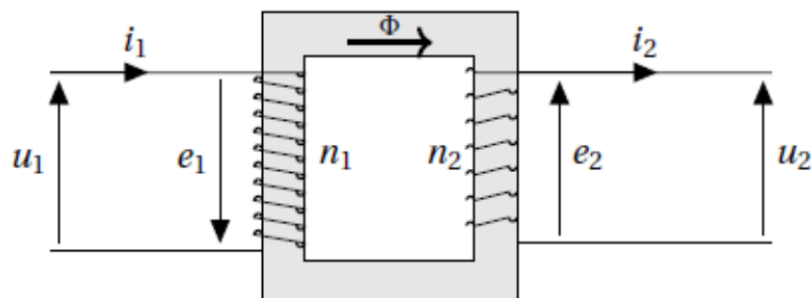


Chauffage du clou



3 Applications du ferromagnétisme

3.1 Modèle du transformateur parfait



Le but d'un transformateur est de diviser la tension par une certaine quantité tout en ne perdant pas de puissance. On suppose que le transformateur est parfait, c'est à dire :

- Toutes les lignes de champs sont canalisées par le ferromagnétique (c-à-d $\mu \rightarrow \infty$)
- La résistance des enroulements est nulle

La loi des mailles et la loi de Faraday permettent d'obtenir :

$$-u_1 = e_1 = -n_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{et} \quad u_2 = e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

D'où, en égalant les flux :

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{n_2}{n_1} = m$$

Puis, avec $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = n_1 i_1 - n_2 i_2$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$ et l'hypothèse μ infini alors que le flux est fini, donc B est fini, on a $H=0$ d'où :

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{1}{m}$$

Ainsi, la puissance est conservée mais la tension est augmentée ou abaissée.



Mesure du rapport d'un transformateur

✍ Bréal

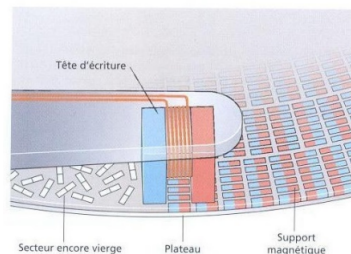


Bien expliquer.

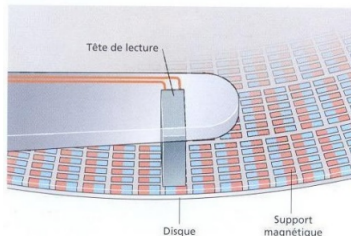
3.2 Stockage d'informations

✍ La physique par les objets quotidiens p.100

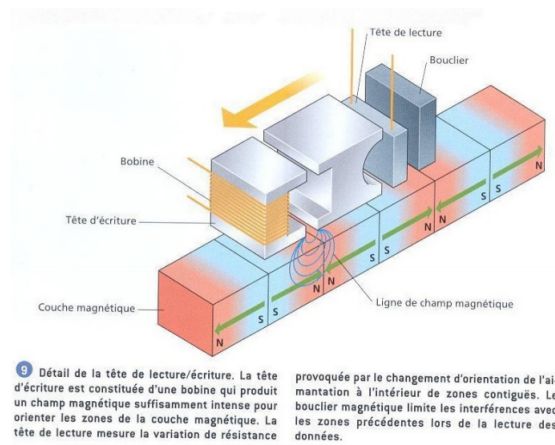
Un disque dur est constitué d'un sembla de plateaux recouverts d'une couche ferromagnétique qui stockes les données sous forme binaire. Les têtes d'écriture sont des bobinages miniatures parcourus par un courant électrique : chacune aimante des zones d'un plateau dans un sens ou dans un autre selon le sens du courant. La direction de l'aimantation rémanente donne donc un code binaire. La lecture des données est fondée sur la variation de la résistance d'un circuit placé dans la tête de lecture, provoquée par le changement du sens de l'aimantation des zones visitées. Elle contient un ferromagnétique doux. Le principe utilisé pour lire les données est la **magnétorésistance géante** (GMR) découverte en 1988, qui a valu le prix Nobel à Albert Fert en 2007.



5 Principe de l'écriture des données sur un matériau ferromagnétique. La direction de l'aimantation à l'intérieur des différentes zones magnétiques est symbolisée par un code de couleurs : en gris sont représentés les domaines dont l'aimantation possède une orientation quelconque, ce qui correspond aux secteurs vierges du disque dur ; la couleur indique les domaines dont l'aimantation a été modifiée par la tête d'écriture pour y enregistrer des données.



6 Principe de la lecture des données. La résistance d'un circuit électrique se déplaçant à proximité d'une zone magnétique varie lorsque l'orientation de l'aimantation de la zone change brusquement. Cet effet permet de lire les données inscrites sur le support magnétique.



3.3 Paléomagnétisme

➤ Trémolet II p397

Questions

-

Remarques

-