

# LP46 – PROPRIÉTÉS MACROSCOPIQUES DES CORPS FERROMAGNÉTIQUES. (LEÇON DE DÉMONSTRATION)

2 septembre 2016

Samuel BOURY

*Imagine you are a spin, up or down.*  
R. EVERAERS

## Niveau : Licence 3

### Commentaires du jury

- **2016** : un bilan de puissance soigné est attendu.
- **2015** : le principe de fonctionnement du circuit électrique utilisé pour présenter un cycle d'hystérésis doit être connu.

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

- **2009, 2010** : L'intérêt du champ  $\vec{H}$  doit être clairement dégagé. L'obtention expérimentale du cycle d'hystérésis doit être analysée.
- **2005** : Les dispositifs expérimentaux utilisés au cours de cette leçon doivent être parfaitement maîtrisés. Il existe bien d'autres applications que le transformateur idéal.

### Idées importantes

- Le vecteur excitation magnétique  $\vec{H}$  caractérise le champ magnétique accessible expérimentalement.
- Le ferromagnétisme n'existe que parce que la réponse mésoscopique (et donc macroscopique) est **non linéaire**.
- Bien connaître et comprendre la manip pour le tracé du cycle d'hystérésis.

### Bibliographie

- |  |                       |
|--|-----------------------|
| ⚡ <i>Électromagnétisme 4</i> , <b>BFR</b>        | → L'essentiel.        |
| ⚡ <i>Électrotechnique PSI</i> , <b>Bréal</b>     | → Cycle d'hystérésis. |
| ⚡ <i>Magnétisme I &amp; II</i> , <b>Trémolet</b> | → Pour compléter.     |
| ⚡ <i>Électromagnétisme</i> , <b>Garing</b>       | → Pour compléter.     |
| ⚡ <i>La physique par les objets du quotidien</i> | → Disque dur.         |

### Prérequis

- Équations de Maxwell dans la matière (diélectriques)
- Diamagnétisme et paramagnétisme

### Expériences

- ☞ Aimant permanent
- ☞ Cycle d'hystérésis
- ☞ Domaines de Weiss
- ☞ Transformateur parfait

### À propos de la leçon

Je présente ici la leçon que j'ai présentée le jour de l'oral pour l'épreuve de LP.

Le plan que je propose est assez classique : description du ferromagnétisme – aimantation et cycle d'hystérésis – applications du ferromagnétisme. Comme dans de nombreuses leçons, il y a des passages incontournables : il s'agit ici du tracé du cycle d'hystérésis, qui occupe une place centrale. Le jury demande cette manip, et veut surtout que les candidats connaissent le montage permettant de tracer le cycle. En pratique, le jour de l'oral, les techniciens installent la manip (si on le leur demande avec le sourire), comme toutes les manips pour l'épreuve de leçon, à moins que vous insistiez pour en installer une vous-même. N'hésitez d'ailleurs pas à leur demander de vous aider pour les aspects pratiques, ils sont très volontaires et super sympas.

Dans cette leçon, en plus des parties un peu incontournables, le jury a bien apprécié l'approche de l'aimantation faite par un décompte d'équation (en montrant qu'on avait besoin d'une relation constitutive supplémentaire pour fermer le problème) et l'analogie circuit électrique – circuit magnétique.

Le plan qui suit est celui que j'ai préparé pendant l'année, et correspond à quelques détails près à celui que j'ai présenté le jour de l'oral (à l'exception de la troisième partie que je n'ai pas traitée entièrement).

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Description du ferromagnétisme</b>	<b>3</b>
1.1	Aimantation et équations de Maxwell . . . . .	3
1.2	Relation constitutive . . . . .	3
1.3	Réductance magnétique . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Aimantation d'un matériau ferromagnétique</b>	<b>3</b>
2.1	Cycle d'hystérésis . . . . .	3
2.2	Aspects énergétiques . . . . .	4
2.3	Interprétation mésoscopique . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Applications du ferromagnétisme</b>	<b>4</b>
3.1	Transformateur parfait . . . . .	4
3.2	Stockage de données . . . . .	5
3.3	Paléomagnétisme . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Annexe</b>	<b>7</b>

## Introduction

- On a débuté l'étude du magnétisme dans la matière par une approche qualitative des phénomènes de diamagnétisme et de paramagnétisme : on a vu que lorsqu'un matériau était soumis à un champ magnétique, une aimantation pouvait apparaître et s'aligner dans la direction du champ (paramagnétisme) ou dans la direction opposée (diamagnétisme). Cette aimantation est alors une aimantation induite.

### Aimant permanent



⊙ 30 secondes

Montrer l'existence d'une aimantation permanente.

- Il peut donc exister une aimantation permanente, qu'un champ magnétique extérieur pourrait également solliciter : c'est le ferromagnétisme, qui permet notamment de créer des aimants et dont l'existence est bien connue. Comment peut-on le décrire et quelles en sont les applications ?

## 1 Description du ferromagnétisme

### 1.1 Aimantation et équations de Maxwell

- Aimantation** : par analogie avec  $\vec{P}$  dans les diélectriques, on définit l'aimantation  $\vec{M}$ .
- Courants libres et courants liés** : décomposer  $\vec{j} = \vec{j}_{\text{libre}} + \vec{j}_{\text{lié}}$ .
- Équations de Maxwell** : poser  $\vec{j}_{\text{lié}} = \vec{\nabla} \times \vec{M}$  et définir  $\vec{H}$  ; donner les équations de Maxwell associées. Insister sur l'intérêt de  $\vec{H}$  : il s'agit de l'excitation magnétique, en pratique on n'a pas accès à  $\vec{B}$  mais à  $\vec{H}$ .
- Décompte d'équations** : il manque une équation pour fermer le problème, on va donc établir une relation constitutive liant  $\vec{M}$  et  $\vec{H}$ .

### 1.2 Relation constitutive

- Relation constitutive** :  $\vec{H} = \vec{H}(\vec{B})$  ou  $\vec{M} = \vec{M}(\vec{B})$ . Alors :
  - Cas du diamagnétisme et du paramagnétisme : on peut écrire avec une bonne approximation que  $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$  relation linéaire, avec  $\chi_m$  la susceptibilité magnétique (**ODG**) ; et
  - Cas du ferromagnétisme : la susceptibilité magnétique est, en ordre de grandeur, beaucoup plus grande (**ODG**). On ne peut plus faire l'approximation que la relation est linéaire : on a une relation non-linéaire  $\vec{M} = \chi_m(\vec{H}) \vec{H}$ .

### 1.3 Réluctance magnétique

- Analogie électrique** : et guidage des lignes de champ :

Relation	Circuit électrique	Circuit magnétique
Relation constitutive	$\vec{j} = \gamma \vec{E}$	$\vec{B} = \mu \vec{H}$
Conservation du flux	$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Intégrale de flux	$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$	$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$
Circulation (potentiel)	$U = \int_l \vec{E} \cdot d\vec{l}$	$C = \int_l \vec{H} \cdot d\vec{l}$
Loi macroscopique	$U = RI$	$C = R\phi$
Résistance & réluctance	$R = \int_l \frac{dl}{\gamma S}$	$R = \int_l \frac{dl}{\mu S}$

## 2 Aimantation d'un matériau ferromagnétique

### 2.1 Cycle d'hystérésis

- Objectif** : identifier le cycle d'hystérésis correspondant à la relation entre  $\vec{M}$  et  $\vec{H}$ .

- ☛ **Hypothèses** : le matériau considéré est isotrope homogène.

### Cycle d'hystérésis

☛ Précis Bréal

⊖ 5 – 10 minutes

Tracer le cycle d'hystérésis pour un matériau doux et pour un matériau dur. Bien prendre le temps d'expliquer le montage (GBF, ampli de puissance, rhéostat, tore ferromagnétique, intégrateur, oscilloscope). Expliquer comment obtenir  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$  dans le dispositif, et comment remonter à  $\vec{M}(\vec{H})$ .

- **Aimantation de saturation** : valeurs extrémales de  $\vec{M}$  traduisant une saturation du matériau.
- **Aimantation rémanente** : à excitation  $\vec{H}$  nulle, une aimantation persiste (aimants permanents).
- **Excitation coercitive** : pour annuler l'aimantation, il faut appliquer une excitation  $\vec{H}$  non nulle.
- **Matériaux durs et doux** : taille du cycle diffère (**ODG**).

## 2.2 Aspects énergétiques

- **Pertes énergétiques** : la présence d'un cycle d'hystérésis traduit une perte d'énergie lors de son parcours.
- **Énergie volumique dissipée** : montrer que l'aire du cycle d'hystérésis correspond à l'énergie volumique dissipée par le matériau ferromagnétique pendant le temps de parcours du cycle. Comparer les ferromagnétiques doux et durs.

## 2.3 Interprétation mésoscopique

- **Contributions énergétiques** : à tout instant, on tend à minimiser l'énergie d'interaction :
  - L'énergie d'*interaction d'échange* due à l'interaction entre les moments magnétiques quantiques des atomes, qui tend à aligner les spins ; et
  - L'énergie d'*interaction magnétostatique dipolaire* due à l'interaction entre les dipôles magnétiques, qui tend à désordonner les spins.
- **Domaines de Weiss** : mésoscopiquement on peut définir des domaines où les spins sont alignés : on parle de domaines de Weiss. Le corps ferromagnétique est donc composé d'une juxtaposition de volumes élémentaires (domaines de Weiss) au sein desquels les spins sont alignés, mais d'un domaine à l'autre l'alignement n'est pas identique.
- **Compétition énergétique** : l'interaction d'échange a une énergie proportionnelle à la surface du domaine de Weiss, et l'interaction magnétostatique a une énergie inversement proportionnelle au volume du domaine : l'énergie devant être minimisée, on a une compétition surfacique-volumique qui tend à créer de petits domaines lorsque l'excitation extérieure est nulle, et de grands domaines lorsqu'elle est non nulle.

### Visualisation des domaines de Weiss

☛ Garing (théorie)

⊖ 5 minutes

Placer une lame de ferrite dans le microscope polarisant (celle avec le sourire marche bien) et filmer. Approcher et éloigner un aimant permanent et commenter les domaines de Weiss (qui apparaissent par polarisation par effet Faraday).

## 3 Applications du ferromagnétisme

### 3.1 Transformateur parfait

- **Canalisation des lignes de champ** : comme expliqué précédemment avec la réluctance.
- **Transformateur parfait** : présenter le transformateur parfait et le rapport de transformation.

### Transformateur parfait

☛ Précis Bréal

⊖ 5 minutes

Monter un transformateur (deux bobines et un ferromagnétique) et mesurer le rapport de transformation.

- **Pertes** : commenter l'existence de pertes joules (dues au bobinage de cuivre), et des pertes fer (par courants de Foucault et par hystérésis). Pour éviter les pertes fer, on utilise donc un matériau feuilleté orthogonalement aux courants, et un ferromagnétique doux.

## 3.2 Stockage de données

- **Effet mémoire des ferromagnétiques** : commenter et appliquer à la réalisation d'un disque dur.

## 3.3 Paléomagnétisme

- **Paléomagnétisme** : expliquer le principe et l'inversion du champ magnétique terrestre.

## Conclusion

- Au cours de cette leçon, nous avons donc pu caractériser une nouvelle famille de matériaux : les corps ferromagnétiques. Leur susceptibilité magnétique très forte donne naissance à un cycle d'hystérésis ce qui rend le matériau dépendant de son histoire (applications au paléomagnétisme).
- Les ferromagnétiques sont connus depuis longtemps, notamment pour la réalisation d'aimants permanents, mais les applications industrielles sont bien plus récentes : transformateur, moteurs, et maintenant stockage d'information.
- Le comportement ferromagnétique est donc à distinguer des comportements diamagnétique et paramagnétique, mais il apparaît comme une version plus forte du paramagnétisme. Nous verrons en effet que la susceptibilité magnétique dépend de la température et qu'au-delà d'une certaine température (température de Curie), les corps ferromagnétiques se comportent comme des paramagnétiques : c'est la transition de phase ferro-para.

## Questions posées le jour de l'oral

À la suite de la leçon, j'ai eu très peu de questions sur le contenu de la leçon elle-même. La plupart des questions portaient sur le magnétisme en général et son origine quantique. Voici quelques unes des questions qui m'ont été posées le jour de l'oral :

- Comment calculer les lignes de champ magnétique ?
- Comment obtenir les relations sur les flux et les circulations ? (cf. réluctance)
- Quelle est l'origine du magnétisme ?
- Quelle échelle pour le magnétisme ? (macroscopique ? mésoscopique ? microscopique ?)
- Comment fonctionnent les domaines de Weiss ?
- À quoi est due la microréversibilité du cycle d'hystérésis et à quelle échelle l'observe-t-on ?
- Quelles sont les recherches aujourd'hui sur le magnétisme ?
- Peut-on observer un magnétisme pour des systèmes monoatomiques ?
- etc.

## Quelques conseils

Tout d'abord, inutile de trop s'angoisser sur le planning de préparation des leçons, qui peut sembler, à première vue, impossible à tenir : aussi incroyable que cela puisse paraître, c'est possible ! Il y a bien le temps durant l'année, et le bon moment pour commencer à préparer les leçons me paraît être vers janvier-février (c'est-à-dire un peu avant les écrits). Privilégiez à ce moment-là celles qui portent sur des sujets pour lesquels vous avez des difficultés : c'est une excellente façon de revoir pour les écrits et de ne pas être pris par le temps après ceux-ci, l'idéal étant, bien entendu, de les avoir toutes faites avant les oraux pour y aller plus sereinement.

Vous trouverez en BU agrég de nombreux plans des années précédentes. Ils sont à votre disposition pour vous aider dans votre préparation, mais il est déconseillé de les reprendre tels quels. Voici quelques conseils pour vous aider dans votre préparation :

- Faites une leçon **originale** : si quelques plans sont effectivement incontournables, pour la plupart le "classique" est une solution de facilité. Le jury recherche des plans originaux et n'a pas envie de voir tous les candidats présenter la même leçon. Essayez de nouvelles choses pendant l'année, c'est le seul moment où vous pouvez le faire sans risque.
- Faites une leçon **où vous vous sentez à l'aise** : dans l'idéal, il faudrait être quasiment inattaquable et garder un peu de marge (c'est-à-dire qu'il faut être capable d'aller plus loin que ce que vous annoncez au cas où l'on vous poserait des questions dessus). Mais ne tentez pas (trop) de bluffer le jury : c'est souvent visible et c'est la source de nombreuses erreurs pendant la leçon, puis pendant les questions. Attention donc aux plans trouvés en BU qui parlent de sujets que vous ne maîtrisez pas suffisamment.
- Faites une leçon **adaptée** : essayez dans la mesure du possible de tester à l'oral vos propres leçons, et ne vous fiez pas aux plans ambitieux de certaines trouvables en BU (préparées durant l'année consciencieusement mais non testées à l'oral) : certaines ne sont pas, ou difficilement, préparables en 4 heures, ou ne sont pas présentables en 50 minutes. Gardez en tête qu'il est possible, le jour J, de ne pas terminer sa leçon sans que le jury n'en tienne rigueur, surtout si vous vous arrangez pour que cela ne se voie pas. Aménagez-vous des portes de sortie, des parties que vous pouvez sauter ou rallonger, mais n'oubliez jamais de conclure une leçon.
- Faites une leçon **bien documentée** : l'idéal est de trouver quelques livres assez généraux qui vous serviront dans beaucoup de leçons, et de penser à une ou deux références supplémentaires pour étoffer (surtout pour les manips). Rappelez-vous que vous devrez apprendre la bibliographie en plus du plan pour l'oral : inutile donc de la surcharger, et gardez confiance en ce que vous savez (par exemple, pour cette leçon, je vous ai fourni la bibliographie complète en introduction mais je n'ai utilisé que deux livres le jour de l'oral : le *Précis Bréal* et le *Garing*).
- Faites une leçon **logique** : le but d'une leçon ou d'un montage n'est pas seulement de montrer que vous savez des choses mais que vous savez les expliquer. L'introduction doit problématiser le plus possible le sujet, et le plan doit permettre d'y répondre à l'aide d'une démarche scientifique. Ainsi, quand bien même la progression logique de votre leçon ne serait pas suffisamment visible, cela évitera de faire un "effet catalogue" (de connaissances, de calculs, ou d'exemples). Même si l'exercice vous paraît artificiel et que vous n'enseignerez pas de cette manière, montrez que vous avez un souci pédagogique et une réelle démarche scientifique.
- Faites une leçon **personnelle** : ne la recopiez pas, créez-la vous-même en vous inspirant, si besoin, des leçons des années passées. Une leçon personnelle se retient plus facilement.

Faites sérieusement les manips dès le début de l'année : vous n'aurez pas l'occasion de toutes les refaire entre les écrits et les oraux. Pour les leçons, vous n'êtes pas obligés de mettre des expériences, mais toute manip bien intégrée dans la progression de la leçon sera bien vue par le jury, tant que vous ne transformez pas l'épreuve en montage.

N'hésitez pas à demander aux encadrants ou aux agrégatifs de l'an dernier comment fonctionne telle ou telle manip. C'est l'un des gros avantages de la prépa agreg de Lyon : le jour de l'oral, de nombreux candidats arrivent sans avoir réalisé les manips qu'ils veulent mettre dans leurs plans ou en n'ayant sélectionné que celles qu'ils avaient à disposition.

Enfin, je vous encourage à parcourir les rapports du jury et le Book pour anticiper les attentes du jury et avoir des témoignages sur les leçons présentées les années précédentes.

Bon courage à tous !

## 4 Annexe

Ci-joint les transparents que j'ai utilisés le jour de l'oral :

### Réductance

	Électrocinétique	Magnétisme
loi locale	$\vec{j} = \gamma \vec{E}$	$\vec{B} = \mu \vec{H}$
	$i = \oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$	$\phi_b = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$
	$U = \oint_E \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$	$i_{ci} = \oint_E \vec{H} \cdot d\vec{\ell}$
loi macroscopique	$U = R i$	$i_{ci} = R \phi_b$

$\swarrow$  loi d'Ohm  
 $R \equiv$  résistance

$\swarrow$   
 $R \equiv$  réductance

FIGURE 1 – Réductance : analogie électrocinétique – magnétisme.

### Électroaimant

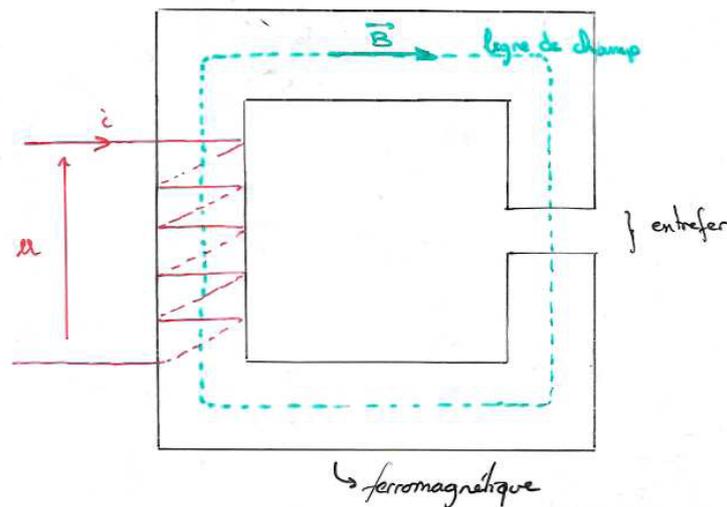


FIGURE 2 – Canalisation des lignes de champ et principe de l'électroaimant.

Cycle d'hystérésis.

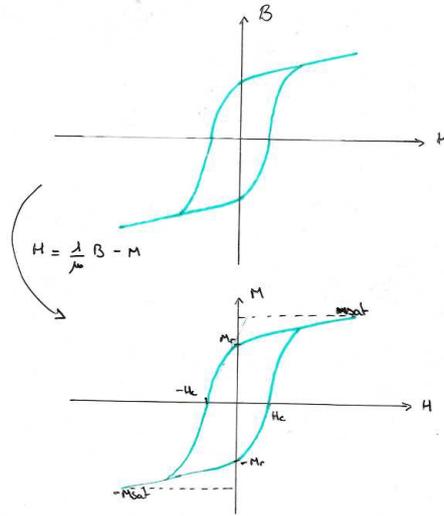


FIGURE 3 – Courbe d'aimantation et cycle d'hystérésis ( $B(H)$  et  $M(H)$ ).

Matériaux durs et doux

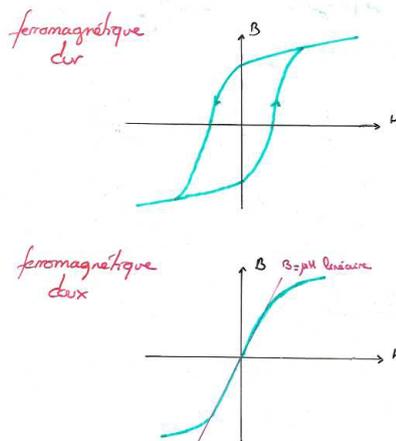


FIGURE 4 – Courbes d'aimantation pour les matériaux ferromagnétiques durs et doux.

## Domaines de Weiss

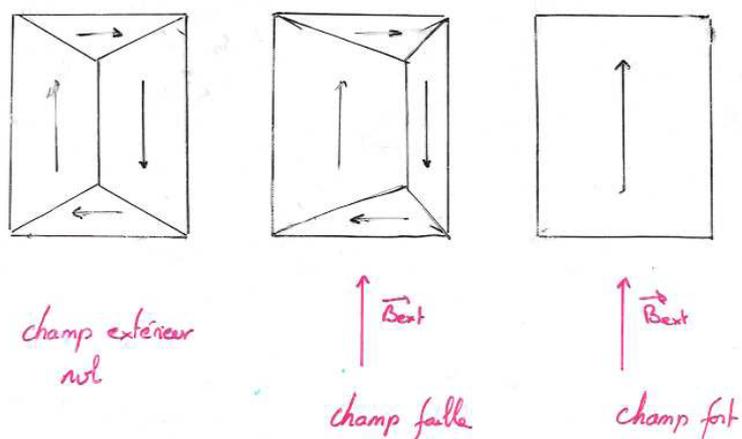


FIGURE 5 – Domaines de Weiss.

## Transformateur

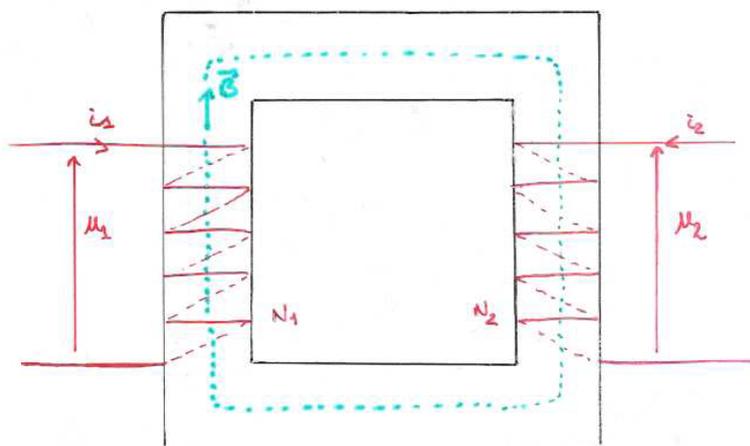


FIGURE 6 – Principe du transformateur.