

## LP46 : PROPRIÉTÉS MACROSCOPIQUES DES CORPS FERROMAGNÉTIQUES (L3)

### Prérequis

- électromagnétisme dans les milieux (paramagnétique, diamagnétique)
- notion sur l'aspect microscopique des corps ferromagnétique
- électrotechnique : transformateur idéal
- connaissance élémentaire sur la notion d'hystérésis

### Idées directrices à faire passer

- donner les ODG relatifs au ferromagnétisme
- hystérésis (raison, conséquences, matériaux durs/doux)
- large domaine d'application

### Commentaires du jury

- il ne faut pas parler des propriétés microscopiques mais uniquement de leur conséquence (même si on peut les citer)
- faire de vrais calculs d'électrotechnique : cette leçon doit aller jusque là
- utiliser l'aspect "magique" du magnétisme pour le rendre attrayant.
- la théorie microscopiques doit (évidemment) être maîtrisée

### Bibliographie

- [1] Electromagnétisme II, Feynman, Dunod (domaines de Weiss)
- [2] Electromagnétisme, PC-PSI, H-prépa (central pour cette leçon)
- [3] La physique par les objets du quotidien, Ray & Poizat, Belin (enregistrement magnétique)
- [4] Magnétisme : matériaux et applications, Trémolet de Lacheisserie, EDP Sciences (enregistrement magnétique)
- [5] Electromagnétisme IV, BFR, Dunod

**Introduction :** Phénomène connu depuis très longtemps (mais incompris). Formidable amélioration technique depuis que le phénomène est mieux compris : parler des innombrables développements de grands intérêts : aimants, transformateurs, moteurs...

## I Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

### 1 Un modèle linéaire à oublier [5]

- rappeler succinctement l'électromagnétisme dans les milieux
- présenter le cas des dia/para : linéarité, valeur de la susceptibilité (tracer éventuellement des courbes  $M = f(H)$  pour comparer ensuite avec le cas du ferro)
- dire que ferro est caractérisé par une interactions entre les moments magnétiques de la matière. Avec deux conséquences : une susceptibilité énorme (puisque la réponse est auto-amplifiée par l'orientation des moments) qui conduit à des régimes saturés à champ raisonnable et des effets d'hystérésis (le matériau conserve la mémoire de son état passé)

### 2 Courbe de réponse d'un ferromagnétique [2] et [5]

- manipulation : Utiliser les indications du Hprépa pour tracer le cycle d'hystérésis (il détaille en particulier le choix de l'intégrateur !)
- interpréter : montrer la saturation du matériau, montrer l'hystérésis (chemin différent selon le sens de l'aimantation)
- définir sur ce cycle aimantation rémanente et champ coercitif
- définir matériau dur/doux, donner des ODG
- on verra dans la suite que l'aire du cycle est lié à des pertes par cycle

### 3 Domaine de Weiss : vers une explication de l'hystérésis [1]

Suivre le chapitre 37.3 du Feynman

- la théorie microscopique prévoit une aimantation spontanée à champ nul. Or un bout de fer n'est pas aimanté spontanément.
- compétition entre énergie d'interaction et minimisation de l'énergie magnétique : naissance de domaine de Weiss séparé par des parois (Dans ces domaines, l'aimantation vaut l'aimantation à champ nulle à la température donnée). Le champ extérieur résultant est nul.
- explication de l'hystérésis par des phénomènes dissipatifs lors du déplacement des parois de Bloch dans un cycle d'aimantation
- on peut alors distinguer les matériaux durs (très dissipatif, gel de l'orientation) et doux (faible dissipation, parois de Bloch mobiles, le matériaux conserve peu la mémoire de son aimantation précédente).

### 4 Transition para/ferro des corps ferromagnétiques [5]

manipulation : expérience du clou qui se détache de l'aimant par chauffage

L'interprétation est faite dans le BFR. Donner des ODG de températures de Curie.

## II Exemples d'application des corps ferromagnétiques

### 1 Matériau doux : exemple du transformateur [2]

#### 1.1 Rappel : le transformateur idéal

L'idée de cette partie est de faire un rappel sur le principe du transformateur et les principaux résultats dans le cas idéal sans perte. Cette partie a déjà été vue par les étudiants.

- géométrie d'un transformateur, notion de primaire/secondaire, hypothèse de flux commun, aucune perte dans le circuit (ni effet résistif, ni effet inductif)
- donner le rapport de transformation en tension
- donner le rapport de transformation en courant (dans l'hypothèse d'un courant magnétisant (à définir) négligeable)
- modèle schématique de transformateur idéal

#### 1.2 Mise en évidence des pertes : modèle de transformateur réel

- commencer par les pertes à modélisation linéaires simples : inductance de fuite (perte de canalisation) et résistance du bobinage
- s'intéresser ensuite aux pertes dans le milieu magnétique
- on sépare alors les pertes par courant de Foucault (par induction dissipative dans le matériau) et les pertes par hystérésis (faire le petit calcul liant aire du cycle et perte)
- expliquer le choix des matériaux pour un transformateur : matériaux doux pour éviter les pertes par hystérésis et matériaux isolants (céramiques type ferrites) ou feuilletés (dans le domaine basse fréquence et pour des énergies faibles)

### 2 Matériaux durs : enregistrement magnétique [3] et [4]

Reprendre les idées dans la réf. 3. La réf. 4 est très spécialisée mais permet un complément en cas de besoin. Ici, on cherchera simplement à donner l'idée générale de fonctionnement et à expliquer en quoi un matériau à hystérésis est intéressant pour être utilisé comme mémoire ! Les ODG sont très impressionnant, il faut les donner.

#### Conclusion :

- bilan : revenir sur le cycle hystérésis et la grande différence d'ODG entre matériau dur et doux. Point central de l'utilisation des matériaux ferro.
- ouverture : citer les machines électriques qui forment un autre pan énorme de l'utilisation aussi bien d'aimants permanents (machines de faible puissance) que de ferro doux.

#### Q/R

#### 1. Donner d'autres exemples d'application des matériaux doux.

- 
2. Comment ramener un matériau ferromagnétique à aimantation nulle ?
  3. Lois de Descarte pour la réfraction de  $\vec{B}$  à l'interface milieu/air.
  4. Que vaut la pente de la courbe  $\vec{B} = f(\vec{H})$  à saturation ?
  5. Pourquoi avoir des pièces coniques au niveau de l'entrefer ?
  6. Comment marche une pince ampéremétrique ?
  7. Existe-t-il des matériaux non isotropes ?
  8. Comment varie  $\mu_r$  avec la fréquence ?
  9. Préciser le sens de parcours du cycle d'hystérésis.
  10. Comment mesurer l'aimantation de saturation avec du matériel de lycée ?
  11. Comment tracer manuellement un cycle d'hystérésis ?
  12. Comment choisir les fréquences de coupure de l'intégrateur pour visualiser le cycle d'hystérésis ?