

# LP46 - Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

May 27, 2019

## Contents

<b>1</b>	<b>Présentation du ferromagnétisme</b>	<b>3</b>
1.1	Équations de Maxwell dans un milieu magnétique . . . . .	3
1.2	Relation constitutive . . . . .	4
1.3	Réductance magnétique . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Aimantation d'un matériau ferromagnétique</b>	<b>5</b>
2.1	Cycle d'hystérésis . . . . .	5
2.1.1	Montage expérimental . . . . .	5
2.1.2	Observations et définitions . . . . .	8
2.2	Aspects énergétiques . . . . .	9
2.3	Exemple en industrie et ODG . . . . .	11
2.4	Interprétation mésoscopique . . . . .	11
2.4.1	Domaines d'aimantation spontanée . . . . .	12
2.4.2	Effet d'un champ magnétique externe . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Quelques applications du ferromagnétisme</b>	<b>14</b>
3.1	Stockage de données . . . . .	14
3.2	Paléomagnétisme . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Annexe</b>	<b>17</b>
4.1	Poêle à induction : . . . . .	17
4.2	Première aimantation : . . . . .	17
4.3	Disque dur . . . . .	17

- 2017 : L'introduction des milieux linéaires en début de leçon n'est pas judicieuse.
- 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. doit être clairement dégagé. L'obtention expérimentale du cycle d'hystérésis

- 2009, 2010 : L'intérêt du champ  $H$  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. 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 ?).
- 1998 : Quelques notions sur les aimants permanents seraient les bienvenues. Par exemple : le point représentatif du matériau d'un aimant permanent se situe dans le deuxième (ou le quatrième) quadrant de son cycle d'hystérésis de jeux de variables  $(B, H)$  : pour obtenir un champ magnétique donné dans un entrefer de volume donné, le volume du matériau magnétique utilisé est minimal lorsque la quantité  $B \times H$  est maximale, l'aimantation n'ayant pas, alors, sa valeur rémanente.

Bon courage !

## Références :

- Dictionnaire de physique , Taillet
- Electromagnétisme 4, BFR l'essentiel du cours.
- Electromagnétisme , Mauras complète le cours.
- Magnétisme I et II , Trémolet analogie circuit électrique et circuit magnétique.
- Electrotechnique PSI , Précis Bréal Brenders montage pour le cycle d'hystérésis.
- Expériences d'électronique , Duffait Rappels sur le montage intégrateur.
- La Physique par les objets quotidiens , Ray et Poizat Disque dur.

## Niveau : L3

### Prérequis :

- Transformations physiques
  - Miscibilité
  - cristallographie
  - Constante d'équilibre
  - Fractions molaires, massiques
- 2018 2017 pour compléments

# Introduction

Nous connaissons déjà quelques aspects du magnétisme dans la matière grâce à notre étude préalable des phénomènes de paramagnétisme et diamagnétisme : lorsque certains matériaux sont soumis à un champ extérieur, ils acquièrent une aimantation dans le même sens que le champ extérieur (paramagnétisme) ou dans le sens opposé (diamagnétisme). Cette aimantation est induite.

La question que nous pouvons alors nous poser est la suivante : quel est le phénomène responsable de l'aimantation permanente des aimants ?

Les aimants sont des matériaux ferromagnétiques, c'est-à-dire qu'ils **peuvent** présenter une aimantation permanente en l'absence de champ magnétique extérieur appliqué. L'objectif de la leçon est de présenter les caractéristiques macroscopiques des matériaux ferromagnétiques et plusieurs de leurs applications.

## 1 Présentation du ferromagnétisme

### 1.1 Équations de Maxwell dans un milieu magnétique

BFR p.98 et Précis p.49

Un milieu magnétique peut être décomposé en petits éléments volumiques (à l'échelle mésoscopique), qui possèdent chacun un moment dipolaire magnétique (orbital et spin). On définit le vecteur aimantation  $\vec{M}$  :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV} \quad (1)$$

où  $d\vec{m}$  est le moment magnétique résultant dans un volume élémentaire  $dV$ . L'aimantation s'exprime en  $A \cdot m^{-1}$  (densité volumique de moment dipolaire).

Nous savons déjà qu'il est possible d'associer un moment magnétique à une boucle de courant. Or le vecteur aimantation  $\vec{M}$  est un moment magnétique volumique. Donc nous pouvons lui associer une distribution de courants de densité volumique  $\vec{j}_{\text{lié}}$  <sup>1</sup> définie comme :

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

L'équation de Maxwell-Ampère (dans un milieu non polarisé) se ramène donc à :

$$\text{rot}(\vec{B}) = \mu_0 (\vec{j}_{\text{libre}} + \vec{j}_{\text{lié}}) = \mu_0 \vec{j}_{\text{libre}} + \mu_0 \text{rot}(\vec{M}) \quad (3)$$

donc :

$$\text{rot} \left( \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) = \vec{j}_{\text{libre}} \quad (4)$$

---

<sup>1</sup>BFR p.105

- Ces courants sont souvent qualifiés de "fictifs", car ce ne sont pas des courants macroscopiques (ou courants de convection) de porteurs de charges libres dans la matière.
- Une démonstration de la relation ci-dessus se fait à partir des potentiels vecteurs à partir de la constatation qu'à l'échelle macroscopique rien ne distingue un champ magnétique dû à des dipôles magnétiques d'un champ dû à des courants. (voir BFR p.103)

On définit alors le champ  $H$ , appelé **induction magnétique** (qui s'exprime en  $A\ m^{-1}$  )

$$\boxed{\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}} \tag{5}$$

L'intérêt de  $H$  réside dans le fait qu'il n'est lié qu'à  $\vec{j}_{\text{libre}}$ , grandeur dont nous mesurons directement l'existence sous la forme de  $I_{\text{libre}}$  dans les expériences, à l'aide d'un ampèremètre.

## 1.2 Relation constitutive

Mauras p.249 et Précis p.53

Nous considérons ici un milieu magnétique linéaire isotrope : les vecteurs  $H$  et  $M$  y sont colinéaires. La **relation constitutive** recherchée dépend alors du matériau :

- **Matériaux linéaires :**

- **matériau paramagnétique :**  $M = \chi_m H$  avec  $\chi_m > 0$ . La relation est linéaire et en ordre de grandeur  $\chi_m \approx 10^{-3}$  à  $10^{-6}$  (sans unité).
- **matériau diamagnétique :**  $M = \chi_m H$  avec  $\chi_m < 0$ . La relation est linéaire et en ordre de grandeur  $|\chi_m| < 10^{-4}$ .

Donc pour ces deux matériaux, pour qu'il y ait une aimantation, il faut imposer un champ  $B$  extérieur. **Comment expliquer les aimants permanents ?**

- **Matériau non linéaire <sup>2</sup> :**

- **matériau ferromagnétique :** la relation entre  $M$  et  $H$  n'est pas linéaire. On peut en rendre compte en écrivant quand même  $M = \chi_m H$  mais avec  $\chi_m$  qui dépend de  $H$ .

$\chi_m > 0$  et peut atteindre des valeurs très élevées  $\approx 10^5$  .

On écrit donc dans ce cas :

$$\boxed{M = \chi_m(H) H} \tag{6}$$

Le ferromagnétisme n'existe que dans des corps à structure cristalline<sup>3</sup>, essentiellement des solides (Fe, Ni, Co, leurs alliages), alors que le paramagnétisme et le diamagnétisme existent aussi dans des liquides.

Au-delà d'une certaine température, appelée température de Curie, le matériau ferromagnétique devient paramagnétique.

**Températures de Curie**  $T_c(Fe) = 1043\ K$  ;  $T_c(Ni) = 631\ K$  ;  $T_c(Co) = 1400\ K$

Finalement, comme  $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$ , alors :

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\vec{H} \tag{7}$$

<sup>2</sup>On pourrait citer aussi l'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme Voir le joli tableau de wikipedia [Ici](#)

<sup>3</sup>Vous me direz : et les ferrofluides ? Je réponds, ce sont des suspensions de colloïdes qui sont des petits grains de solide cristallins :

"Les ferrofluides sont des suspensions colloïdales de nanoparticules ferromagnétiques ou ferrimagnétiques d'une taille de l'ordre de 10 nanomètres dans un solvant ou de l'eau. Ces liquides deviennent magnétiques lors de l'application d'un champ magnétique extérieur tout en conservant leur stabilité colloïdale. " Wikipedia.org

où  $\mu_r = 1 + \chi_m$  est la **perméabilité magnétique relative** et  $\mu$  la **perméabilité magnétique absolue** du matériau.

Tr

Dans les milieux conducteurs, nous avons aussi une relation constitutive<sup>a</sup> :  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ .  
 Nous allons pousser plus loin l'analogie entre circuit électrique et circuit magnétique.

---

<sup>a</sup>Ce sont évidemment les courants libres. On est dans un conducteur.

### 1.3 Réluctance magnétique

Tremolet II p.137

Relation	Circuit électrique	Circuit magnétique
Relation constitutive	$\vec{j} = \sigma \vec{E}$	$\vec{B} = \mu \vec{H}$
Conservation du flux	$\text{div } \vec{j} = 0$	$\text{div } \vec{B} = 0$
Flux	$i = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$	$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$
Circulation (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	$R = \int_C \frac{dl}{\sigma S}$	$R_m = \int_C \frac{dl}{\mu S}$

Ainsi, les **lignes de champ magnétique** suivent le **chemin de moindre réluctance**<sup>4</sup>.  
 Comme  $\mu^{\text{ferro}} \gg \mu^{\text{air}}$ , alors  $R_m^{\text{ferro}} \ll R_m^{\text{air}}$  : **un matériau ferromagnétique canalise les lignes de champ magnétique.**

## 2 Aimantation d'un matériau ferromagnétique

### 2.1 Cycle d'hystérésis

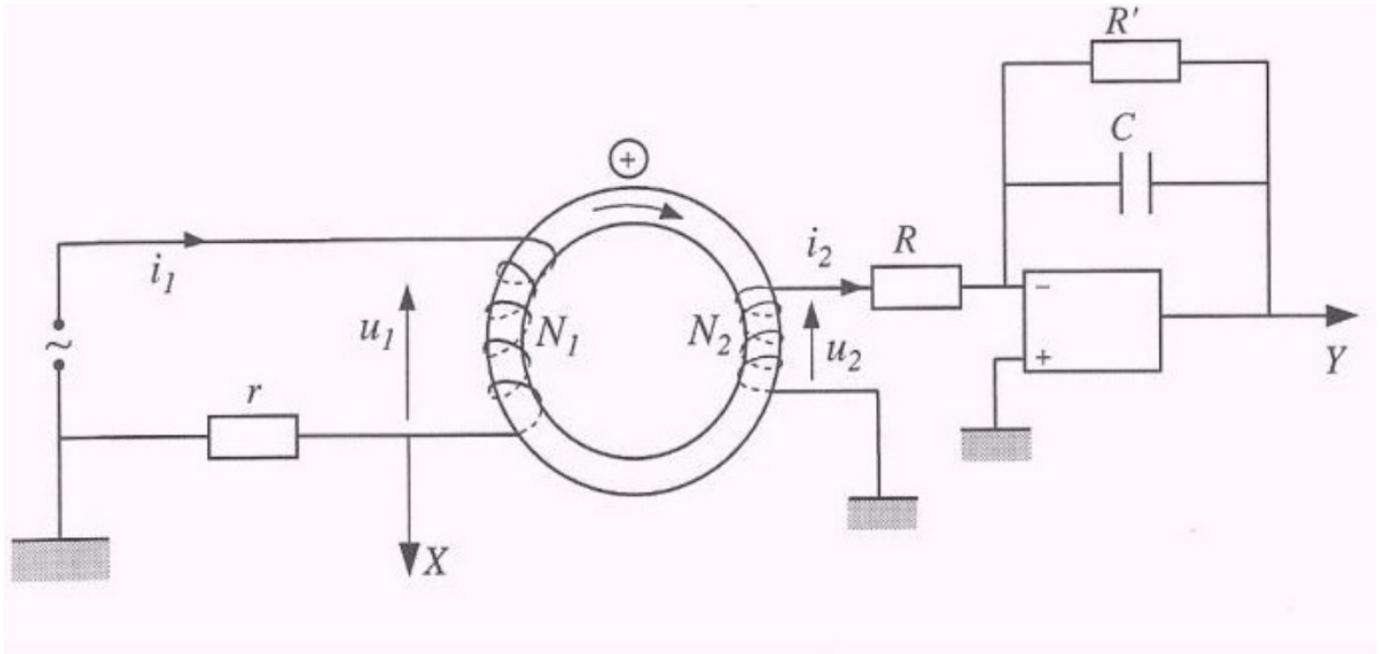
Objectif : Caractériser le cycle d'hystérésis correspondant à la relation entre  $H$  et  $B$ . On va donner la part belle à l'expérimental.

#### 2.1.1 Montage expérimental

Précis p.55 et Duffait p.90 pour un rappel sur le montage intégrateur.

Il nous faut créer une excitation  $\vec{H}$  facilement mesurable en tout point du milieu ferromagnétique isotrope homogène (théorème d'Ampère). Pour mesurer le champ magnétique  $\vec{B}$  dans la matière, nous utiliserons un milieu à géométrie particulière qui nous permettra de connaître la direction et le sens du champ dans le milieu.

<sup>4</sup>L'auteur de ce poly désapprouve cette analogie. Pour lui, la notion de réluctance met sous le tapis la non-linéarité. Il faudrait se souvenir que  $\mu(H)$  !



### Cycle d'hystérésis du ferromagnétisme

Référence: C. Garing – Milieux Magnétiques – Ed. Ellipses

Figure 1: Principe du montage pour le cycle d'hystérésis Le x et y sont là pour dire où planter les points de mesures par rapport à la masse pour les tensions  $u$  et  $y$  respectivement

- **Mesure de l'excitation magnétique**

On applique le théorème d'Ampère à un contour moyen de rayon  $\rho_e$ , situé dans le tore :

$$2\pi\rho_e H(t) = N_1 i_1(t) \tag{8}$$

car  $N_2 \times i_2$  est négligeable (deux arguments :  $N_2 \ll N_1$  donc courants faibles car rapport de transformation grand ou alors parce que la charge en sortie a une forte impédance). Or, aux bornes du rhéostat :  $u = r i_1$  (!!! sur la figure  $u = x - 0$ ), donc :

$$H(t) = \frac{N_1}{2\pi\rho_e} \frac{u(t)}{r} \tag{9}$$

$u(t)$ , la tension aux bornes du rhéostat est donc l'image de l'induction magnétique  $H(t)$  à un coefficient multiplicatif près.

- **Mesure du champ magnétique**

Pour déterminer  $B(t)$ , nous utilisons un deuxième enroulement de  $N_2$  spires au secondaire. Le flux de  $B$  à travers cette bobine dépend du temps : il y a induction. Il existe donc aux bornes du secondaire une force électromotrice  $e_2(t)$  telle que :

$$e_2(t) = -\frac{d\phi}{dt} \tag{10}$$

Dans le montage, le courant  $i_2$  au secondaire est négligeable devant les autres courants. On a alors ( !!! sur la figure  $V_e = u_2$  ) :

$$V_e(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB(t)}{dt} \quad (11)$$

où  $S$  représente l'aire de la section du tore. On voit que si on intègre  $V_e$ , on récupère une grandeur proportionnelle à  $B$ . C'est la raison d'être de l'intégrateur. En sortie de l'intégrateur, on a alors ( !!! sur la figure  $V_s(t) = y(t) - 0$  ) :

$$V_s(t) = \frac{1}{RC} \int u_2(t) dt = -\frac{N_2 S}{RC} \int \frac{dB(t)}{dt} dt = -\frac{N_2 S}{RC} B(t) + K \quad (12)$$

où  $K$  est une constante qui nous embête.

Il faut alors annuler cette constante qui provient de la dérive de l'intégrateur. La mise à zéro est effectuée en déchargeant le condensateur dans une résistance en parallèle. On obtient alors  $B(t)$  par la relation :

$$B(t) = -\frac{RC}{N_2 S} V_s(t) \quad (13)$$

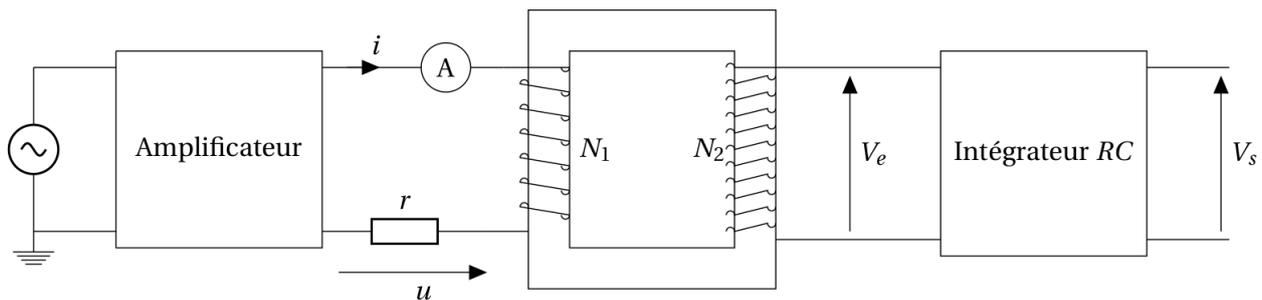


Figure 2: Montage pour le cycle d'hystérésis tiré du poly de Jérémy Ferrand

### Expérience :

Précis p.55 Mais je recopie ici un protocole du poly de Jérémy Ferrand :

Réaliser le montage de la figure (2) en utilisant :

- le tore<sup>a</sup> de ferrite P66.4/4 (tore à base carrée de côté  $a = 12\text{mm}$  et de diamètre  $d = 52\text{mm}$ , soit  $S = a^2$  et  $l = \pi d$ , avec  $N_1 = 100$  et  $N_2 = 500$ ) et les éléments décrits précédemment.
- Le primaire est alimenté par un GBF, suivi d'un amplificateur de puissance (HSA 4005 P47.6 ou 4011 P47.5) nécessaire pour atteindre des intensités suffisantes permettant d'observer le cycle d'hystérésis du matériau
- $r$  est un rhéostat P61.3 de résistance  $r = 33\ \Omega$
- intégrateur RC, on utilisera en pratique le boîtier P42.45, alimenté par le boîtier P42.39. Pour décharger le condensateur, il suffit d'appuyer sur un bouton dessus.

**!!! Attention aux notations qui ne sont pas les mêmes entre les deux figures !!! : ici  $y$  c'est  $V_s$  et  $u$  c'est bien la tension aux bornes du rhéostat en  $x$ .**

Utiliser l'entrée DC de l'intégrateur et régler sa résistance interne sur  $R = 10\text{ k}\Omega$ . Régler l'amplificateur sur un gain de 10, avec une impédance d'entrée  $Z_{in} = 600\ \Omega$ , et le rhéostat sur  $r \approx 33\ \Omega$ . Afficher  $u$  sur la voie 1 d'un oscilloscope et  $V_s$  sur la voie 2.

Alimenter le circuit avec une tension sinusoïdale à 1 Hz en augmentant progressivement la tension de 0 à 500 mV. Passer en mode XY pour observer l'allure du cycle d'hystérésis  $B(H)$ . On pourra utiliser le mode Persistance de l'oscilloscope.

Augmenter la tension du GBF jusqu'à 2 V pour observer la saturation du matériau. Mesurer les tensions correspondantes au **champ rémanent**  $B_r$  et à l'**excitation coercitive**  $H_c$  du matériau à partir du cycle<sup>b</sup>, en déduire  $B_r$  et  $H_c$  :

$$B(t) = -\frac{RC}{N_2 S} V_s(t) \quad H(t) = \frac{N_1}{2\pi\rho_e} \frac{u(t)}{r} \quad (14)$$

<sup>a</sup>On peut aussi prendre un tore ferromagnétique mais il est plus complexe d'avoir son rayon et sa surface

<sup>b</sup>Le cycle nous permet également d'estimer les pertes volumiques  $P_v$  dues à l'hystérésis du matériau. Elles correspondent à l'aire balayée au cours d'un cycle

- Mumétal (matériau doux) : 77% Ni, 16% Fe, 5% Cu, 2% Cr.
- Alnico 5 (matériau dur) : 51.5% Fe, 13.5% Ni, 24% Co, 8% Al, 3% Cu).

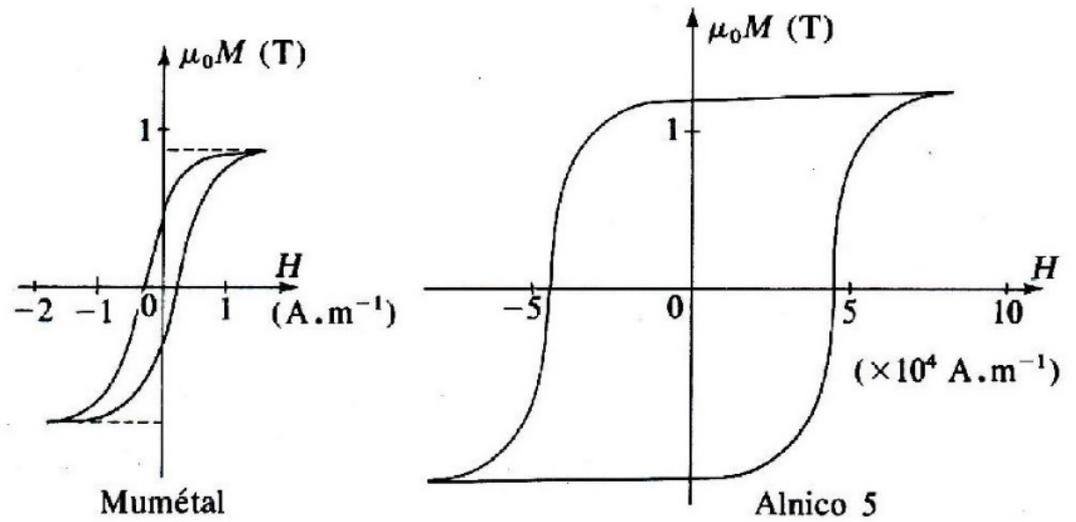
### 2.1.2 Observations et définitions

Grâce au courant au primaire, nous avons imposé une induction magnétique dans le matériau, qui a réagi en livrant la réponse  $B(H)$ . On remarque que :

- Le cycle varie entre 2 valeurs extrêmes  $-B_{sat}$  et  $+B_{sat}$  qui dépendent de l'amplitude du courant d'entrée. On a  $B_{sat} = \mu_0 H + \mu_0 M_{sat}$ . On parle alors d'**aimantation de saturation**. Elle dépend de la température (elle décroît avec  $T$  et devient nulle pour  $T > T_{Curie}$ ) et du matériau, en particulier de sa pureté.
- Lorsque  $H = 0$ ,  $B$  n'est pas nul (donc l'aimantation non plus). C'est le **champ rémanent** :  $B_r = \mu_0 M_r$ . C'est la technique pour fabriquer des aimants permanents !
- Pour annuler le champ magnétique  $B$ , il faut appliquer une induction, non nulle appelée **excitation coercitive** et noté  $H_c$ .
- Le **phénomène d'hystérésis**<sup>5</sup> traduit une irréversibilité des processus d'aimantation. La valeur de  $B$  dépend de  $H$ , mais aussi de l'**histoire magnétique**, c'ad de l'aimantation antérieure du matériau.
- Matériaux dur/doux : la taille du cycle diffère. Voir l'exemple en figure (3).
  - **Matériaux durs** : fort champ coercitif.  
Exemple : acier. Leur magnétisme rémanent est difficile à supprimer et ces matériaux sont donc utilisés pour faire des aimants permanents.

<sup>5</sup>Étymologiquement, *hystérésis* signifie "être en retard".

CYCLES D'HYSTÉRÉSIS DU MUMÉTAL ET DE L'ALNICO 5



Fichier: LY15PEM402

Titre: Cycles d'hystérésis du Mumetal et de l'Alnico 5

Source: Electromagnétisme 4, M.Bertin, J-P.Faroux, J.Renault, fig 11, p186, Dunod.

Cote: EM4

Figure 3: Cycles d'hystérésis pur un matériau doux à gauche dur à droite.

- **Matériaux doux** : faible champ coercitif  $H_c \leq 100 \text{ A m}^{-1}$  .  
Exemple : Fe, 3% Si. Leur aimantation est facilement modifiée.

ODG des aimantations à saturation à 20°C :

Matériau	$M_{sat} \text{ (A.m}^{-1}\text{)}$	$\mu_0 M_{sat} \text{ (T)}$	$T_c \text{ (K)}$
Fer	$1.7 \cdot 10^6$	2.14	1043
Cobalt	$1.4 \cdot 10^6$	1.76	1393
Nickel	$0.48 \cdot 10^6$	0.6	631

Figure 4: Voir BFR p175

ODG des champs rémanents et excitation coercitive à 20°C :

## 2.2 Aspects énergétiques

Précis p.64

Matériau	$B_r$ (T)	$H_c$ ( $A.m^{-1}$ )
Acier	1.0	$4 \cdot 10^3$
Fe, 3% Si	1.5	8

Figure 5: BFR p.184

La présence d'une hystérésis traduit une perte énergétique lors du parcours du cycle. Nous allons 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.

Soit  $P_1$  la puissance instantanée consommée dans l'enroulement primaire. Aux bornes de cette bobine réelle, la tension est  $u_1$ . Elle est parcourue par le courant  $i_1$ . On modélise la bobine réelle comme un enroulement idéal de  $N_1$  tours en série avec une résistance  $R_1$ .  $R_1$  est la résistance des fils. Le générateur impose une tension periodique à la période  $T$ .

$$P_1(t) = u_1(t)i_1(t) \quad \text{avec : } u_1(t) = R_1i_1(t) - e_1 = R_1i_1(t) + N_1\frac{d\phi_1}{dt} \quad (15)$$

Donc :

$$P_1 = R_1i_1^2 + N_1i_1\frac{d\phi_1}{dt} \quad (16)$$

Or :

$$i_1(t) = \frac{2\pi\rho_e}{N_1}H(t) \quad N_1\frac{d\phi_1}{dt} = N_1S\frac{dB}{dt} \quad (17)$$

donc :

$$P_1(t) = R_1i_1^2 + 2\pi\rho_eSH\frac{dB}{dt} \quad (18)$$

La puissance moyenne est donc :

$$\langle P_1 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T P_1(t)dt = \underbrace{\frac{1}{T} \int_0^T R_1i_1^2 dt}_{P_J} + \underbrace{\frac{1}{T} \int_0^T 2\pi\rho_eSH\frac{dB}{dt} dt}_{P_F} \quad (19)$$

- Le premier terme est la puissance Joule  $P_J$  consommée dans la résistance d'entrée<sup>6</sup>.
- Le second terme est appelé **pertes fer**.  $2\pi\rho_eS$  est le volume  $V$  du tore. On peut le réécrire :

$$P_F = \frac{1}{T} \int_0^T 2\pi\rho_eSH\frac{dB}{dt} dt = \frac{1}{T} \int_0^T 2\pi\rho_eSHdB \quad (20)$$

Le produit  $dA = H(t)dB(t)$  est l'aire élémentaire sous la courbe  $H(B)$ . C'est une courbe paramétrée par le temps. Donc  $A = \int_0^T HdB$  est l'aire comprise à l'intérieur du cycle. Finalement :

$$P_F = \frac{V \times A}{T} \quad (21)$$

Cette puissance est perdue à chaque fois que le matériau parcourt son cycle, c'est à dire à chaque période du signal excitateur.

<sup>6</sup>On peut sortir  $R_1$ . L'intégrale qui reste est le carré de la valeur efficace du courant, mais je ne trouve pas cela très important.

On s'attend donc bien à ce que les pertes soient proportionnelles à la période du signal. **L'aire du cycle d'hystérésis représente**, à un facteur numérique près, **l'énergie volumique dissipée lors d'un cycle**.

BFR p.188

Dans les systèmes où aimantations et désaimantations sont fréquentes, on cherche à diminuer ce processus dissipatif d'énergie. Pour cela on utilise des alliages à faibles pertes donc ayant un cycle d'hystérésis d'aire petite : des matériaux doux.

## 2.3 Exemple en industrie et ODG

Pour les transformateurs, on utilise industriellement des tôles en fer au silicium (Fe, 3% Si) pour lesquels les pertes sont  $P_F \approx 100 \text{ J.m}^{-3}$  et par cycle pour un champ maximal  $B_m \approx 1 \text{ T}$ .

Nature des pertes fer : - **Pertes par courants de Foucault** : pour les éviter, on fabrique des matériaux feuilletés (empilage de tôles séparées par un vernis isolant). - **Pertes par hystérésis** : Le déplacement des domaines de Weiss et leur destruction sont responsables d'une dissipation énergétique.

Tr

Voilà pour les observations expérimentales. Maintenant, il nous faut chercher à comprendre un peu cette hystérésis.

## 2.4 Interprétation mésoscopique

BFR p.176



### Expérience :

Notice

Fixer l'oculaire  $\times 6$  sur le microscope polarisant P16.29. Retirer le second polariseur (il faut tirer la lame en métal du côté où est inscrit LYON de l'étiquette jaune). Éclairer le miroir avec une source lumineuse (lampe quartz-iode et filtre anticalorique par exemple). Croiser le premier polariseur (au-dessus du miroir) pour atteindre l'extinction. Placer une lame de grenat ferrimagnétique P66.8 sur la platine (de préférence l'échantillon n°1 derrière lequel est dessiné un sourire). Réaliser la mise au point en déplaçant l'objectif pour observer les domaines de Weiss.

Montrer l'évolution des domaines<sup>a</sup> lorsque l'on approche un aimant. (Polarisation par effet Faraday<sup>b</sup>).

Il y aurait aussi moyen de projeter l'image sur le vidéoprojecteur.

REMARQUE : L'obtention d'une image nette des domaines de Weiss avec la caméra est assez long et difficile.

<sup>a</sup>Une partie des domaines apparaissent sombre et l'autre partie lumineuse.

<sup>b</sup>Dans la plupart des milieux diélectriques transparents, lorsqu'on impose un champ magnétique dans

la direction de propagation d'une lumière polarisée, cela fait tourner la direction de polarisation.

### 2.4.1 Domaines d'aimantation spontanée

L'interprétation du ferromagnétisme est basée sur l'hypothèse, effectuée en 1907 par le physicien français Pierre Weiss, qu'un matériau ferromagnétique est divisé en domaines, appelés **domaines de Weiss**.

Chacun de ces domaines est aimanté, c'est-à-dire que **les dipôles magnétiques qu'il contient sont tous orientés dans la même direction ; l'aimantation d'un tel domaine est appelée aimantation spontanée**.

Lorsque l'échantillon n'est pas aimanté, les différents domaines (taille typique : 10 - 100  $\mu m$ ) ont des orientations très diverses et l'aimantation macroscopique résultante est nulle.

#### Visualisation des domaines par des poudres magnétiques

La mise en évidence expérimentale la plus directe des domaines est celle des poudres magnétiques, due à Francis Bitter en 1931. Elle consiste à disposer, à la surface polie du matériau ferromagnétique, une suspension colloïdale de particules magnétiques (par exemple  $Fe_3O_4$ ) : ces particules s'aimantent et sont alors soumises à des forces qui les attirent vers les zones de champ intense.

Ces zones sont les frontières entre les domaines de Weiss, et les particules s'y rassemblent en les dessinant. Visibles au microscope, elles indiquent que les dimensions typiques des domaines sont  $\approx 10 - 100 \mu m$ .

#### Directions d'aimantation préférentielles

Les directions d'aimantation spontanées correspondent à des orientations préférentielles, qui dépendent de la structure du cristal.

Par exemple pour le fer, qui cristallise dans le système cubique centré, ces directions sont celles des arêtes du cube. Pour le nickel, qui cristallise dans le système cubique faces centrées, ce sont les diagonales du cube.

**Les frontières entre les domaines ("parois") sont les zones où l'aimantation change de direction. Leur épaisseur typique est  $\approx 0.1 \mu m$  (quelques centaines de distances interatomiques).**

Exemple : retournement de  $180^\circ$  de l'aimantation = "parois de Bloch".<sup>7</sup>

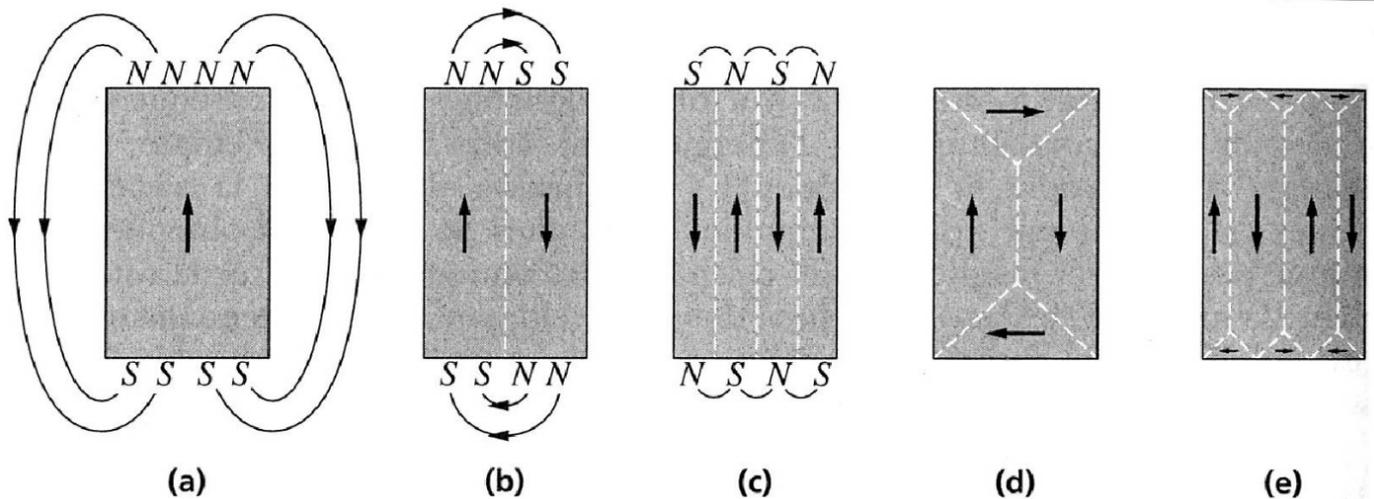
### 2.4.2 Effet d'un champ magnétique externe

Lorsqu'on applique à l'échantillon un champ magnétique croissant, les domaines, qui possèdent une aimantation de même orientation que celle du champ, sont énergétiquement favorisés et croissants, au détriment des autres qui diminuent alors de volume. Cela s'effectue par déplacement des parois qui limitent les domaines. C'est pourquoi sur les courbes d'aimantation, on observe des marches d'escalier : voir figure (7).

- **Pour les champs faibles, ces déplacements sont réversibles.** Il y a apparition d'une aimantation macroscopique non nulle.

<sup>7</sup>A la surface d'un ferromagnétique, on observe des "**domaines de fermeture**" qui diminuent ou même annulent le champ créé à l'extérieur. ces domaines de fermeture ont des formes qui dépendent des directions de facile aimantation du cristal.

## Existence des domaines de Weiss



Agrégation de Physique	Réf : 34 - 003
Ouvrage : Physique de l'état solide (7ème édition) Auteur(s) ou collection : Charles Kittel, Dunod.	

- Pour des champs intermédiaires, il y a toujours déplacement des parois, certains domaines grossissent et l'aimantation croît. Mais ces déplacements sont devenus irréversibles, les parois rencontrent des obstacles, tels que les impuretés du cristal ou des défauts de la structure cristalline, sur lesquels elles se bloquent momentanément : les domaines, donc aussi l'aimantation, croissent alors par sauts discontinus. Il y a irréversibilité au sens thermodynamique du terme.
- On atteint la saturation quand il n'y a plus de parois.<sup>8</sup>

Ce sont les défauts du matériau ferromagnétique qui sont responsables de l'irréversibilité du processus d'aimantation par déplacement de parois.

Tr  
 | Le ferromagnétisme est très utilisé dans la vie courante. Nous allons voir quelques applications intéressantes de ses propriétés.

<sup>8</sup>Enfin, pour un champ plus élevé, les domaines deviennent moins nombreux, mais le champ n'est pas a priori dirigé selon l'une des directions de facile aimantation du cristal (directions qui sont initialement celles d'aimantation spontanée). Il se produit alors une variation de la direction d'aimantation spontanée des domaines, visant à s'aligner sur celle du champ. Cette augmentation de l'aimantation dans le sens du champ se fait donc par rotations essentiellement discontinues, avec disparition des dernières parois, jusqu'à ce que la saturation macroscopique de l'échantillon soit atteinte.

## 3 Quelques applications du ferromagnétisme

### 3.1 Stockage de données

La Physique par les objets quotidiens p.100 et Taillet

Un disque dur ( voir 8) est constitué d'un ensemble de plateaux recouverts d'une couche ferromagnétique qui stocke les données sous forme binaire. Les têtes d'écriture sont des bobinages miniatures parcourus par un courant électrique : chacune aimante les zones d'un plateau dans un sens ou un autre, en fonction du sens du courant. 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.

- Support magnétique : ferromagnétique dur (pour que les données restent stockées longtemps)
- Tête d'écriture : ferromagnétique doux (pour qu'il réagisse facilement aux bits codés)<sup>9</sup>

Le principe utilisé pour lire les données est la magnétorésistance géante (GMR), découverte en 1988 par le français Albert Fert, prix Nobel en 2007. Le champ magnétique joue sur la résistance d'un matériau, le capteur étant très sensible et localisé, les disques durs sont de plus en plus miniaturisés.

### 3.2 Paléomagnétisme

Tremolet II p.397

Paléomagnétisme : étude des variations du champ magnétique terrestre sur des échelles de temps allant de qqes milliers d'années à qqes milliards d'années. Le paléomagnétisme s'appuie sur l'étude de l'aimantation des roches magnétiques qui se sont déposées sur des couches sédimentaires à différentes époques, en gardant la trace de l'orientation et de l'amplitude du champ magnétique ambiant (ODG :  $10^{-4} T$ ).

Le champ magnétique terrestre<sup>10</sup> est majoritairement dipolaire, avec une intensité à la surface de  $1 G = 10^{-4} T$ . Il existe des roches ferromagnétiques (la magnétite par exemple) qui, lors de leur formation, s'aimantent selon la direction du champ magnétique ambiant (voir Taillet)

---

<sup>9</sup>En fait, lorsque la tête de lecture se ballade sur le disque, elle ne voit que le passage d'un 0 à un 1 ou inversement. En effet, la résistance est sensible au gradient fort de champ magnétique. En cela, on rejoint le fonctionnement des lecteurs DVD laser qui détectent le changement de 0 à 1 par un changement de différence de marche et donc d'intensité.

Cependant, il ne semble pas possible ici de savoir si on a un 0 ou un 1 de codé; Je pense qu'il y a une clé pour tester et calibrer la piste sur une séquence connue sur une certaine plage du disque qui sert de référence.

<sup>10</sup>C'est le moment de la pause astrophysique. Le champ magnétique terrestre dévie le plasma d'ions-électrons que le Soleil nous envoie à la fois de façon continue (le vent solaire), ou lors d'épisodes plus violents (les éruptions solaires). Ces particules de haute énergie sont nocives pour la santé, leur effet étant similaire à une exposition à de la radioactivité (elles posent d'ailleurs problème pour les voyages spatiaux). Une inversion du champ magnétique implique un moment où il s'annule, et peut donc être potentiellement dangereuse... On peut toutefois se rassurer en constatant qu'il n'y a pas de corrélation entre inversion du champ et extinction massive dans l'échelle des temps géologiques ! Le plus préoccupant en cas d'affaiblissement du champ magnétique terrestre serait une protection moindre contre les effets destructeurs des éruptions solaires sur les appareils électriques, car le plasma solaire crée des courants dans la ionosphère, qui produisent des champs magnétiques fluctuants, qui à leur tour induisent des courants dans les lignes haute-tension par exemple. Un tel événement a entraîné une coupure de courant de plusieurs heures dans tout le Québec en 1989, et aurait des conséquences encore plus désastreuses aujourd'hui. Tout ça pour dire que le paléomagnétisme, c'est important.

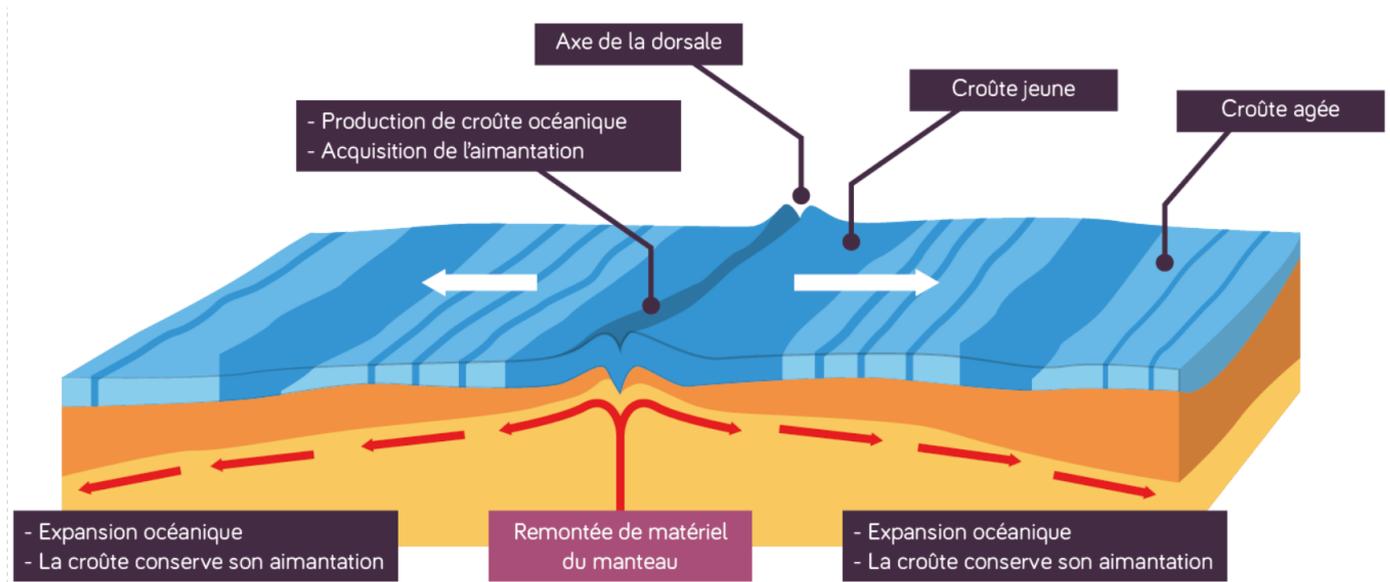


Figure 6: Schéma de l'expansion océanique. On représente ici le fond des océans au niveau des failles océaniques.

par exemple). Ce dernier peut être le champ magnétique terrestre. Si on connaît l'âge de ces roches, et si elles n'ont pas changé d'orientation, on peut alors obtenir l'orientation du champ magnétique terrestre en fonction du temps.

Un des exemples les plus fameux (6) concerne les roches de la croûte océanique<sup>11</sup> :

lorsque l'on s'éloigne d'une dorsale, l'aimantation de la croûte varie et s'inverse en fonction de la distance. On en déduit que le champ magnétique terrestre inverse régulièrement sa polarité. Ces mesures, effectuées dans les années 60, ont été une des meilleures preuves de l'étirement des dorsales océaniques (les mesures sont faites en promenant des sondes magnétiques au bout de câbles, à partir de bateaux). Encore mieux : une fois les inversions cartographiées et datées, on peut en déduire la vitesse d'extension de n'importe quelle dorsale.

Ordres de grandeur :

Inversion du champ magnétique terrestre tous les 750 000 ans environ, l'inversion en elle-même prendrait  $\approx 1000$  ans<sup>12 13</sup>.

## Conclusion

Au cours de cette leçon, nous avons découvert une nouvelle famille de matériaux : les corps ferromagnétiques. Ils sont caractérisés par une susceptibilité magnétique très forte, qui donne

<sup>11</sup>Des roches de basalte, contenant de la magnétite ( $Fe_3O_4$ , matériau ferromagnétique), se forment à l'issue de la dérive des continents au fond des océans. La température de Curie de la magnétite étant de  $580^\circ C$ , on a apparition du ferromagnétisme à température ambiante. Au contact de l'eau des océans, la lave se refroidit et les domaines vont s'orienter dans le sens du champ magnétique terrestre.

<sup>12</sup>Rq : les plus vieux planchers océaniques ont 180 Ma.

<sup>13</sup>Remarque : le champ magnétique terrestre n'est pas produit par un matériau ferromagnétique (pas d'aimant permanent géant), mais par des effets dynamo au sein du noyau de fer liquide. : inversions tous les 750 000 ans en moyenne, avec une statistique de Poisson. L'inversion elle-même prendrait  $\approx 1000$  ans.

naissance à un cycle d'hystérésis ce qui rend le matériau dépendant de son histoire (applications au paléomagnétisme).

Les matériaux 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. 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.

## 4 Annexe

### 4.1 Poêle à induction :

chercher 'Rigorous electromagnetic model of an induction cooking system' ou regarder sur Wikipedia.

Une plaque à induction fonctionne de la façon suivante : une excitation magnétique  $H$  est produite, pénètre dans le fond de la casserole, induit des courants de Foucault (via  $\overrightarrow{rot}(\overrightarrow{E}) = -\partial_t \overrightarrow{E}$  qui produit un champ  $E$  électromoteur, puis et  $\overrightarrow{j} = \sigma \overrightarrow{E}$ , qui chauffent. Il se trouve que la puissance dissipée par unité de surface du fond de casserole est bien plus important si le matériau est magnétique, avec un  $\mu_r$  élevé. Traiter le problème complètement est trop long, mais on peut comprendre pourquoi de façon simple. La résistance (dans le sens de la longueur) d'un matériau de longueur  $L$  et de section  $S$  est :

$$R = \frac{L}{\sigma S} \quad (22)$$

où  $\sigma$  est la conductivité.  $R$  est donc d'autant plus grande que la section  $S$  est faible. Dans le cas de la casserole, les champs ne pénètrent que sur une profondeur égale à  $\delta$ , l'épaisseur de peau :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} \quad (23)$$

La section est donc  $S \propto \delta$ , et la résistance est ainsi  $R \propto 1/(S\sigma) \propto 1/(\sigma\delta)$ , soit encore :

$$R \propto \sqrt{\frac{\mu\omega}{\sigma}} \quad (24)$$

On voit que pour augmenter la résistance de la casserole, et donc la puissance dissipée, il faut une perméabilité magnétique  $\mu$  grande qui diminue la profondeur de peau<sup>14</sup>. Dans les faits, les fonds de casseroles compatibles avec les plaques à induction sont ferromagnétiques. On peut également ajouter qu'un matériau ferromagnétique est placé entre le circuit produisant  $B$  et l'électronique, afin de protéger ce dernier des fluctuations magnétiques.

### 4.2 Première aimantation :

### 4.3 Disque dur

---

<sup>14</sup>Voir Jackson, §8.1, pour la puissance dissipée par unité de surface  $P$  dans un bon conducteur sur lequel arrive une onde électromagnétique, qui est effectivement  $P \propto \mu\omega/\sigma$ . Attention au raisonnement naïf qui serait de dire que  $B$  est  $\mu_r$  fois plus grand dans le matériau que dans le vide (ce qui est vrai je pense), donc  $E$  induit aussi, donc  $j = \sigma E$  aussi, donc la puissance  $P \propto j^2$  est  $\mu_r^2$  fois plus importante. En vrai c'est plus compliqué (à cause de l'effet de peau).

le calcul complet de Jackson montre que  $P \propto \mu_r$ . Après, Jackson suppose que  $H$  à la surface du conducteur est donné, mais ce  $H$  n'est pas forcément celui que le circuit de la plaque envoie... Pour éviter des questions complexes, j'ai choisi de ne pas mettre cette application dans la leçon.

# Courbe de 1ère aimantation et domaine de Weiss

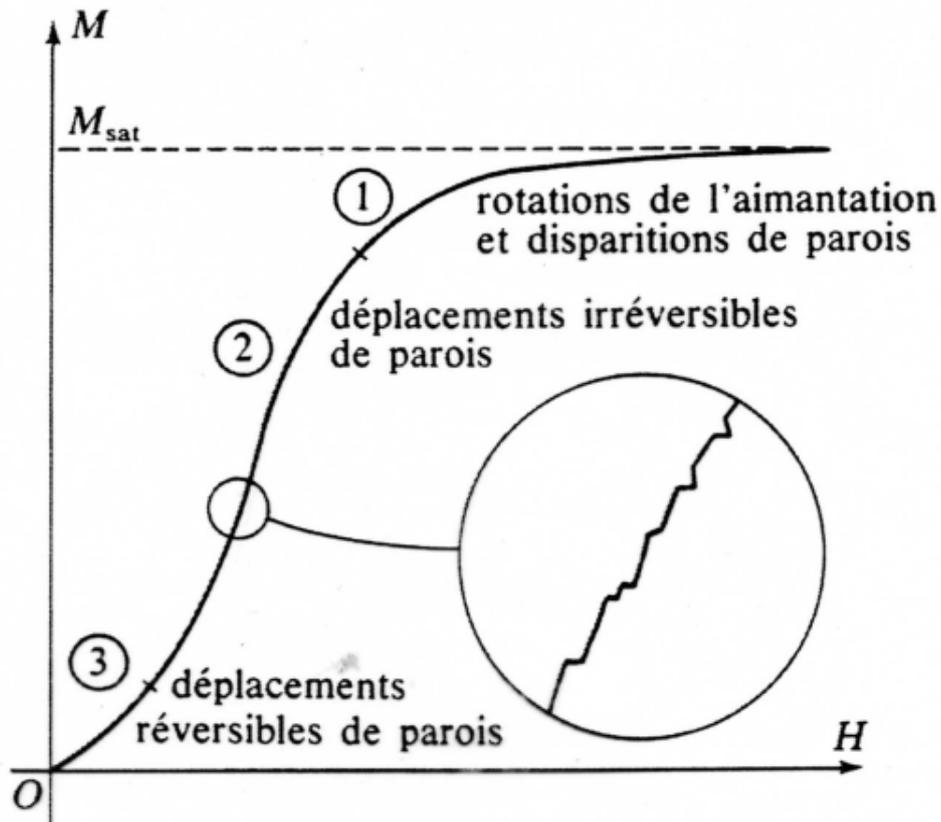


Fig. 7. Interprétation de la courbe de première aimantation.

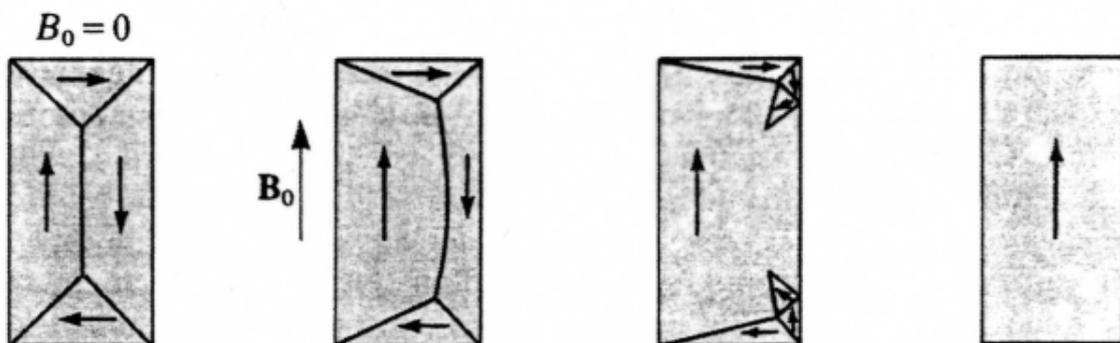
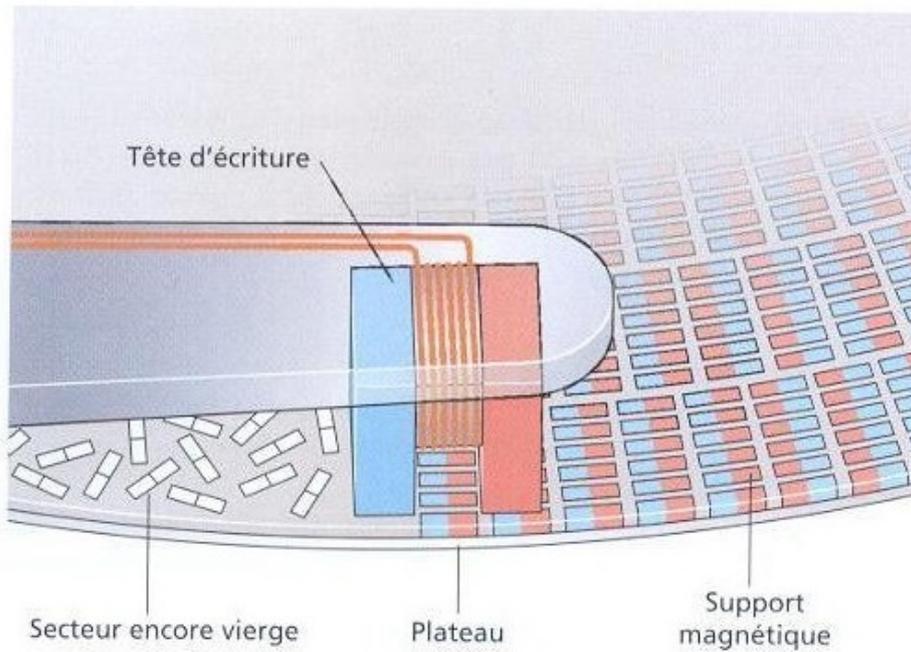
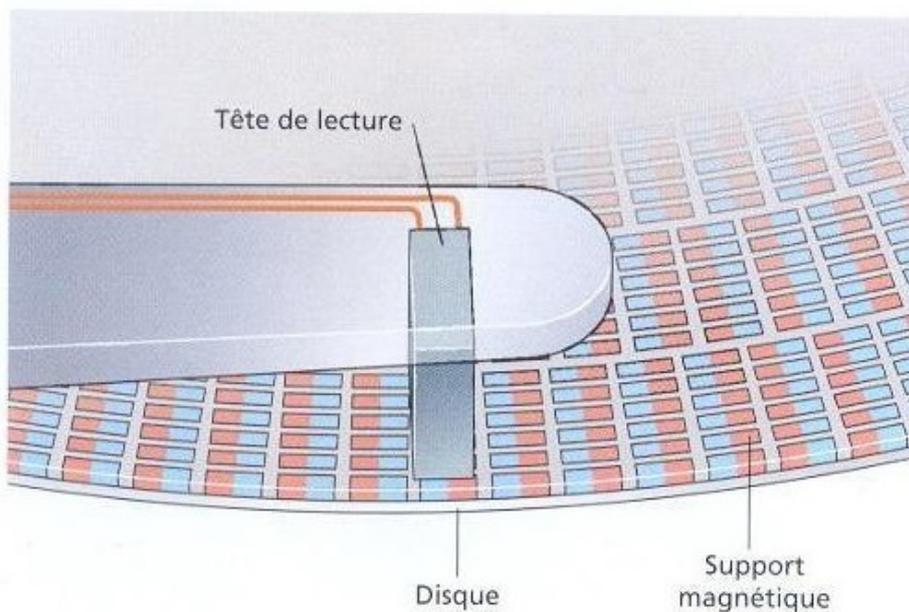


Fig. 6. Exemple de modifications des domaines d'un monocristal de fer sous l'effet d'un champ magnétique externe.

Figure 7: BFR p.179 et p.180

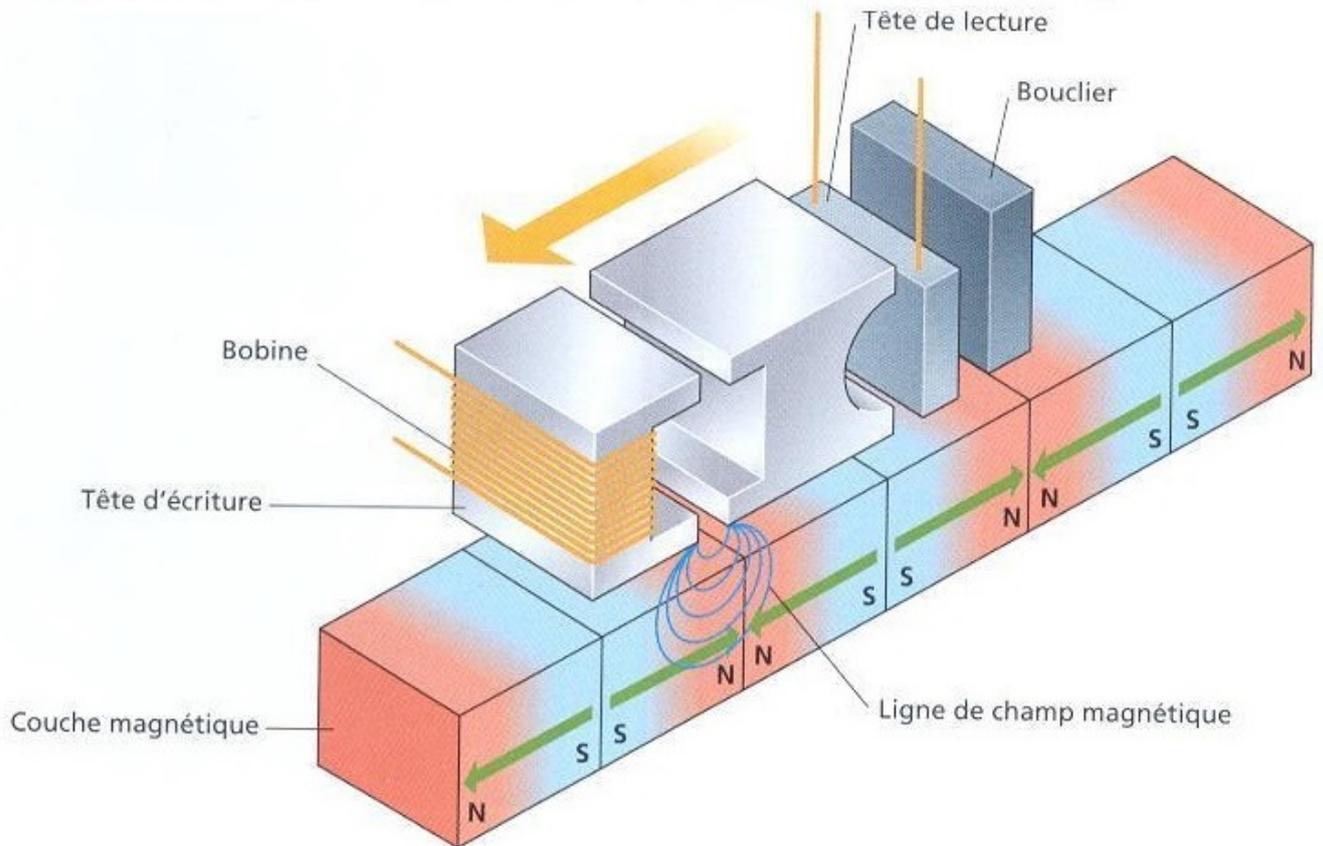


**5** Principe de l'écriture des données sur un matériau ferromagnétique. La direction de l'aimantation à l'intérieur des différentes zones magnétiques est symbolisée par un code de couleurs: en gris sont représentés les domaines dont l'aimantation possède une orientation quelconque, ce qui correspond 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.



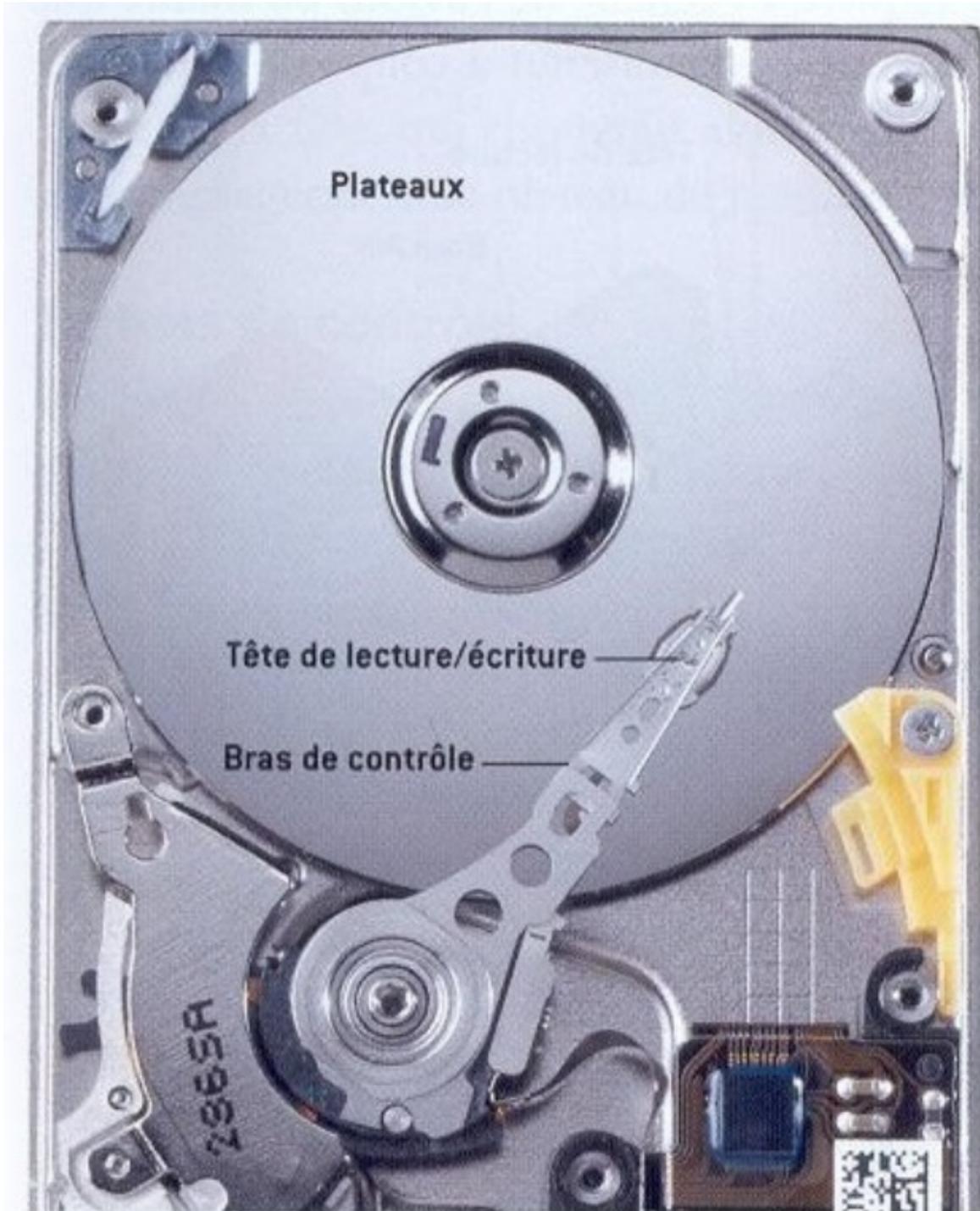
**6** Principe de la lecture des données. La résistance d'un circuit électrique se déplaçant à proximité d'une zone magnétique varie lorsque l'orientation de l'aimantation de la zone change brusquement. Cet effet permet de lire les données inscrites sur le support magnétique.

Figure 8: Principe du disque dur original



**9** Détail de la tête de lecture/écriture. La tête d'écriture est constituée d'une bobine qui produit un champ magnétique suffisamment intense pour orienter les zones de la couche magnétique. La tête de lecture mesure la variation de résistance

provoquée par le changement d'orientation de l'aimantation à l'intérieur de zones contiguës. Le bouclier magnétique limite les interférences avec les zones précédentes lors de la lecture des données.



**7** Cette photo de l'intérieur d'un disque dur montre les éléments indispensables à son fonctionnement : les plateaux et la tête de lecture/écriture à l'extrémité du bras de contrôle. On aperçoit également une partie de l'électronique du contrôleur qui transmet les données à l'ordinateur.