

Niveau : PSI

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

⚡ *Électromagnétisme*, Bertin, Faroux, Renault, Dunod, 1984

⚡ *Électrotechnique PSI*, Brenders, Précis Bréal, 2004

⚡ *Dictionnaire de physique*, Taillet, De Boeck, 2013

Prérequis

- > Équations de Maxwell
- > Milieux diélectriques
- > Électrocinétique

Expériences

- ☞ Domaines de Weiss

Table des matières

1	Ferromagnétisme	2
1.1	Mise en équation	2
1.2	Relation constitutive	3
2	Matériaux ferromagnétiques	3
2.1	Première aimantation	3
2.2	Hystérésis	4
2.3	Interprétation	5
2.4	Aspect énergétique	6
3	Applications	7
3.1	Transformateur	7
3.2	Disque dur	7

Introduction

Les objets magnétiques fascinent par leurs interactions à distance. Ces interactions peuvent se révéler utiles comme dans le cas de la boussole. On retrouve des objets utilisant les propriétés du magnétisme tout autour de nous : les aimants sur les portes de frigo, le disque dur, les moteurs électriques.

Le ferromagnétisme est la propriété qu'ont certains corps de s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, et très souvent de garder par la suite une aimantation importante même en champ nul; ils sont devenus des aimants.

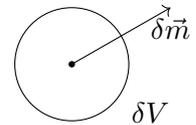
Nous allons ici étudier le ferromagnétisme au niveau macroscopique, ce qui donne la capacité d'une substance à acquérir une forte aimantation, afin d'en saisir les principales caractéristiques et d'en comprendre les applications.

1 Ferromagnétisme

1.1 Mise en équation

Certaines expériences simples, comme celle de l'« aimant brisé », montrent que le magnétisme est une propriété volumique. Lorsqu'un matériau possède un moment magnétique \vec{m} , il est possible de définir une densité volumique de moment magnétique ou aimantation \vec{M} , en $A \cdot m^{-1}$, telle que

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



De plus, nous avons vu qu'une boucle de courant crée un moment magnétique. Nous allons ici associer à l'aimantation une densité volumique de courant d'aimantation, telle que

$$\vec{j}_{lié} = \vec{\nabla} \wedge \vec{M} \quad (2)$$

Nous pouvons alors introduire l'excitation magnétique \vec{H} , relié à l'induction magnétique :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \quad (3)$$

Il y a ici une analogie à faire avec le vecteur polarisation, les charges liées et le champ de déplacement électrique

$$\vec{P} \leftrightarrow \vec{M} ; \rho_{liées} \leftrightarrow \vec{j}_{lié} ; \vec{D} \leftrightarrow \vec{B} ; \vec{E} \leftrightarrow \vec{H} \quad (4)$$

Nous obtenons ainsi une nouvelle forme des équations de Maxwell, dans le cadre de la magnéto-statique

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0 \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j}_{libre} \quad (8)$$

Ce système comporte 11 équations pour 12 inconnues.

Une équation vectorielle compte pour trois équations, et nous cherchons à déterminer quatre vecteurs possédant chacun trois composantes.

↓ *Il manque donc une équation pour fermer le problème. Nous allons alors, compte-tenu de l'analogie vu précédemment, établir une relation constitutive entre \vec{H} et \vec{M} .*

1.2 Relation constitutive

Pour fermer le problème précédent, il nous faudrait, par exemple, relier \vec{M} à \vec{H} ou \vec{B} . Dans le cas le plus général, la relation peut être matricielle, mais nous nous limiterons à des milieux magnétiques, linéaires¹, homogènes et isotropes.

Dans certains matériaux, nous pouvons écrire dans une bonne approximation que $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ avec χ_m la susceptibilité magnétique, constante et positive dans le cas des paramagnétiques ou négative pour les diamagnétiques (voir table 1). Alors,

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \Rightarrow \vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \Leftrightarrow \mu_r = 1 + \chi_m \quad (9)$$

Il y a ici encore une analogie à faire avec la susceptibilité électrique.

$$\chi_e \rightsquigarrow \chi_m ; \epsilon_r \rightsquigarrow \mu_r \quad (10)$$

À ce stade de notre étude, nous ne voyons pas comment un aimant permanent pourrait exister car $\vec{H} = 0 \Rightarrow \vec{M} = 0$. Dans le cas des milieux ferromagnétiques, la susceptibilité magnétique est beaucoup plus grande (voir table 1), et non constante. Alors,

$$\vec{M} = \chi_m(\vec{H}) \vec{H} \quad (11)$$

Matériau (dia)	χ_m	Matériau (para)	χ_m	Matériau (ferro)	χ_m
H ₂ O	$-1,2 \times 10^{-5}$	O ₂	$0,19 \times 10^{-5}$	Fe	~ 200

TABLE 1 – Susceptibilités magnétiques de quelques matériaux.

Exemples de substances ferromagnétiques Le fer, le nickel et le cobalt, utilisés en industrie. Le gadolinium et le dysprosium sont ferromagnétiques à basse température (en dessous, respectivement, de 16 et -180°C). Il existe également des alliages, par exemple le Mumétal (15,7 % Fe, 79 % Ni, 5 % Mo, 0,3 % Mn).

! Toutes les substances ferromagnétiques sont des solides cristallisés.

2 Matériaux ferromagnétiques

Nous allons ici étudier le comportement de χ_m à travers celui de \vec{M} .

2.1 Première aimantation

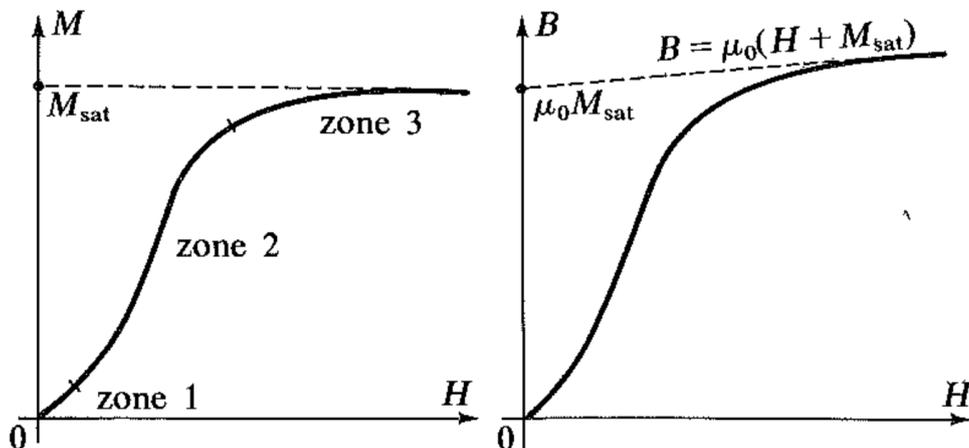


FIGURE 1 – Courbes de première aimantation d'un ferromagnétique.

1. Au sens où il n'apparaît pas de puissances de vecteurs.

Lorsque l'on soumet un ferromagnétique à une excitation magnétique, une aimantation apparaît.

- Aux faibles valeurs de H , $M \propto H$ (zone 1).
- Puis, M croît plus rapidement en fonction de H (zone 2).
- Enfin, pour les valeurs élevées de H ($\sim 10^6 \text{ A m}^{-1} \Rightarrow B = \mu_0 H \sim 1 \text{ T}$), M sature à la valeur M_{sat} (zone 3).

▮ Dans certains alliages, $H_{\text{sat}} \sim 10 \text{ A m}^{-1}$!

Métal	M_{sat} (A m^{-1})	$\mu_0 M_{\text{sat}}$ (T)	T_f (K)	T_p (K)
Fer	$1,70 \times 10^6$	2,14	1 043	1 101
Cobalt	$1,40 \times 10^6$	1,76	1 393	1 410
Nickel	$0,48 \times 10^6$	0,60	631	650

TABLE 2 – Les aimantations à saturation sont données pour 20°C . T_f est la température de Curie ferromagnétique au-delà de laquelle le matériau n'est plus ferromagnétique mais paramagnétique. T_p est la température de Curie paramagnétique.

Pour des températures nettement supérieures à T_f , la susceptibilité paramagnétique χ_m suit une loi de Curie-Weiss

$$\chi = \frac{C^{\text{te}}}{T - T_p} \quad (12)$$

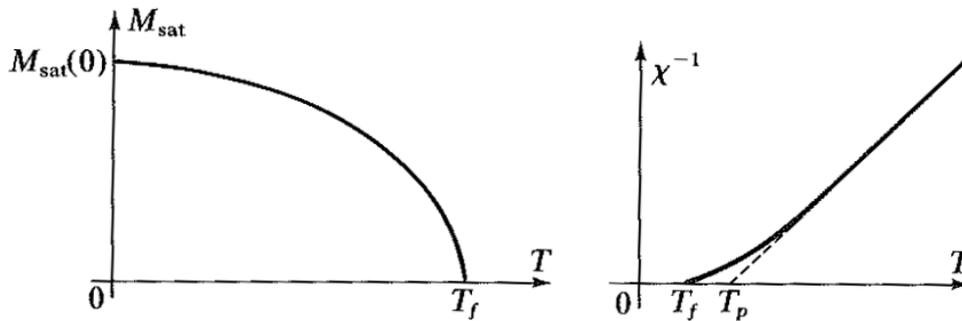


FIGURE 2 – Variations de M_{sat} et de χ_m en fonction de la température.

↓ Nous allons à présent regarder comment réagit le matériau lorsque l'on abaisse H .

2.2 Hystérésis

Si l'on abaisse H , on constate que le champ B , et donc M , ne reprennent pas pour un même champ H les valeurs obtenues précédemment avec H croissant (voir fig. 3).

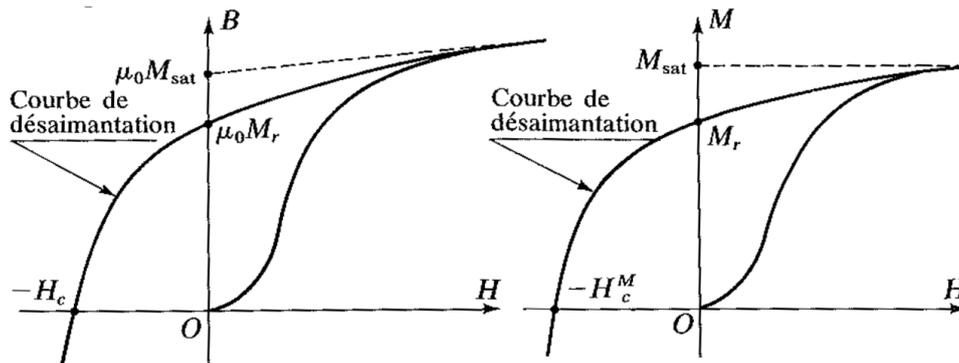


FIGURE 3 – Courbes de désaimantation après saturation, appelées aussi « courbes de recul ».

Plusieurs grandeurs apparaissent :

- l'aimantation rémanente M_r , qui subsiste lorsque $H = 0$ après avoir atteint la saturation ;
- le champ coercitif $-H_c$, nécessaire pour annuler B (et non M !).

L'aimantation dépend donc de l'*historique* de l'échantillon. Il y a manifestement un phénomène irréversible en jeu qui produit de l'*hystérésis*. Pour un champ H alternatif, nous pouvons alors obtenir un cycle.

Deux cas *extrêmes* se dégagent :

Ferromagnétiques doux à faible champ coercitif, inférieur à 100 A m^{-1} . L'aimantation est alors facilement modifiable. Exemple : fer au silicium (2 % de Si).

Ferromagnétiques durs à fort champ coercitif, supérieur à 10^3 A m^{-1} . Ils permettent de réaliser des aimants permanents. Exemple : Alnico 5 (51,5 % Fe, 13,5 % Ni, 24 % Co, 8 % Al, 3 % Cu).

Il est possible d'obtenir une aimantation nulle en appliquant un champ B alternatif à, par exemple, 50 Hz avec une diminution progressive de son amplitude.

↓ *Interprétons les résultats obtenus.*

2.3 Interprétation

2.3.1 Domaines de Weiss

L'interprétation est basée sur l'hypothèse formulée en 1907 par Pierre Weiss, physicien français, selon laquelle un matériau ferromagnétique est divisé en domaines, chacun étant aimanté spontanément.

Les directions spontanées de l'aimantation correspondant à des orientations d'aimantation préférentielles, dépendantes de la structure du cristal. Ainsi pour le fer, qui cristallise en cc, ces directions sont celles des arêtes du cube de la maille conventionnelle. Pour le nickel, en cfc, il s'agit des diagonales du cube.

Lorsque l'échantillon n'est pas aimanté, les différents domaines ont des orientations très diverses, ce qui résulte en une aimantation macroscopique nulle.

Les frontières entre domaines, les « parois », sont des zones où \vec{M} change de direction. Ces parois ont une épaisseur typique de $0,1 \mu\text{m}$. Dans le cas d'un retournement à 180° de l'aimantation, on parle de parois de Bloch (voir fig. 4).

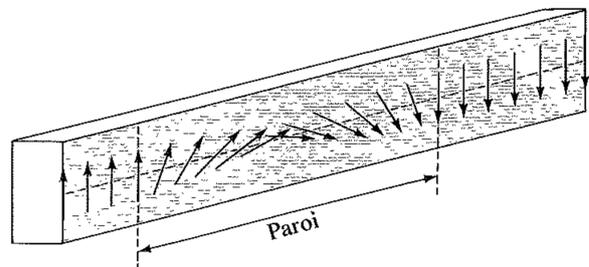


FIGURE 4 – Schéma d'une paroi séparant deux domaines d'aimantations opposées.

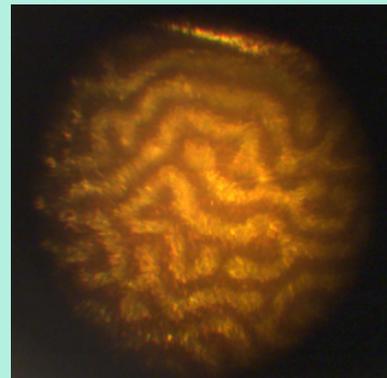
Visualisation des domaines de Weiss

🔍 -

⌚ 5 minutes

Matériel

- Microscope P16.29
- Ueye + caméra 32.17 + objectif 32.16
- Couche de ferrite P66.8
- Analyseur (polariseur intégré au microscope)
- Lampe QI + anticalo (augmenter la luminosité)



La séparation en plusieurs domaines d'aimantations différentes permet de diminuer le champ magnétique créé par l'aimantation et donc l'énergie magnétostatique en résultant. En revanche, la création d'une paroi nécessite un apport d'énergie proportionnel à la surface de ces parois. Il y a donc une *compétition* visant à minimiser l'énergie totale, menant à un état d'équilibre fixant la taille des domaines.

Il est alors possible d'observer des *domaines de fermeture* pouvant diminuer voir annuler le champ extérieur (voir fig 5).

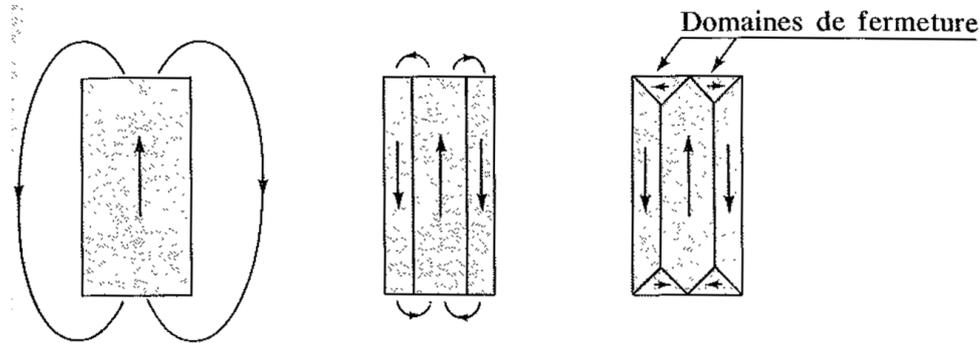


FIGURE 5 – La subdivision d'un monocristal en domaines diminue le champ magnétique créé (cas du fer).

2.3.2 Effet d'un champ magnétique externe

Lorsqu'un champ magnétique est appliqué au matériau, certains domaines sont énergétiquement favorisés face aux autres dont le volume diminue. Il y a alors déplacement des parois. Pour des champs faibles le déplacement est réversible. Mais, lorsque le champ devient fort et que les parois rencontrent des « obstacles », comme des impuretés, leur déplacement devient irréversible, au sens thermodynamique du terme. Pour un champ encore plus élevé, les domaines deviennent moins nombreux et les directions des aimantations ne sont plus celles de l'aimantation spontanée. Il y a rotation de l'aimantation, disparition de parois et l'on arrive à la saturation.

Il est possible de le montrer à l'aide de la manip précédente.

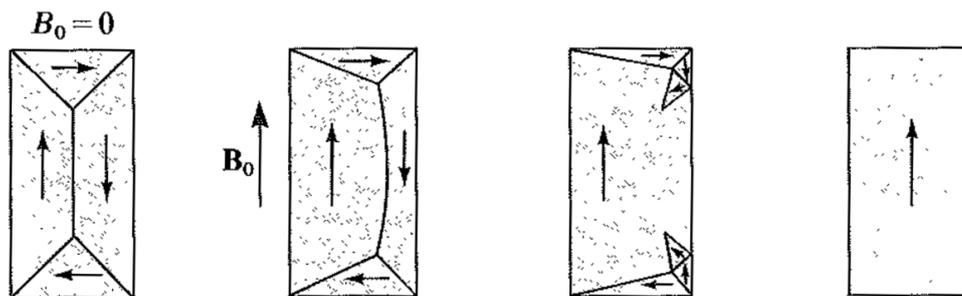


FIGURE 6 – Exemple de modifications des domaines d'un monocristal de fer sous l'effet d'un champ magnétique externe.

Nous avons donc une explication de la courbe de première aimantation, mais aussi de la courbe de désaimantation où l'aimantation rémanente existe à cause des déplacements irréversibles des parois. Pour forcer les parois à s'agencer de manière à annuler M , il faut alors appliquer un champ opposé, d'où le champ coercitif.

2.4 Aspect énergétique

Pour un matériau ferromagnétique utilisé comme dans la figure 7,

$$\delta W = -u_1 i_1 \delta t = i_1 \delta \Phi \quad (13)$$

Or,

$$\vec{H} = \frac{n_1 i_1}{2\pi R} \vec{n} ; \quad \delta\Phi = n_1 S \delta\vec{B} \cdot \vec{n} \quad (14)$$

Avec R le rayon moyen du tore et S la surface de sa coupe orthogonale. Alors,

$$\delta W = n_1 S \vec{B} \cdot \vec{H} \frac{2\pi R}{n_1} = \iiint \vec{H} \cdot \delta\vec{B} \, d\tau \quad (15)$$

$$\delta w = \vec{H} \cdot \delta\vec{B} \quad (16)$$

$$\delta w_{\text{cycle}} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{B} = \mu_0 \oint \vec{H} \cdot d\vec{M} \quad (17)$$

L'énergie volumique dissipée dans le milieu ferromagnétique lors du parcours d'un cycle est donc l'aire du cycle d'hystérésis.

! \triangle Attention au sens du graphique et du parcours du cycle par rapport à l'intégration.

La présence d'un cycle d'hystérésis traduit une perte d'énergie lors de son parcours.

Compte-tenu des allures des cycles d'hystérésis, les matériaux doux présentent moins de pertes par hystérésis que les matériaux durs.

3 Applications

3.1 Transformateur

Nous voulons ici utiliser le phénomène d'induction magnétique afin de réaliser un transformateur. Pour cela, nous utilisons un ferromagnétique afin de guider les lignes de champ magnétique dû au primaire dans les spires de la bobine du secondaire (voir fig. 7).

! La réluctance n'est au programme en PSI.

Dans le cas général,

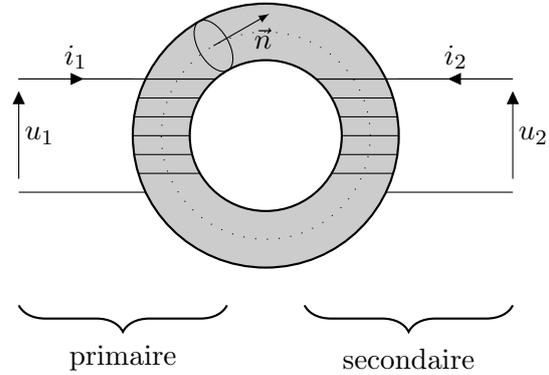


FIGURE 7 – Schéma d'un transformateur.

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r \frac{n_1 i_1 + n_2 i_2}{2\pi R} \quad (18)$$

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = +n_1 S \frac{dB}{dt} = \underbrace{\mu_0 \mu_r \frac{n_1^2 S}{2\pi R}}_{L_1} \frac{di_1}{dt} + \underbrace{\mu_0 \mu_r \frac{n_1 n_2 S}{2\pi R}}_M \frac{di_2}{dt} \quad (19)$$

$$e_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = +n_2 S \frac{dB}{dt} = \underbrace{\mu_0 \mu_r \frac{n_2^2 S}{2\pi R}}_{L_2} \frac{di_2}{dt} + \underbrace{\mu_0 \mu_r \frac{n_1 n_2 S}{2\pi R}}_M \frac{di_1}{dt} \quad (20)$$

Nous en déduisons les expressions des inductances propres et du coefficient d'inductance mutuelle. Ces grandeurs sont directement proportionnelles à μ_r , un corps ferromagnétique est donc tout à fait indiqué pour cette application.

Or, nous l'avons vu précédemment, l'hystérésis propre aux matériaux ferromagnétiques implique des pertes énergétiques. De plus, des courants de Foucault peuvent apparaître dans le matériau. Afin de minimiser ces pertes appelées *pertes fer*, l'utilisation d'un ferromagnétique *doux* est à privilégier (minimisation des pertes par hystérésis), feuilleté orthogonalement aux courants (minimisation des courants de Foucault). Notons qu'il subsiste toujours les *pertes cuivre*, dues aux fils en tant que tels.

3.2 Disque dur

Principe Sur le disque, l'information est stockée sous forme de secteurs d'aimantations différentes. Ainsi, le champ magnétique à la surface du disque varie et sa mesure permet d'en déduire les bits stockés.

Stockage Il s'agit de créer des aimants permanents. Pour cela, il faut utiliser un **ferromagnétique dur** et tirer profit de l'effet de mémoire (aimantation rémanente) lié à l'hystérésis.

Lecture Pour la lecture, afin d'optimiser le couplage avec le support de stockage, un matériau ferromagnétique est également utilisé. Cependant, il faut minimiser l'effet mémoire de la tête de lecture. On utilise donc un **ferromagnétique doux**.

Conclusion

- Ferromagnétiques : susceptibilité magnétique très forte, hystérésis.
- Existence à cause de la non linéarité.
- Applications selon le caractère dur ou doux.

Ouverture : Paléomagnétisme, antiferromagnétisme et ferrimagnétisme.