

LP46 - Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Rapport du jury : L'introduction des milieux linéaires en début de leçon n'est pas judicieuse. Un bilan de puissance soigné est attendu. L'intérêt du champ H doit être clairement dégagé. L'obtention expérimentale du cycle d'hystérésis doit être analysée. Les dispositifs expérimentaux utilisés au cours de cette leçon doivent être parfaitement maîtrisés. Il existe bien d'autres applications que le transformateur idéal. 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. 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 ?). 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.

Niveau: Licence

Pré-requis: Magnétisme dans les milieux, Induction, Paramagnétisme, Diamagnétisme

Bibliographie:

Electromagnétisme 4 - M.Bertin, JP. Faroux - Dunod

Introduction:

On a vu avant qu'il existait différents matériaux magnétique : diamagnétique, paramagnétique, ferromagnétique. Leurs comportements sont différents lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique (Cf LP45).

On va s'intéresser aujourd'hui, uniquement aux corps ferromagnétique. Par l'intensité des phénomènes qu'ils induisent, par la richesse de leurs propriétés, l'étude des ferromagnétiques est un sujet vaste de recherche. L'étude des ferromagnétiques fut longtemps empirique, mais les progrès théoriques depuis plusieurs dizaines d'années, ont permis de concevoir des matériaux très performants dans différents domaines tels que la conversion de puissance, le stockage de données, la médecine et bien d'autres encore. La production de matériaux ferromagnétiques représente un chiffre d'affaire de plusieurs milliards d'euros par an.

L'objectif de cette leçon est de caractériser et de différencier les types de matériaux ferromagnétiques, et d'en présenter quelques applications en fonction de leurs propriétés.

I - Propriétés intrinsèques

1) Les corps ferromagnétiques

On désigne ferromagnétique, tout corps capable de s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, et très souvent de garder par la suite une aimantation important même en champ nul : ils sont devenus des aimants. Ces aimantations sont très supérieurs à celles observés avec les corps paramagnétiques (facteur 10^6 ou plus).

Exemple de substances ferromagnétiques:

Corps simples: Fe, Co, Ni (aussi Gd, Dy mais uniquement à très basse température)

Alliages : ferro nickel, ferro cobalt, mais attention les proportions jouent un rôle important car l'alliage 68% Fe, 32% Ni n'est pas ferromagnétique, il y a aussi Heussler (Cu, Mn, Al) alors qu'aucun de ses composants n'est ferromagnétiques.

Corps composés : Ferrites, Fe_2O_3 , Oxyde métallique : CrO_2 ...

Toutes substances ferromagnétiques sont des solides cristallins (à l'échelle microscopique cela correspond à un état ordonné où tous les moments magnétiques s'orientent parallèlement les uns aux autres, soit l'aimantation $\mathbf{M} = 1/V \cdot \sum \mathbf{m}$ (en A/m)).

2) Température de Curie

Expérience du clou : <https://www.youtube.com/watch?v=dtmgpy8gxao>

Il existe une température pour laquelle le matériau ferromagnétique perd son aimantation, dit température de Curie, il devient alors paramagnétique. (Phénomène découvert par Pierre Curie en 1895). L'agitation thermique entraînant un désordre et la disparition de l'ordre magnétique.

$T < T_c$: aimantation permanente, interaction des moments magnétiques → ferromagnétique

$T > T_c$: aimantation temporaire possible (généralisé par un champ magnétique extérieur), désordre sinon à cause de l'agitation thermique → paramagnétique.

Transition entre les 2 états réversible.

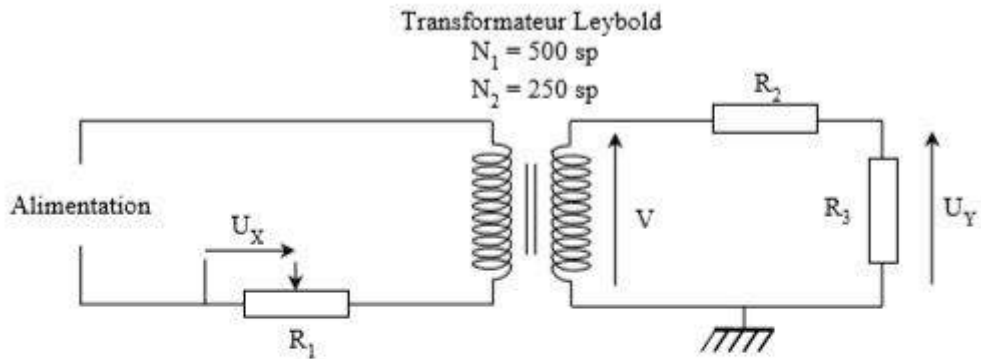
	Co	Fe	Ni	Gd
T_c (K)	1388	1043	627	292

La susceptibilité paramagnétique suit une loi de Curie-Weiss :

$$\chi = C / (T - T_c)$$

II - Propriétés macroscopiques

Montage expérimental pour obtenir les différentes courbes (Cf M16):



R_1 : rhéostat 10Ω ; point milieu réglé sur 5Ω (résistance de mesure)

R_2 : AOIP $100 \text{ k}\Omega$

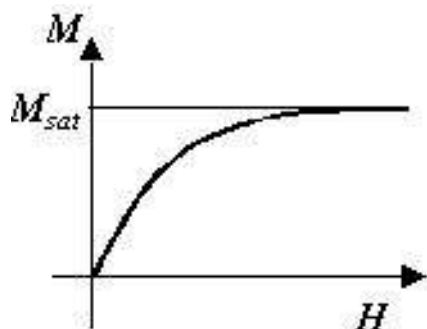
R_3 : AOIP 5 ou $10 \text{ k}\Omega$

Alimentation : alternostat $0/220 \text{ V}$ ou source continue $30 \text{ V} / 5 \text{ A}$

Le milieu magnétique est la carcasse du transformateur.

1) Courbe de 1ère aimantation

La courbe de première aimantation s'obtient en alimentant le milieu avec une source continue (il faut faire attention que le matériau ferromagnétique est préalablement désaimanté, pour ce faire il faut alimenter le transformateur avec l'alternostat et de monter puis abaisser la tension, cela permet d'effectuer les cycles hystérésis décroissant pour revenir au point (0,0)).



Courbe de l'aimantation

On voit que l'aimantation n'évolue pas de façon linéaire avec H , la courbe dépend du matériau utilisé mais elle présente trois parties distinctes :

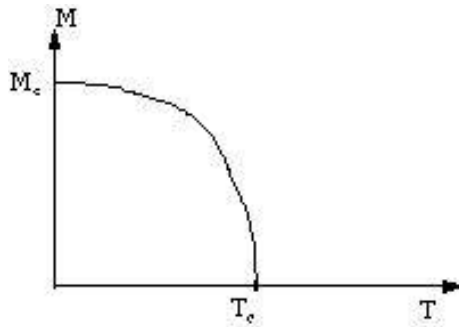
- Faible valeur de H : l'aimantation augmente de manière linéaire
- Ensuite croissance de M plus rapide

-Saturation de M (spécifique du matériau, sensible à sa pureté et de la température)

(La saturation n'est pas toujours obtenue car il faudrait dans certains cas un champs B de $1T$.)

→ Aimantation à saturation:

L'aimantation à saturation dépend de la température, elle décroît si l'on chauffe le matériau puis diminue rapidement et s'annule pour une température T_c , et comme on a vu le matériau devient paramagnétique.



ODG à 20°C

	M_{sat} ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)	$\mu_0 M_{\text{sat}}$ (T)
Fer	$1,70\cdot 10^6$	2,14
Cobalt	$1,40\cdot 10^6$	1,76
Nickel	$0,48\cdot 10^6$	0,60

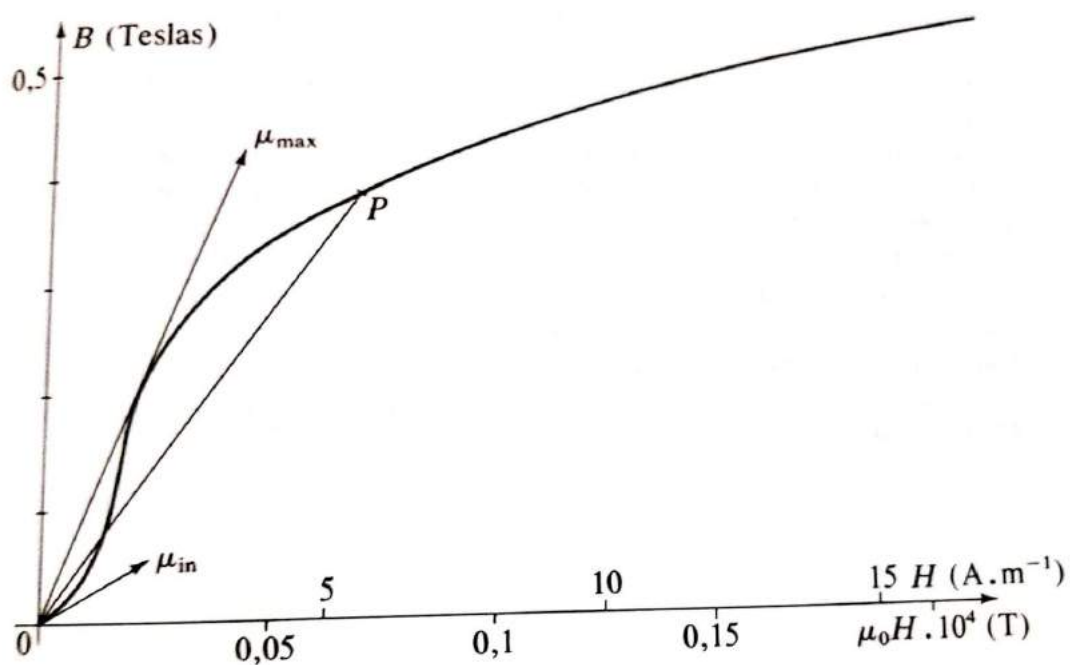
→ Perméabilité magnétique:

On peut mesurer à l'aide de cette courbe en traçant $B=f(H)$ car $\mu_r = \mu/\mu_0$ et $\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$

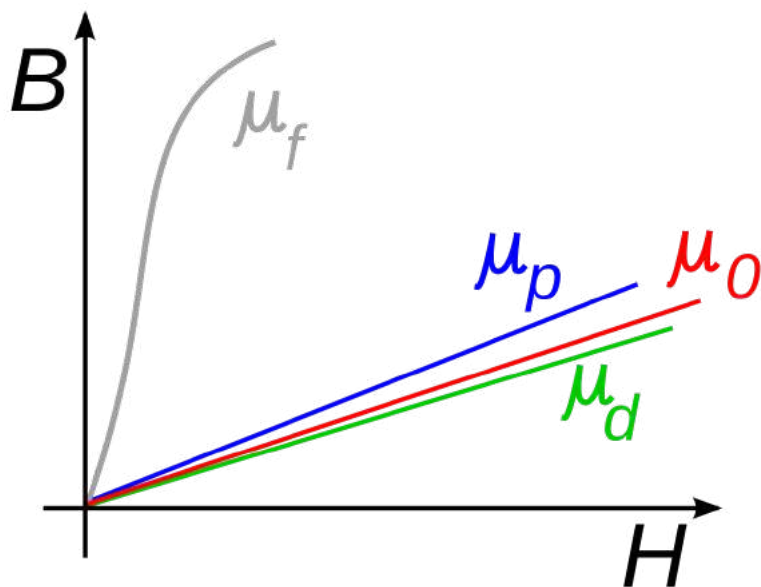
Pour rappel : $\mathbf{B} = (\mathbf{M} + \mu_0 \cdot \mathbf{H})$, et si le régime est dit linéaire isotrope et homogène: $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$, soit $\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H} = \mu \cdot \mathbf{H}$

Attention, on se situe dans le cas linéaire, uniquement dans la première partie de la courbe, car ensuite μ_r varie considérablement avec H . (Faire une mesure d'une valeur n'étant pas constante n'est pas très commode, par la suite les ODG donner correspondent à $\mu_r(\text{max})$).

Courbe du Mumétal



On peut comparer la perméabilité magnétique des différents matériaux magnétiques:



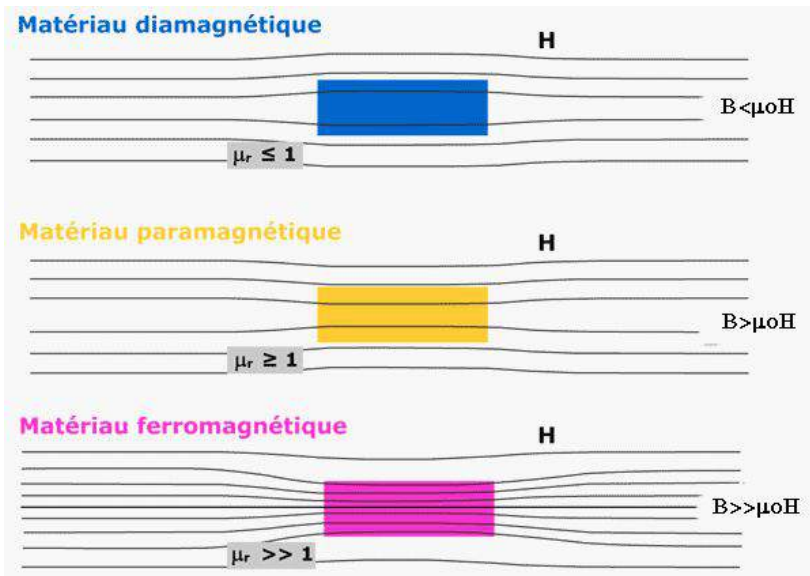
ODG

$\mu(\text{dia})$ et $\mu(\text{para}) \sim \mu_0 = 4. \pi 10^{-7} \text{ H/m}$

	Fe	Co	Ni
$\mu_r(\text{max})$	5 000	250	600

Comment signaler précédent, μ_r varie énormément dans le cas des ferromagnétique et par exemple dans le cas d'un alliage (50% Fe 50% Ni) $\mu_r(\text{min})=2500$ et $\mu_r(\text{max})=25000!!$

La perméabilité magnétique c'est quoi? cela caractérise la faculté d'un matériau à modifier un champ magnétique B, c'est à dire à modifier les lignes de flux magnétique : canalisation du champ magnétique, augmentation de la densité du flux magnétique au sein du matériaux. La différence d'ordre de grandeur entre paramagnétisme et ferromagnétisme explique les différences entre les 2.



Conclusion : L'aimantation que peuvent prendre les ferro est importante en comparaison avec les dia/para, elle dépend cependant de l'excitation. De plus, on a vu que la perméabilité magnétique dépendait de sa température, expliquant la transition ferro/para.

2) Cycle hystérésis

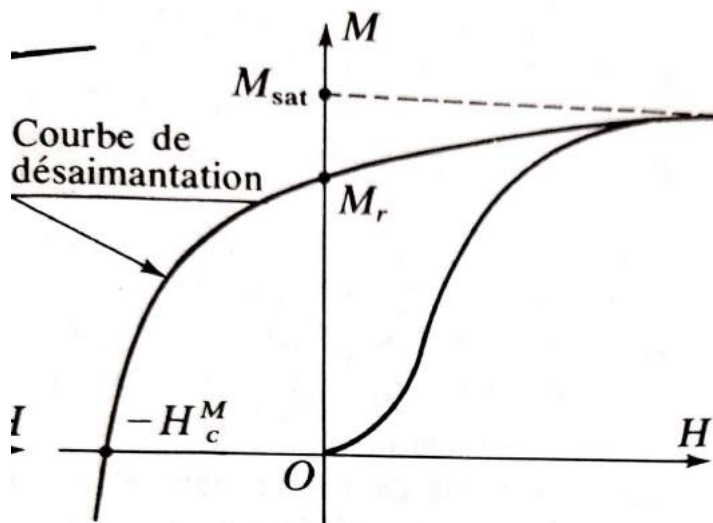
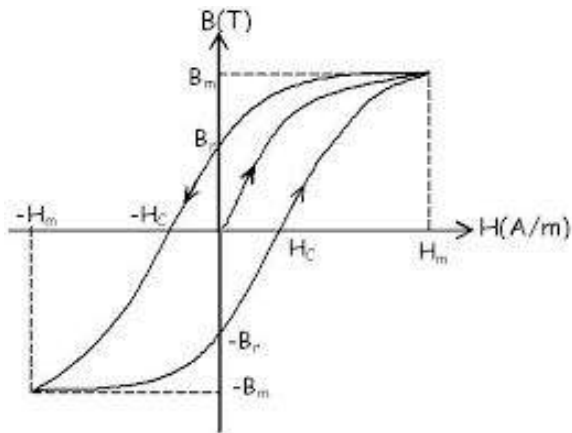
(Point expérience: on peut réaliser la courbe en alternatif ou en continue, cependant en alternatif, le cycle est plus large à cause des pertes car les flux sont plus importants. En statique, les flux étaient uniquement dû à l'aimantation statique de la carcasse. Le matériau étant conducteur, il est le siège de courants induits résultant du champ variable à la fréquence du secteur → pertes par courant de Foucault, voir plus loin.)

A partir de la courbe de première aimantation, faisons décroître l'intensité du courant électrique dans la bobine magnétisante, H décroît et constate que le champ B (donc aussi l'aimantation M) ne reprennent pas pour un même champ H , les valeurs obtenues en champ H croissant, elles sont supérieures et la courbe de désaimantation est différente: on dit qu'il y a hystérésis → Ce retard à la désaimantation est la conséquence de l'irréversibilité du déplacement des parois de Bloch du cristal à champ "fort" (séparation de différents domaines dans le cristal dû à sa cristallisation, mais ces parois bougent avec le champ magnétique) : Domaine de Weiss. L'aimantation de l'échantillon dépend de son passé.

https://www.garmanage.com/atelier/index.cgi?path=public&B&Teaching&B&EPFL&B&3_Magnetisme&B&5_Domaines&&id=psyitefg

On peut ensuite réaugmenter H pour fermer le cycle.

(point expérimental : pour avoir H négatif, il faut inverser le sens du courant la bobine).

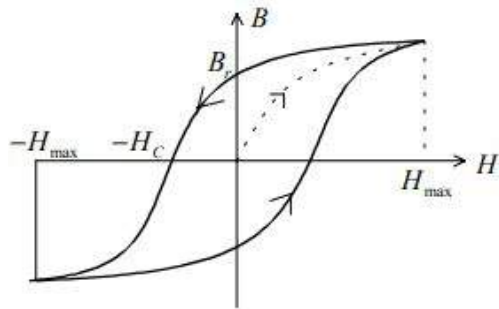


Lorsque H est nul, il subsiste une aimantation résiduelle : aimantation rémanente M_r et le champ correspondant est dit champ rémanent $B_r = \mu_0 \cdot M_r$.
 On constate aussi que le champ B s'annule pour une valeur de H , dit champ coercitif. Champ pour lequel l'aimantation est nulle.

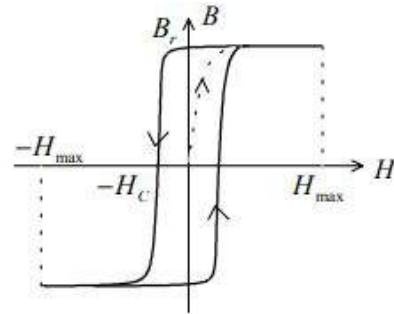
Il est possible de classer les milieux ferromagnétiques en 2 types :

- les milieux doux pour lesquels H_c est plutôt faible ($\sim 10A/m$)
- les milieux durs pour lesquels H_c est plus important (\sim au delà de $100 / 1000 A/m$)

a) *Doux-Durs*



matériau "DUR"



matériau "DOUX"

→ Ferromagnétisme doux :

- Faible champ coercitif $H_c < 100$ A/m, leur aimantation peut donc être faiblement modifié.
- Cycle hystérésis fin
- Utilisations : transformateurs, isolation magnétique..

Industriellement le plus utilisé est le Fer au silicium (2% de Si, au delà il est meilleure mais devient cassant).

→ Ferromagnétisme dur:

- Fort champ coercitif $H_c > 10^3$ A/m, magnétisme rémanent est assez difficile à supprimer (fort effet de mémoire).
- Cycle hystérésis plus large
- Utilisation : aimant permanent, stockage de données sur un disque dur

On utilise les aciers (fer avec 1% de carbone)

b) Pertes

Du fait d'aimantations et de désaimantation successives, l'hystérésis est causes de perte énergétiques, minimiser les pertes est essentiel pour de nombreux appareils où le champ magnétique varie tels que les transformateurs, électro-aimant...d'où l'emploi de matériaux "doux".

On peut effectuer un bilan énergétique pour un milieu ferromagnétique pour lequel on parcourt un cycle à la fréquence f .

D'après le circuit précédent : $P_{\text{fournie}} = u(t) \cdot i(t) = R_1 \cdot i(t)^2 - e(t) \cdot i(t) + L di(t)/dt$ (négligeable devant $R_1 \cdot i(t)$, il faut donc R_1 grand)

où $e(t)$ est la force électromotrice induite, donnée par la loi de Faraday :

$$e(t) = -d\Phi/dt = (N_1 + N_2) \cdot S \cdot dB/dt \sim N_1 \cdot S \cdot dB/dt \text{ avec } N_1 \gg N_2$$

Théorème d'Ampère sur une ligne de champ faisant le tour donne :

$$\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum i = N_1 \cdot i(t) + N_2 \cdot i(t) \sim N_1 \cdot i(t)$$

Puissance sur une période :

$$\langle P \rangle = 1/T \cdot \int u(t) \cdot i(t) \cdot dt = R_1/T \cdot \int i^2 \cdot dt + l \cdot S/T \int H \cdot dB$$

On reconnaît dans l'expression précédente les pertes Joules : P_{joules} + pertes magnétiques proportionnel à l'aire du cycle d'hystérésis.

$$P_{\text{magnétique}} = l \cdot S/T \cdot A_{\text{cycle}} = V/T \cdot A_{\text{cycle}} = V \cdot f \cdot A_{\text{cycle}}$$

Les pertes magnétiques sont d'autant plus importante que la fréquence courant d'entrée est grande ($\propto f$), que le volume du circuit est grand, et que l'aire du cycle est large (donc H_c grand).

On observe aussi (pas dans la formule) des pertes par courant de Foucault qui sont dû à l'induction crée au sein du noyau de fer échauffe ce dernier par effet Joule ($\propto f^2$). Elles sont minimisés par l'utilisation de feuilletage. On peut les mesurer en réalisant le cycle d'hystérésis à courant continue et à courant alternatif, la différence de l'aire du cycle correspond à ses pertes.

Les pertes magnétique et les pertes par courant de Foucault forment ce qu'on appelle les pertes "fer".

Les pertes par effet Joule forme les perte "cuivre"

On voit donc que la différence entre milieux ferromagnétiques doux et durs se joue au niveau énergétique, l'aire du cycle d'un milieu doux étant bien plus faible que celle d'un milieu dur. Les milieux doux ont ainsi une utilité dans les applications telles que la conversion de puissance, ou l'on fait parcourir un très grand nombre de cycles au milieu, alors que les milieux durs ont une utilité dans les domaines de stockage ou pour faire des aimants permanents par exemple.

Conclusion

Ouverture sur :

-le stockage de l'information : spintronique (prix Nobel 2007: le français Albert Fert pour la découverte de la magnétorésistance géante (tête de disque dur))

Remarques

-Possible de faire une partie application : électroaimant, mémoire magnétique.. (Cf *Leçons PH Suet*)

Questions:

-Comment avez-vous choisi le nombre de spires ?

-Quelle est la différence entre les ferrimagnétiques et les ferromagnétiques ayant deux types d'atomes différents ? Les ferrimagnétiques ont des propriétés entre celles des ferro et des antiferro. Dans un matériaux ferrimagnétique, les directions des moments magnétiques sont parallèles, et les sens des moments magnétiques voisins sont opposés ce qui devrait donner un magnétisme global nul, mais ce n'est pas le cas car les amplitudes des moments magnétiques sont légèrement différentes → aimantation spontanée du matériau.

- Ordre de grandeur de l'aimantation rémanente du fer ? L'évaluer sachant qu'on ne peut imposer un champ supérieur à 1 T ?
- Citer d'autres phénomènes d'hystérésis : dans les élastomères, lors de la déformation élastique ou lors de la diminution de la contrainte sont différentes.
- Comment calculer le champ magnétique créé par deux aimants permanents ? Est-ce la somme des champs créés par les deux aimants ?
- Que sont les domaines de Weiss ? Comment expliquer leur répartition spatiale ? Pourquoi observe-t-on les domaines de Weiss au microscope polarisé (effet Faraday) ?
https://fr.wikipedia.org/wiki/Domaine_de_Weiss#La_structure_des_domaines
- Vous avez dit que les matériaux ferromagnétiques guident les lignes de champs, comment expliquer ce phénomène ? Quelle caractéristique (μ_r , aimantation rémanente, champ coercitif) influe de manière prépondérante sur le guidage ? La perméabilité élevée du milieu ferro amplifie le champ et resserre les lignes de champ.
- Expliquer qualitativement d'où vient la formule $j_{lié} = \text{rot}M$. Cela vient de l'équation de Maxwell $\text{rot}(B) = \mu_0 \cdot \text{rot}M$
- Qu'est-ce que la réluctance ? Analogie avec la résistance, c'est l'aptitude d'un circuit magnétique à s'opposer à sa pénétration par un champ magnétique.
- Comment faire sentir pédagogiquement le lien entre le sens du courant et la direction du champ induit ? Un champ magnétique se produit lorsque des charges électriques sont en mouvement. Autrement dit, seule l'électricité dynamique peut engendrer un champ magnétique; l'électricité statique en est incapable. (pour le sens utiliser la règle du tir bouchon). Pour montrer que c'est vrai mettre une aiguille aimantée à côté d'un fil de courant. Le courant crée un champ magnétique qui agit sur l'aiguille. En changeant le sens du courant l'aiguille change de sens.
- D'autres applications de l'aimantation ? Paléomagnétisme
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pal%C3%A9omagn%C3%A9tisme>.
- Comment faire comprendre qualitativement à un étudiant que ce sont des charges liées et non libres qui sont responsables de l'apparition d'un dipôle ?
- Comment expliquer que M_{sat} aie toujours a peu près la même valeur ?
- L'intérêt du champ H ? On peut ainsi interpréter H comme étant le champ produit par le courant électrique. Dans les matériaux ferromagnétiques, notamment les aimants, l'aimantation ne peut être négligée. Il est important alors de distinguer les champs B et H à l'intérieur du matériau, bien qu'ils restent identiques à l'extérieur.