Électromagnétisme 4
Matériaux ferromagnétiques

Compétences

- ❏ Décrire, à partir d'une formule fournie exprimant le champ d'un dipôle magnétique, le champ créé par un aimant à grande distance et représenter qualitativement les lignes de champ magnétique.
- ❏ Utiliser les expressions fournies de l'énergie potentielle, de la résultante et du moment.
- ❏ Décrire qualitativement l'évolution d'un dipôle magnétique dans un champ magnétique extérieur.
- ❏ Établir l'expression du magnéton de Bohr dans le cadre du modèle de Bohr.
- ❏ Définir le champ d'aimantation d'un milieu magnétique.
- ❏ Associer à une distribution d'aimantation une densité volumique de courants liés équivalente, l'expression étant admise.
- ❏ Définir le vecteur excitation magnétique.
- ❏ Écrire l'équation de Maxwell-Ampère dans un milieu magnétique.
- ❏ Interpréter qualitativement que les sources de l'excitation magnétique sont les courants électriques libres, et que celles de champ magnétique sont les courants électriques libres et l'aimantation.
- ❏ Représenter l'allure des cycles d'hystérésis (excitation magnétique, aimantation) et (excitation magnétique, champ magnétique) d'un milieu ferromagnétique.
- ❏ Distinguer milieu dur et milieu doux ; citer des exemples de matériaux.
- ❏ Modéliser un milieu doux par une relation constitutive linéaire.
- ❏ Définir la perméabilité relative et donner un ordre de grandeur.
- ❏ Décrire l'allure des lignes de champ dans un circuit magnétique en admettant que les lignes de champ sortent orthogonalement à l'interface dans un entrefer.
- ❏ Exprimer le champ magnétique produit dans l'entrefer d'un électroaimant.
- ❏ Établir l'expression de l'inductance propre de la bobine à noyau.
- ❏ Vérifier l'expression de l'énergie magnétique : $\mathcal{E}_{\text{mag}} = \iiint \frac{B^2}{2\mu_0\mu_r}\,\mathrm{d}\tau$.
- ❏ Exprimer le lien entre l'aire du cycle hystérésis et la puissance moyenne absorbée.
- ❏ Décrire les différents termes de pertes d'une bobine à noyau : pertes fer par courants de Foucault et par hystérésis, pertes cuivre.

Questions de cours des interrogations orales

- ❏ Le champ magnétique créé par un dipole magnétique étant fourni, déterminer l'équation des lignes de champ puis tracer leur allure.
- ❏ Établir l'expression du moment magnétique atomique quantifié dans le modèle de Bohr en introduisant le magnéton de Bohr.
- ❏ Définir l'aimantation, les courants liés et l'excitation magnétique et établir l'équation de Maxwell-Ampère valable dans les milieux magnétique.
- ❏ Établir la relation tension-champ magnétique et la relation courant-excitation magnétique pour un circuit magnétique sans entrefer. Expliquer comment tracer un cycle d'hystérésis expérimentalement.
- ❏ Établir le champ magnétique dans une bobine ayant un cœur magnétique. En déduire son inductance propre. En déduire dans ce cas particulier la densité volumique d'énergie magnétique.
- ❏ Établir la puissance moyenne des pertes par hystérésis. Citer les différents types de pertes existant dans un circuit magnétique.
- ❏ Établir l'expression du champ magnétique dans l'entrefer d'un électroaimant.

Entrainements

❑ 6.1 ❑ 6.2 ❑ 6.3 ❑ 6.4 ❑ 6.5 ❑ 6.6 ❑ 6.7

Exercices

❑ Exercice 1 ❑ Exercice 2 ❑ Exercice 3 ❑ Exercice 4

Résumé du cours

1. Moment magnétique d'un aimant permanent

1.1. Dipole magnétique

Une spire circulaire parcourue par un courant produit un champ magnétique caractérisé par son moment magnétique $\overrightarrow{\mathcal{M}}$.

Moment magnétique d'une spire ♥

$$\overrightarrow{\mathcal{M}} = i\vec{S}$$

Avec
- $\mathcal{M}$ le moment magnétique ($\mathrm{A\,m^2}$)
- $\vec{S}$ la surface orientée ($\mathrm{m^2}$)
- i le courant électrique (A)

Si on fait tendre vers 0 le rayon d'une spire circulaire en gardant constant son moment magnétique, on obtient un dipole magnétique.

Le dipole magnétique est un système ponctuel. Le dipole magnétique est le plus simple système ayant un moment magnétique.

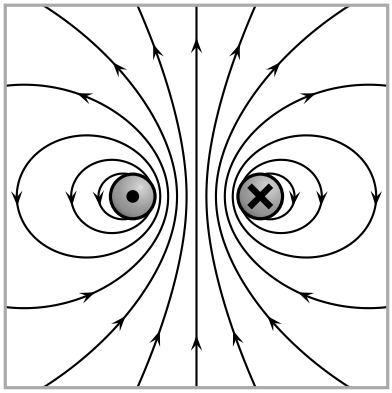


Fig. 1. – Spire

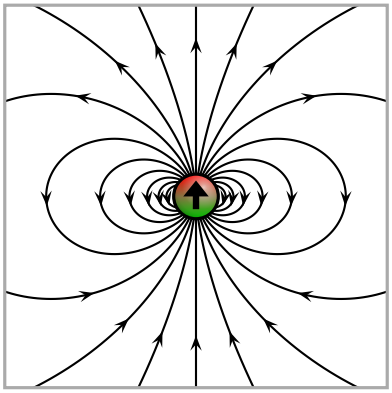


Fig. 2. – Dipole magnétique

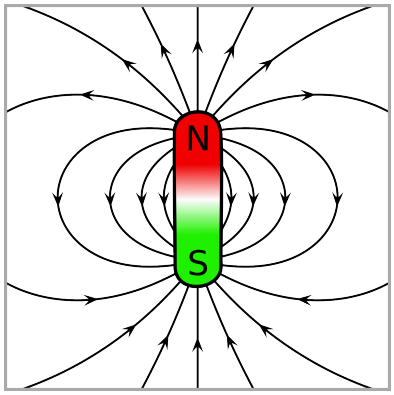


Fig. 3. – Aimant

Les champs magnétiques créés par une spire, un dipole magnétique et un aimant sont similaires lorsqu'on se place suffisamment loin du système.

Champ magnétique créé par un dipole magnétique

Hypothèses :
- *Le moment magnétique est orienté selon* $\vec{e}_z$.
- *Le système de coordonnées est sphérique.*

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\mathcal{M}}{r^3}\begin{pmatrix} 2\cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

Avec
- $\mathcal{M}$ le moment magnétique ($\mathrm{A\,m^2}$)
- B le champ magnétique (T)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide ($\mathrm{H\,m^{-1}}$)

Équation des lignes de champ magnétique créées par un dipole magnétique

Hypothèses :
- *Le moment magnétique est orienté selon $\vec{e}_z$.*
- *Le système de coordonnées est sphérique.*

$$r = K \sin^2 \theta$$

$$\varphi = K'$$

Application ✍[1]

Tracer l'allure des lignes de champ magnétique créées par un dipole magnétique.

Application ✍[2]

À l'aide de Python, tracer l'allure des lignes de champ magnétique créées par un dipole magnétique.

1.2. Champ créé par un aimant

Si on se place suffisamment loin, le champ créé par un aimant, par une spire et par un dipole magnétique sont similaire. On définit le moment magnétique d'un aimant comme le moment magnétique du dipole magnétique ayant le même champ magnétique à grande distance

Application ✍[3]

Déterminer la norme du champ magnétique à la surface de la terre à Quimper ($47°59'N, 4°05'O$). On donne $\mathcal{M}_{\text{Terre}} = 7.7 \cdot 10^{22}\,\text{A}^{-2}$ et $R_{\text{Terre}} = 6\,400\,\text{km}$.

1.3. Action subie par un moment magnétique

Lorsqu'un système possédant un moment magnétique est placé dans champ magnétique extérieur, il subit des actions de sa part.

Énergie potentielle d'interaction entre un système possédant un moment magnétique et un champ magnétique extérieur

$$\mathcal{E}_p = -\overrightarrow{\mathcal{M}}.\vec{B}_{\text{ext}}$$

Avec
- $\mathcal{M}$ le moment magnétique (A m^2)
- $\mathcal{E}_p$ l'énergie potentielle d'interaction (J)
- $\vec{B}_{\text{ext}}$ le champ magnétique extérieur (T)

L'énergie potentielle est minimales lorsque le moment magnétique est aligné au champ. Un moment magnétique a tendance à s'aligner au champ magnétique.

Force subie par un système possédant un moment magnétique

$$\vec{F} = -\overrightarrow{grad}\,\mathcal{E}_p$$

Avec
- $\mathcal{E}_p$ l'énergie potentielle d'interaction (J)
- $\vec{F}$ la force (N)

Couple subi par un système possédant un moment magnétique

$$\vec{\Gamma} = \overrightarrow{\mathcal{M}} \wedge \vec{B}_{\text{ext}}$$

Avec
- $\mathcal{M}$ le moment magnétique ($\mathrm{A\,m^2}$)
- $\vec{B}_{\text{ext}}$ le champ magnétique extérieur (T)
- $\vec{\Gamma}$ le couple ($\mathrm{N\,m}$)

On retrouve un couple nul lorsque le moment magnétique est aligné avec le champ magnétique.

Application ✍4

Déterminer la période d'oscillation d'une aiguille de boussole ($\overrightarrow{\mathcal{M}} = 15\,\mathrm{A\,m^2}\vec{e}_r$, $J = 1 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{kg\,m^{-2}}$ selon $\vec{e}_r$) dans le champ magnétique terrestre. La liaison pivot entre l'aiguille et son support est supposée idéale.

Quantification du moment magnétique atomique ♥ ✍5

Hypothèses :
- *L'électron décrit une trajectoire circulaire autour d'un noyau.*
- *L'électron a un moment cinétique quantifié $L = n\,\hbar$ avec $n \in \mathbb{N}^*$.*

$$\mathcal{M} = n\mu_B$$

Avec
- $\mathcal{M}$ le moment magnétique ($\mathrm{A\,m^2}$)
- $\mu_B = \frac{\hbar\, e}{2m_e}$ le magnéton de Bohr ($\mathrm{A\,m^2}$)
- n un entier relatif (sans unité)

2. Equations de Maxwell dans un milieu magnétique

2.1. Aimantation

Les particules qui constituent la matière peuvent porter un moment magnétique (moment magnétique orbital des électrons, spin des électrons et des noyaux).

L'aimantation est le moment magnétique par unité de volume.

Définition de l'aimantation ♥

$$\overrightarrow{M} = \frac{\delta\overrightarrow{\mathcal{M}}}{\delta V}$$

Avec
- $\mathcal{M}$ le moment magnétique ($\mathrm{A\,m^2}$)
- V le volume du matériau ($\mathrm{m^3}$)

Il est possible de définir des courants fictifs $\vec{\jmath}_{\text{lié}}$ qui, s'ils existaient, donneraient lieu à la même aimantation $\overrightarrow{M}$

Courants liés ♥

$$\vec{\jmath}_{\text{lié}} = \overrightarrow{rot}\,\overrightarrow{M}$$

Avec
- $\mathcal{M}$ le moment magnétique ($\mathrm{A\,m^2}$)
- $\vec{\jmath}_{\text{lié}}$ le vecteur densité volumique de courant lié ($\mathrm{A\,m^{-2}}$)

2.2. Vecteur excitation magnétique

Les effets de l'aimantation sont pris en compte dans les équations de Maxwell à travers les courants liés.

Équation de Maxwell-Ampère dans un milieu magnétique ♥ ✍[6]

$$\overrightarrow{rot}\,\vec{H} = \vec{\jmath}_{\text{libre}}$$

Avec
- H l'excitation magnétique ($\mathrm{A\,m^{-1}}$)
- $\vec{\jmath}_{\text{libre}}$ le vecteur densité volumique de courant libre ($\mathrm{A\,m^{-2}}$)

Les sources de l'excitation magnétique sont donc les courants électriques libres.

Les sources du champ magnétique sont les courants électriques libres et l'aimantation.

2.3. Équations de Maxwell intégrées

Dans les milieux magnétiques, l'équation de Maxwell-Faraday est inchangée donc la loi de Lenz-Faraday $e = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$ s'applique toujours.

Dans les milieux magnétiques, l'équation de Maxwell-Thomson est inchangée donc le champ magnétique $\vec{B}$ est toujours à flux conservatif.

Théorème d'Ampère dans un milieu magnétique ♥ ✍[7]

Hypothèse : Dans l'ARQS magnétique.

$$\oint_{\mathcal{C}} \vec{H} \cdot \vec{\mathrm{d}l} = I_{\text{libre, enlacé}}$$

Avec
- H l'excitation magnétique ($\mathrm{A\,m^{-1}}$)
- $I_{\text{libre, enlacé}}$ le courant libre enlacé (A)
- l la longueur du circuit magnétique (m)

3. Milieux ferromagnétiques

3.1. Présentation

Un matériau ferromagnétique est un matériau dans lequel les dipoles magnétiques (de spin, orbital, …) ont tendance à s'aligner sur le champ magnétique extérieur. Dans un milieu ferromagnétique, l'aimantation $\overrightarrow{M}$ et le champ magnétique $\vec{B}$ croient avec l'excitation magnétique $\vec{H}$.

Un matériau ferromagnétique canalise les lignes de champ magnétique. Lorsque des lignes de champ sortent d'un matériau ferromagnétique, elles sortent perpendiculairement à l'interface.

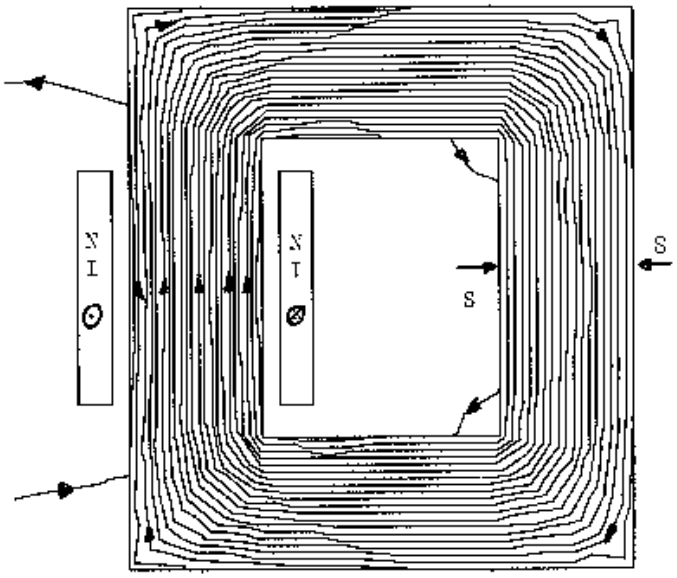


Fig. 4. – Lignes de champ magnétique dans un circuit magnétique sans entrefer.

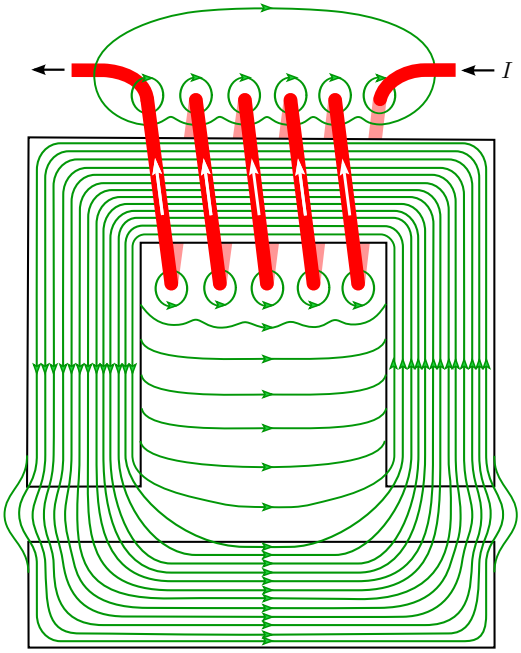


Fig. 5. – Lignes de champ magnétique dans un circuit magnétique avec deux entrefers.

3.2. Présentation empirique : le cycle d'hystérésis

Pour un matériau ferromagnétique, le champ magnétique $\vec{B}$ et l'aimantation $\overrightarrow{M}$ dépendent de l'excitation magnétique. Cette dépendance comporte une hystérésis.

Schéma : Cycle d'hystérésis

L'aimantation peut saturer, ce qui correspond à un état où tous les dipoles magnétiques sont orientés dans le même sens que l'excitation magnétique $\vec{H}$.

L'aimantation rémanente et le champ magnétique rémanent sont l'aimantation et le champ magnétique subsistant lorsque l'excitation magnétique est nul.

L'excitation coercitive est l'excitation qu'il faut appliquer pour que le champ magnétique et l'aimantation soient nulles[1].

Un matériau ferromagnétique dur est un matériau ferromagnétique dont le cycle d'hystérésis est large.

[1]En toute rigueur, l'excitation magnétique qu'il faut pour avoir $B = 0$ n'est pas exactement celle qu'il faut appliquer pour avoir $M = 0$, mais elles sont très proches.

Schéma : Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique dur

Un matériau dur a une grande aimantation rémanente et un grand champ magnétique rémanent.

Les matériaux ferromagnétiques durs sont utilisés pour fabriquer des aimants permanents.

Exemple

Le fer et les alliages à base de néodyme sont des matériaux ferromagnétiques durs.

3.3. Matériaux ferromagnétiques doux

Un matériau ferromagnétique doux est un matériau ferromagnétique dont le cycle d'hystérésis est fin et linéaire dans une certaine zone.

Les matériaux ferromagnétiques doux sont utilisés pour fabriquer les transformateurs et les machines électriques.

Exemple

La ferrite est un matériau ferromagnétique doux.

Schéma : Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique doux

Perméabilité magnétique ♥

Hypothèses :
- *Pour un matériau ferromagnétique doux.*
- *Dans la zone de linéarité d'un matériau ferromagnétique doux.*

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Avec
- B le champ magnétique (T)
- H l'excitation magnétique ($\mathrm{A\,m^{-1}}$)
- $\mu = \mu_0 \mu_r$ la perméabilité magnétique du matériau ($\mathrm{H\,m^{-1}}$)

La perméabilité magnétique relative est de l'ordre de $\mu_r \sim 10^5$.

4. Circuits ferromagnétiques

4.1. Circuit magnétique sans entrefer

4.1.1. Présentation générale

Un circuit magnétique sans entrefer est constitué d'un matériau ferromagnétique formant une boucle autour duquel est enroulé un fil parcourant par un courant électrique.

Schéma : Circuit magnétique sans entrefer

Le matériau guide les lignes de champ, elles ont donc une forme similaire à celle du circuit magnétique. Pour étudier le système, on s'intéresse à une ligne de champ moyenne.

4.1.2. Relations entre grandeurs électriques et électromagnétiques

Relation champ magnétique - tension ✍[8]

Hypothèses :
- *Dans l'ARQS magnétique.*
- *Le circuit magnétique a une section constante S.*
- *Le circuit magnétique ne comporte pas d'entrefer.*
- *Le champ magnétique est uniforme dans le matériau ferromagnétique.*

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Avec
- B le champ magnétique (T)
- H l'excitation magnétique ($\mathrm{A\,m^{-1}}$)
- $\mu = \mu_0 \mu_r$ la perméabilité magnétique du matériau ($\mathrm{H\,m^{-1}}$)

Cette relation est mise à profit pour mesurer le champ magnétique et tracer le cycle d'hystérésis.

Relation excitation magnétique - courant ✍[9]

Hypothèses :
- *Dans l'ARQS magnétique.*
- *Le circuit magnétique a une section constante S.*
- *Le circuit magnétique ne comporte pas d'entrefer.*
- *L'excitation magnétique est uniforme dans le matériau ferromagnétique.*

$$Hl = Ni$$

Avec
- i le courant électrique (A)
- H l'excitation magnétique ($\mathrm{A\,m^{-1}}$)
- N le nombre de spires (sans unité)
- l la longueur du circuit magnétique (m)

Cette relation est mise à profit pour mesurer l'excitation magnétique et tracer le cycle d'hystérésis.

Si la tension e aux bornes de l'enroulement est sinusoïdale, cela n'implique pas que l'intensité du courant i le soit également. Si le matériau ferromagnétique est doux et hors saturation, alors l'intensité du courant a la même forme que la tension.

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/81/Power_Transformer_Over-Excitation.gif

4.2. Bobine à noyau ferromagnétique

Le circuit magnétique sans entrefer peut être utilisé pour réaliser une bobine. Pour cela, on utilise un matériau ferromagnétique doux hors saturation.

4.2.1. Inductance propre

Inductance propre d'une bobine avec noyau ferromagnétique ✍[10]

Hypothèses :
- *Dans l'ARQS magnétique.*
- *L'excitation magnétique et le champ magnétique sont uniformes dans le matériau ferromagnétique.*
- *Le matériau ferromagnétique est doux et hors saturation.*
- *Le circuit magnétique ne comporte pas d'entrefer.*
- *Le circuit magnétique a une section constante.*

$$L = \frac{N^2 S \mu}{l}$$

Avec
- $\mu = \mu_0 \mu_r$ la perméabilité magnétique du matériau ($\mathrm{H\,m^{-1}}$)
- N le nombre de spires (sans unité)
- l la longueur du circuit magnétique (m)
- L l'inductance propre (H)
- S la section du circuit magnétique ($\mathrm{m^2}$)

Cette inductance propre est $\mu_r \gg 1$ fois plus grande que celle d'un tore sans cœur ferromagnétique de dimensions équivalentes.

4.2.2. Aspect énergétique

Densité volumique d'énergie magnétique dans un matériau ferromagnétique doux ♥ ✍[11]

Hypothèses :
- *Dans l'ARQS magnétique.*
- *Le matériau ferromagnétique est doux et hors saturation.*
- *La formule établie pour un circuit magnétique sans entrefer peut être généralisée.*

$$w = \frac{1}{2\mu_0 \mu_r} B^2$$

Avec
- B le champ magnétique (T)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide ($\mathrm{H\,m^{-1}}$)
- w la densité volumique d'énergie magnétique ($\mathrm{J\,m^{-3}}$)
- μ_r la perméabilité relative du matériau (sans unité)

4.2.3. Pertes

La présence d'un milieu ferromagnétique au cœur de la bobine induit des pertes.

Pertes par hystérésis ✍12

Hypothèses :
- *Dans l'ARQS magnétique.*
- *L'excitation magnétique et le champ magnétique sont uniformes dans le matériau ferromagnétique.*
- *Le circuit magnétique a une section constante.*
- *Le circuit magnétique ne comporte pas d'entrefer.*

$$\langle \mathcal{P}_{\text{hystérésis}} \rangle = V f \mathcal{A}$$

Avec
- $\mathcal{P}_{\text{hystérésis}}$ la puissance dissipée par hystérésis (W)
- V le volume du matériau (m^3)
- f la fréquence (Hz)
- $\mathcal{A}$ l'aire du cycle d'hystérésis (T A m^{-1})

Pour limiter les pertes par hystérésis, on utilise des matériaux ferromagnétiques doux.

Le circuit magnétique étant un conducteur électrique placé dans un champ magnétique variable, des courants de Foucault y sont induits. Pour limiter les pertes par courant de Foucault, on utilise le feuilletage.

Pertes par courant de Foucault et pertes par hystérésis sont appelées les **pertes fer** car elles se produisent dans le matériau ferromagnétique.

Des pertes par effet Joule se produisent également dans le bobinage, souvent réalisé en cuivre. Les pertes par effet Joule sont appelées pertes cuivre.

4.3. Circuit magnétique avec entrefer

Un entrefer est une zone de l'espace vide[2] au sein du circuit magnétique. Un circuit magnétique avec entrefer est appelé un électroaimant car il permet de réaliser un champ magnétique dans une zone de l'espace grace à un courant électrique.

Schéma : Circuit magnétique avec entrefer

Champ magnétique dans l'entrefer d'un électroaimant ✍13

Hypothèses :
- *Dans l'ARQS magnétique.*
- *L'excitation magnétique et le champ magnétique sont uniformes dans le matériau ferromagnétique.*
- *Le circuit magnétique a une section constante.*
- *Les effets de bord sont négligés dans l'entrefer*[3]*.*
- *Le matériau ferromagnétique est doux et hors saturation.*

$$B_{\text{entrefer}} = \frac{\mu_0 N i}{e}$$

Avec
- i le courant électrique (A)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (H m^{-1})
- N le nombre de spires (sans unité)
- e l'épaisseur de l'entrefer (m)
- B_{entrefer} le champ magnétique dans l'entrefer (T)

[2] Vide de matériau ferromagnétique.

[3] Autrement dit, l'épaisseur de l'entrefer est très petite devant toutes les autres dimensions.

Méthodes

1. Déterminer l'excitation magnétique dans le vide

1. Effectuer une analyse des invariances pour connaitre les dépendances
2. Effectuer une analyse des symétries pour connaitre la direction
3. Choisir une courbe d'Ampère
4. Appliquer le théorème d'Ampère

2. Déterminer l'excitation magnétique dans un matériaux ferromagnétique

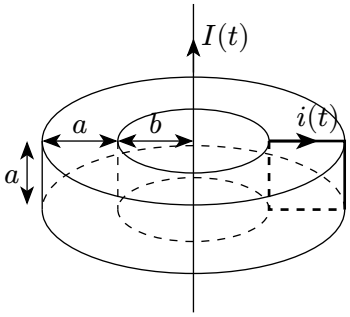
- Le matériau est-il doux hors saturation ?
  1. Utiliser la relation $H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r}$.
  2. Utiliser le fait que $\mu_r \gg 1$.
- Le matériau constitue-t-il un circuit magnétique fermé ?
  1. Si la section est constante, l'excitation magnétique est la même en tout point du circuit magnétique.
  2. Le matériau ferromagnétique guide les lignes de champs, la direction de l'excitation magnétique est celle du circuit magnétique.
  3. Appliquer le théorème d'Ampère sur un contour de même forme que le circuit magnétique.
- Il y a un entrefer ? Reprendre la méthode précédente, en découpant l'intégrale du théorème d'Ampère en plusieurs parties (une pour chaque matériau traversé).

Exercices

1. Pince ampère-métrique

Une pince ampère-métrique sert à mesurer l'intensité d'un courant sans ouvrir le circuit. Elle est schématiquement constituée d'un tore ferromagnétique à base carrée, de coté a, milieu doux, non saturé, linéaire de perméabilité μ, sur lequel sont entourées N spire jointives. La figure montre une coupe transversale du dispositif.

Les spires sont électriquement branchées aux bornes d'une résistance R, de valeur très supérieure à celle du bobinage. On note $u(t)$ la tension aux bornes de R et $i(t)$ le courant circulant dans le bobinage et R. Le tore est centré sur le fil infiniment long dont on mesure l'intensité $I(t)$.



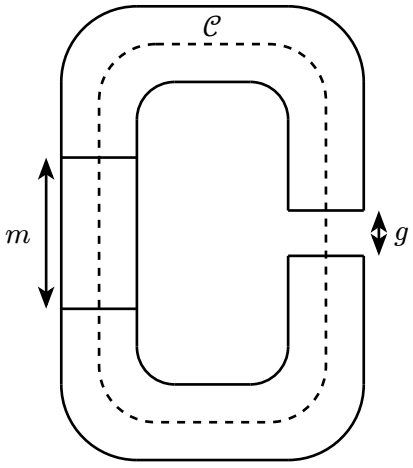
1/ Déterminer le champ $\vec{H}_I$ créé dans tout l'espace par $I(t)$. En déduire le flux magnétique φ_I reçu par le bobinage.

2/ Déterminer le flux Φ_i créé par $i(t)$ et reçu par le bobinage.

3/ Établir une équation différentielle liant $u(t)$ et $I(t)$

4/ Quelle est la fonction de transfert $H(p) = \frac{U(p)}{I(p)}$? En déduire comment choisir les paramètres constitutifs de la pince afin que u soit directement proportionnel à I.

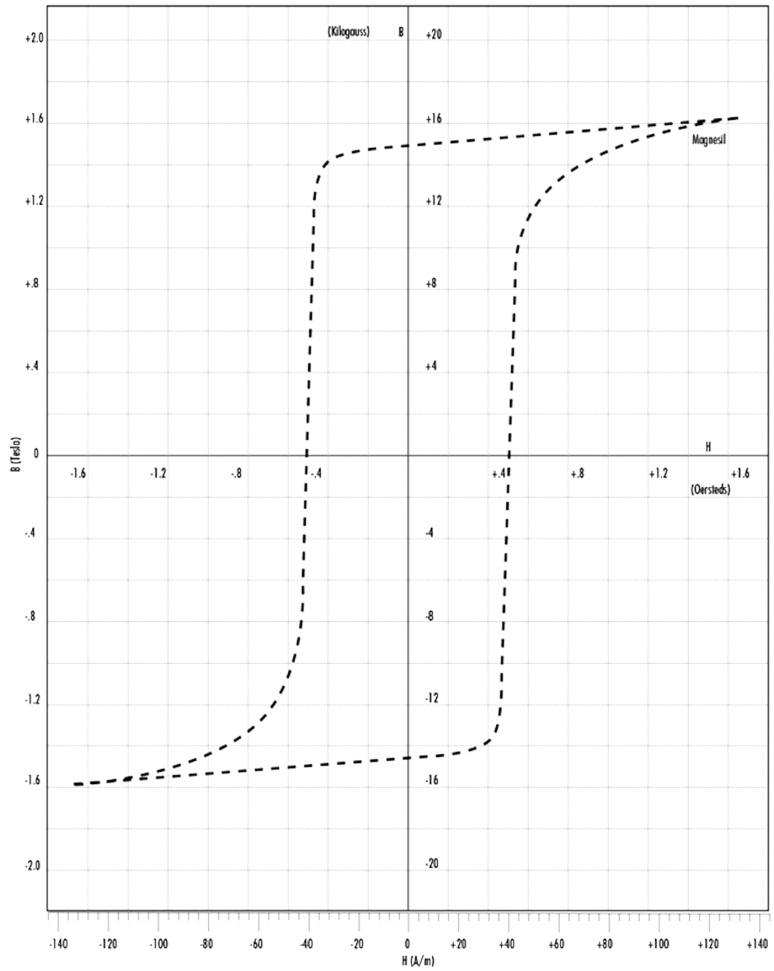
2. Permanent magnet



We study a magnetic circuit which section S is constant composed of

- a magnet of length $m = 10\,\text{cm}$ described by its hysteresis cycle given below ;
- electrical steel[4] of length l_e considered linear, homogenous, isotropic, transparent, of infinite magnetic permeability ;
- an air gap of length $g = 1\,\text{mm}$.

[4] « fer doux » in French



We suppose the fields to be unidimensional, we neglect any field leak and any side effect.

1/ How does the hysteresis cycle needs to be for a good permanent magnet ? Should a soft or hard material be used ?

2/ Show that the vector $\vec{H}$ is null in the electrical steel.

3/ Show that the magnetic field is the same in the air gap, the permanent magnet and the soft magnetic material.

4/ By applying Ampère's theorem on a mean field line, find a relation between B_m and H_m in the magnet.

5/ Deduce graphically les values of B_m and H_m. How many solutions are there ?

6/ What are the values of B_e and H_e in the air gap ?

3. 💬 J'explique à ma voisine : Le disque dur

Le but de cet exercice est de vous faire expliquer un concept/phénomène avec des mots simples et courants (pas de vocabulaire technique ou scientifique) à une personne de votre entourage. Tachez de faire simple et court, utilisez des analogies avec des choses connues. Vous pouvez vous inspirer de Ma thèse en 180 secondes. Profitez-en pour prendre des nouvelles !

Comment un disque dur fait-il pour stocker des données ?

4. 🤔 La boussole

Cet exercice est un problème ouvert. Il nécessite de prendre des initiatives et de faire des choix dans la modélisation. Des approximations et des estimations sont souvent nécessaires pour arriver à une solution.

Visionner la vidéo suivante.

https://www.youtube.com/shorts/ES7-7crFrI0

Données :

Moment d'inertie de l'aiguille de la boussole : $J = 1 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{kg\,m^2}$.

Composante horizontale du champ magnétique terrestre : $B = 2 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{T}$.

Calculer le moment magnétique de la boussole de la vidéo.