

Énergie Électrique

Questions de cours Circuits magnétiques & ferromagnétisme

Tests pour Moodle/Edunao

Banque de questions : Cours/Ch3 Magnétisme

Test : Questions de cours : CM & ferromagnétisme

11 questions pour valider le cours sur les circuits magnétiques et le comportement des matériaux ferromagnétiques (e.g. les aimants).

Date limite pour valider : **mardi 16 juin 08h30**.

Il faut 100% de bonnes réponses pour valider le test..., mais vous pouvez faire plusieurs essais à chaque question !

Conseils :

- À chaque question, demandez la **vérification** immédiate de la réponse. Si votre réponse est incorrecte, vous aurez la possibilité de la retenter immédiatement.
- Chaque question comporte un « feedback » qu'il est conseillé de lire, que votre réponse soit juste ou fausse.
- Il est conseillé de répondre séquentiellement (l'ordre des questions suit une progression logique)

1 Circuits magnétiques

Q1: Unités de B, H et φ

Quelles sont les unités des champs magnétiques H (« excitation magnétique ») et B (« induction magnétique » ou « densité de flux ») ainsi que du flux magnétique φ (flux de B à travers une surface) ?

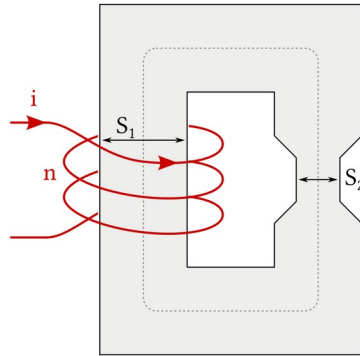
Champ H	A/m
Champ B	T (Tesla)
Flux φ	Wb (Weber)
Autres fausses propositions :	A, H, H^{-1}

FB : Remarque : B est la densité de flux, c'est à dire que $T = Wb/m^2$

L'unité de H se retrouve dans le théorème d'Ampère « $H.L = ni$ »

Q2: Lignes de champ dans un rétrécissement de fer

On considère un circuit magnétique composé d'un matériau ferromagnétique à haute perméabilité. Sa section est variable. Comment se comportent les lignes de champ au niveau du rétrécissement ?



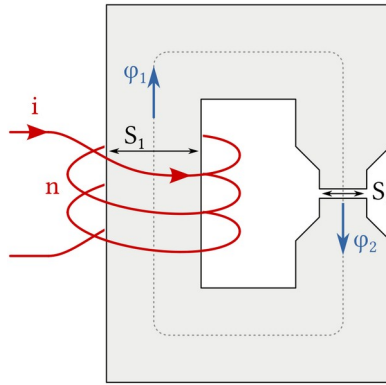
4 réponses en image :

Les ldc restent droites au niveau du rétrécissement	Les ldc se resserrent au niveau du rétrécissement (OK)	Les ldc s'épanouissent dans l'air autour du rétrécissement	Les ldc sont partout concentrées sur la section du rétrécissement
		ça serait le cas s'il y avait saturation	

FB : Le champ B passe préférentiellement dans les pièces ferromagnétiques (haute perméabilité) plutôt que dans l'air. Il tend à se répartir de façon homogène sur toute la section de façon à minimiser la réluctance « vue » par le flux (cf. question après sur la réluctance).

Q3: Conservation du flux de B

On considère le circuit magnétique suivant. Il est composé d'un matériau ferromagnétique à haute perméabilité. Sa section est variable et il comporte un entrefer de faible longueur. Pour chacune des deux sections S_1 (dans le fer) et S_2 (dans l'entrefer), on considère les champs B et H au niveau de la section (champs approximativement homogènes sur toute la section et dont l'orientation est normale) ainsi que le flux Φ à travers la section. Le rapport des sections est $S_1 = 3 S_2$ (schéma pas à l'échelle pour être plus lisible).



Sélectionnez les relations qui sont vraies :

Q3A) Flux

- $\varphi_1 = \varphi_2$ (OK)
- $\varphi_1 = 3 \varphi_2$
- $\varphi_1 = (1/3) \varphi_2$
- On ne peut rien dire de la relation entre ces flux

FB : le flux φ (flux du champ B) est **conservatif** (loi de Maxwell-Thomson), c'est-à-dire qu'il est nul à travers une surface fermée. Autrement dit, dans un tube de champ, le flux sortant est égal au flux entrant.

Vu les hypothèses sur le circuit magnétique (forte perméabilité et faible longueur de l'entrefer), les fuites dans l'air sont négligeables et donc chaque section du circuit est quasiment un tube de champ. Alors le flux à travers chaque section du circuit est identique.

B) Champ B

- $B_1 = B_2$
- $B_1 = 3 B_2$
- $B_1 = (1/3) B_2$ (OK)
- On ne peut rien dire de la relation entre ces champs

FB : Sachant que le flux de B est conservatif et que les fuites sont négligeables, on a vu que $\varphi_1 = \varphi_2$.

Par ailleurs, le champ B est approximativement homogène et normal à chaque section. Le flux à travers chaque section s'exprime donc par un simple produit champ \times section : $\varphi_1 = B_1 S_1$ et $\varphi_2 = B_2 S_2$.

Ainsi, le champ B est plus faible dans les zones de large section et plus intense dans les zones de section faible : un rétrécissement concentre le champ B.

C) Champ H

- $H_1 = H_2$

- $H_1 = 3 H_2$
- $H_1 = (1/3) H_2$
- On ne peut rien dire de la relation entre ces champs (OK)

FB : Seul le flux de B est conservatif. Il n'y a pas d'équivalent pour H.

Si l'on considère des sections dans un même matériau et que l'on suppose linéaire la relation entre B et H, alors on pourrait, à partir de la relation $B_1 = a.B_2$ (vraie, cf. question précédente), déduire une relation $H_1 = a.H_2$. Ce n'est pas le cas ici, puisque S_1 est dans le fer alors que S_2 est dans l'air.

Le théorème d'Ampère permettrait de trouver des relations sur les valeurs de H, en connaissant la longueur des différents segments.

Q4: Définition de la réluctance

On considère une section de matériau homogène de section S et de longueur L. On suppose que le comportement B-H du matériau est linéaire : $B = \mu.H$ (où μ est la perméabilité magnétique, souvent exprimée relativement à celle du vide : $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$). Quelle est sa réluctance ?

1. $R = (1/\mu).(S/L)$
2. $R = \mu.(S/L)$
3. $R = (1/\mu).(L/S)$ (OK)
4. $R = \mu.(L/S)$

FB : L'expression de R est à connaître. La réluctance est définie de telle façon qu'on obtienne une loi analogue à la loi d'Ohm : $\varphi = ni/R$. Son expression est analogue à la résistance d'un fil $(1/\sigma).(L/S)$, en remplaçant la conductivité électrique σ par la perméabilité magnétique μ .

Le flux tend à passer sur les chemins de *faible réluctance*, c'est-à-dire des chemins de forte perméabilité (fer), de large section (d'où l'épanouissement sur toute la section) et de faible longueur.

Q5: [Idée à rédiger] Calcul de réluctance ?

La réluctance du circuit magnétique suivant vaut $\propto H^{-1}$. On souhaite évaluer l'ordre de grandeur des fuites. On suppose pour cela que certaines lignes de champs traversent la fenêtre (air) du circuit verticalement [Schéma CM avec fuite]. En prenant en compte la réluctance de ces fuites, que vaut la réluctance équivalente vue par l'enroulement ? Variante : de combien est augmenté le flux vu par l'enroulement ?

2 Matériaux non linéaires

Q6: Définitions B_r & H_c

Deux grandeurs caractérisent typiquement le cycle BH d'un matériau ferromagnétique non linéaire : le **champ rémanent** et le **champ coercitif**. Donnez la définition correcte pour ces deux grandeurs caractéristiques. On suppose dans ces définitions que l'échantillon du matériau a été *préalablement*

magnétisé, c'est-à-dire que J a atteint sa valeur maximale J_{sat} .

Rappel : dans tout matériau, le champ B qui y règne est la somme de deux contributions : la perméabilité du vide $\mu_0 H$ et la « polarisation magnétique » J qui dépend de l'état du matériau (on parle aussi d'« aimantation de la matière » $M = J/\mu_0$ qui est la même grandeur, mais exprimée en A/m plutôt qu'en Tesla).

$$B = \mu_0 H + J \text{ (somme de vecteurs)}$$

Champ rémanent	Champ B (dans le matériau) lorsque le champ H (dans le matériau) est nul (OK)
	Champ B (dans le matériau) lorsque l'échantillon du matériau est placé au repos (pas d'excitation externe par des bobinages ou des aimants)
Champ coercitif	Champ H (dans le matériau) permettant d'annuler le champ B (OK)
	Champ H (dans le matériau) permettant d'annuler son aimantation
	Champ H (dans le matériau) permettant de magnétiser le matériau (amener J à sa valeur maximale J_{sat})

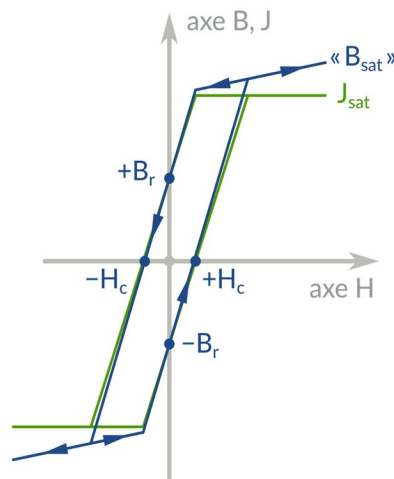
FB : Définition du champ rémanent (B_r) : $B_r = B(H=0)$, après que le matériau ait été aimanté. Voir un peu plus loin (question Champ H dans un aimant) sur le fait que les situations « $H=0$ dans le matériau » et « l'échantillon est placé au repos » sont très différentes.

Définition du champ coercitif (H_c) : c'est la valeur H (en négatif : $H = -H_c$) qui permet d'annuler B (pas J), après que le matériau ait été aimanté ($J = +J_{\text{sat}}$). Cela ne présage pas de la valeur de la polarisation : pour un aimant très coercitif (type NdFeB), on peut avoir une polarisation intacte ($J = +J_{\text{sat}}$) alors que pour des matériaux moins durs, on peut avoir une désaimantation ($J \approx 0$). À noter que certaines datasheets d'aimants fournissent néanmoins deux valeurs pour la coercivité : H_{cJ} (H tel que $J=0$) et H_{cB} (H tel que $B=0$, la définition « classique »).

La valeur de H permettant de magnétiser un aimant est nettement plus grande que le champ coercitif.

Q7: Cycle BH annotation

On a tracé le cycle B - H d'un matériau ferromagnétique doux. Annoter le schéma avec : axe B , axe H , $\pm B_r$ (champ rémanent), $\pm H_c$ (champ coercitif), J_{sat} (polarisation à saturation) et « B_{sat} » (champ B à saturation, même si c'est un peu abusif).



FB : Le champ B à saturation est « entre guillemets », car il n'y a jamais véritablement de saturation de B : lorsque la polarisation est saturée ($J = +J_{\text{sat}}$) on peut toujours augmenter B en augmentant H grâce à la perméabilité du vide : $B = J_{\text{sat}} + \mu_0 H$. Cependant, la pente μ_0 est tellement plus faible que la pente des bords du cycle ($\mu_r \cdot \mu_0$ avec $\mu_r \gg 1$) qu'en pratique cet abus de langage est acceptable.

[à ne pas marquer si on met la question suivante] *c'est un matériau doux, c'est-à-dire de faible champ coercitif, car on voit qu'il commence à se démagnétiser (baisse de J) même avant que H devienne négatif. Voir dans les diapos du cours des cycles de matériaux durs.*

Q8: Matériaux dur et doux : définition

On s'intéresse aux propriétés des matériaux magnétiquement durs ou doux.

A) Un matériau **doux** a pour propriétés :

- un faible champ coercitif H_c (OK)
- un fort champ coercitif H_c
- un cycle BH de grande aire
- un cycle BH d'aire faible (OK)

B) Un matériau **dur** a pour propriétés :

- un faible champ coercitif
- un fort champ coercitif (OK)
- un cycle BH de grande aire (OK)
- un cycle BH d'aire faible

FB : Un matériau doux est caractérisé par la faible valeur de H_c (et inversement : matériau dur = grand champ coercitif). L'aire du cycle BH varie en conséquence.

Les termes durs et doux (idem en anglais : hard & soft) sont historiques : les

aciers mécaniquement durs (rigide, cassant) sont magnétiquement durs alors que le fer pur est moins rigide et magnétiquement doux. Ces termes se sont généralisés à tous les matériaux ferromagnétiques.

Q9: Matériaux dur et doux : application

A) Pour faire un **aimant permanent**, on a besoin d'un matériau magnétiquement :

- dur (OK)
- doux

B) Pour réaliser le circuit magnétique d'un transformateur (ou tout autre machine où le flux est alternatif), on a besoin d'un matériau :

- dur
- doux (OK)

FB : Une grande coercivité (matériau dur) est importante pour éviter qu'un aimant se désaimante (voir aussi plus loin la question Champ H dans un aimant).

Au contraire, pour réaliser le circuit magnétique d'une machine où le flux (et donc B) est variable, il faut un matériau dont le cycle BH a une petite aire (matériau doux). En effet, la variation cyclique de B entraîne une dissipation d'énergie égale à cette aire (unité de BH : J/m³). Ce sont les pertes « par hysteresis ».

Q10: Ordres de grandeurs de B

Q10A) Dans un acier dit « électrique » (ex. : tôles Fe-Si utilisées pour les transformateurs et machines 50 Hz), la saturation se produit pour un champ B aux alentours de B = ?

R : 1.5 à 2 T

FB : B = 1.5 à 2 T est un ordre de grandeur pour un acier Fe-Si typique (3% de silicium). Cette valeur dépend beaucoup de la composition chimique.

Par ailleurs, 2 T est la valeur de la polarisation à saturation, c'est-à-dire la valeur extrême atteinte par J lorsque H est très élevé. Cependant, la saturation ne se fait pas brutalement à 2 T, mais progressivement dès que B dépasse 1 T.

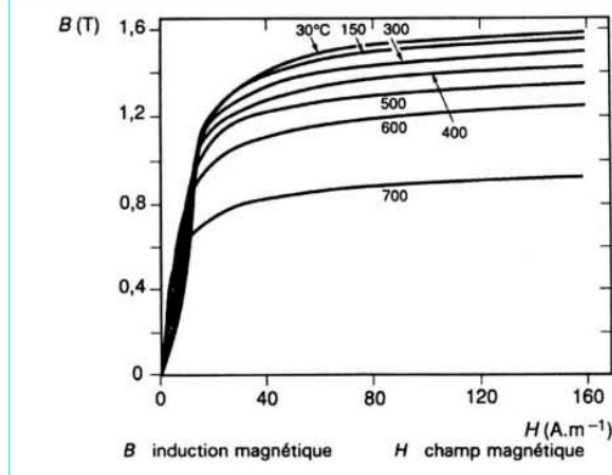


Figure 20 – Courbes de première aimantation en fonction de la température pour une tôle Fe-3 % Si à grains orientés [11]

Source graphique : Jean-Claude Bavay, Jean Verdun, « Alliages fer-silicium », Techniques de l'Ingénieur, D2110 v1, 1991. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-convertisseurs-et-machines-electriques-tiadb/archive-1/alliages-fer-silicium-d2110/>

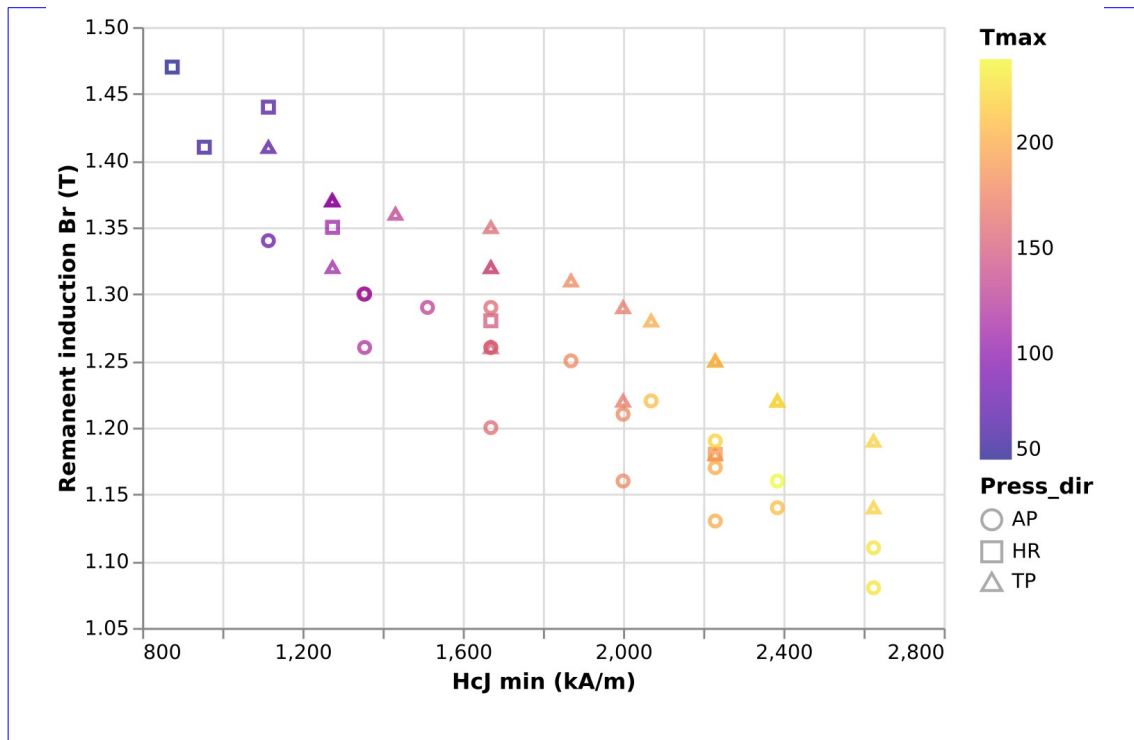
Q10B) Dans un aimant terre rare de la famille NdFeB, le champ rémanent est de l'ordre de $B_r = ?$

R : 1.0 à 1.5 T

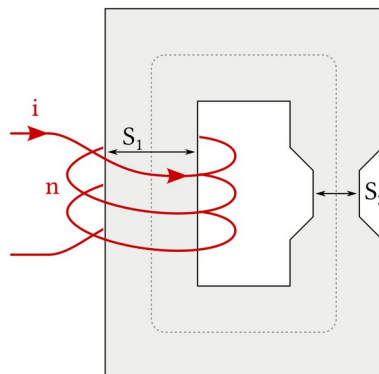
FB : $B_r = 1.0$ à 1.5 T pour un aimant terre rare de la famille NdFeB.

C'est une plage de valeurs, car il y a généralement un compromis entre les différentes caractéristiques souhaitables de l'aimant : forte rémanence, forte coercivité, haute température de Curie (température au-delà de laquelle l'aimantation est irréversiblement perdue) et faible coût (\rightarrow éviter les matériaux les plus rares et coûteux tels que le dysprosium qui augmente la coercivité ou bien les traitements physico-chimiques avancés qui augmentent la rémanence).

Voici une illustration de ces compromis réalisée avec catalogue d'aimants NdFeB du fabricant allemand VAC (<https://vacuumschmelze.com/Products/Permanent-Magnets/NdFeB-Magnets---VACODYM>, gamme « VACODYM » issue du catalogue daté de 2015). On observe que les aimants les plus coercitifs sont ceux qui résistent le mieux à la température, mais par contre ont une plus faible induction rémanente.



Q11: CM avec saturation



On considère un circuit magnétique composé d'un acier ferromagnétique à haute perméabilité. Sa section est variable avec $S_1 = 3 S_2$ et l'on donne $B_1 = 1$ T. Que vaut approximativement B_2 ?

- $B_2 = 1$ T
- $B_2 = 2$ T (OK)
- $B_2 = 3$ T

FB : En l'absence de saturation, on aurait $B_2 = 3$ T par conservation du flux.

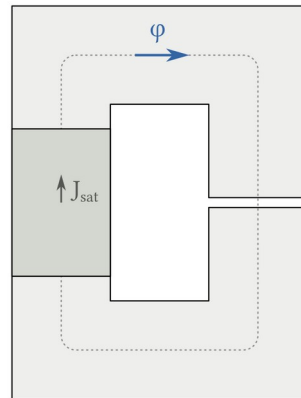
Cependant, l'acier sature typiquement vers 2 T (cf. question précédente).

À noter que le flux de B étant tout de même conservatif, il y a forcément des fuites autour du rétrécissement.

Q12: Champ H dans un aimant

On considère un circuit magnétique composé d'un matériau de très grande perméabilité, comportant un aimant et un entrefer. On oriente le circuit magnétique avec un contour dans le même sens que la polarisation J de

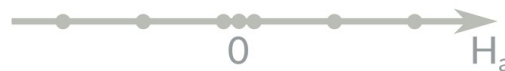
l'aimant, de sorte que B est positif partout.



On considère trois variantes :

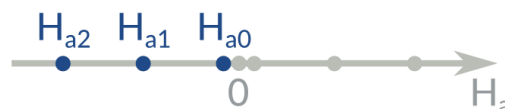
- variante 0 : entrefer de longueur nulle (pas d'entrefer)
- variante 1 : « petit » entrefer
- variante 2 : « grand » entrefer

On étudie le champ H dans l'aimant pour chacune de ces trois variantes. Placez les valeurs H_{a0} , H_{a1} et H_{a2} sur la droite des nombres réels, c'est-à-dire : classez ces valeurs entre elles et par rapport à zéro.



FB : Voir cours et TD2 : le champ H dans un aimant, en l'absence d'excitation autre (c.-à-d. pas enroulements parcourus par un courant ou autres aimants) est toujours **démagnétisant**, c'est-à-dire de direction opposée à celle de sa magnétisation. Vu les notations, cela signifie que tous les H_a sont négatifs. Cet effet est d'autant plus fort que l'entrefer est grand : $H_{a2} < H_{a1} < H_{a0} \leq 0$.

Pour un entrefer nul, avec un matériau de forte perméabilité, l'aimant est en situation de « court-circuit magnétique » : $H_{a0} = 0^-$ (le champ H est toujours légèrement négatif, car la réluctance du cadre ferromagnétique n'est jamais strictement nulle comme μ n'est jamais infinie).



Précisons que, contrairement à la situation analogue électrique où un court-circuit électrique peut faire des dégâts (ex. : explosion d'une batterie <https://youtu.be/bNNWbm681AI?t=259>), le court-circuit magnétique est la situation où l'effet de démagnétisation est le plus faible. Le champ B est alors maximal, égal au champ rémanent. Pour l'aimant, c'est donc une situation de « repos très confortable ».