

Aimants permanents.

Pré - requis :

- Courbe de 1^{ère} aimantation d'un matériau.
- théorème d'Ampère

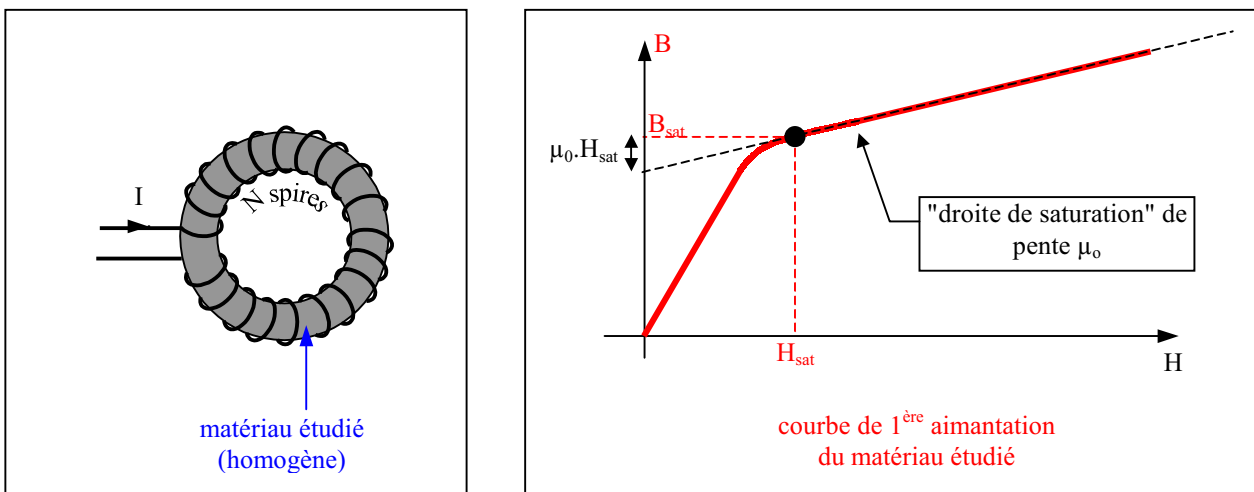
Objectif :

- Connaître la différence entre un matériau dur et un matériau doux dans le plan B(H)
- Savoir calculer les dimensions optimales L et S d'un aimant permanent

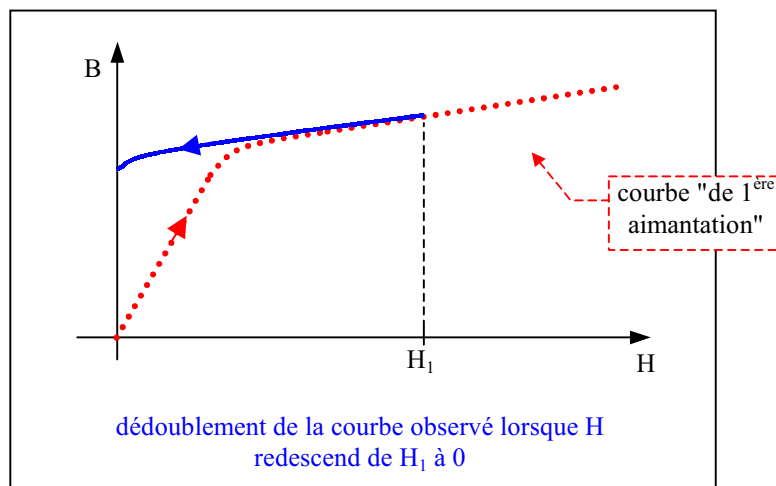
1. Cycle d'hystérésis.

1.1. Observation du phénomène d'hystérésis.

On sait que la courbe B(H) dite "de 1^{ère} aimantation" d'un matériau magnétique nous permet de distinguer les matériaux magnétiques des matériaux non magnétiques. Cette courbe a été construite à partir des relevés du flux et du courant I constant appliqués au matériau usiné en forme de tore fermé, avec lesquels on en déduit $B = \Phi/S$ et $H = NI/l$ (avec S = section du tore et l = longueur moyenne du tore) qui ne dépendent plus des dimensions du tore mais uniquement du matériau étudié, et qui permet, en outre, de contrôler parfaitement l'excitation H en agissant sur I :



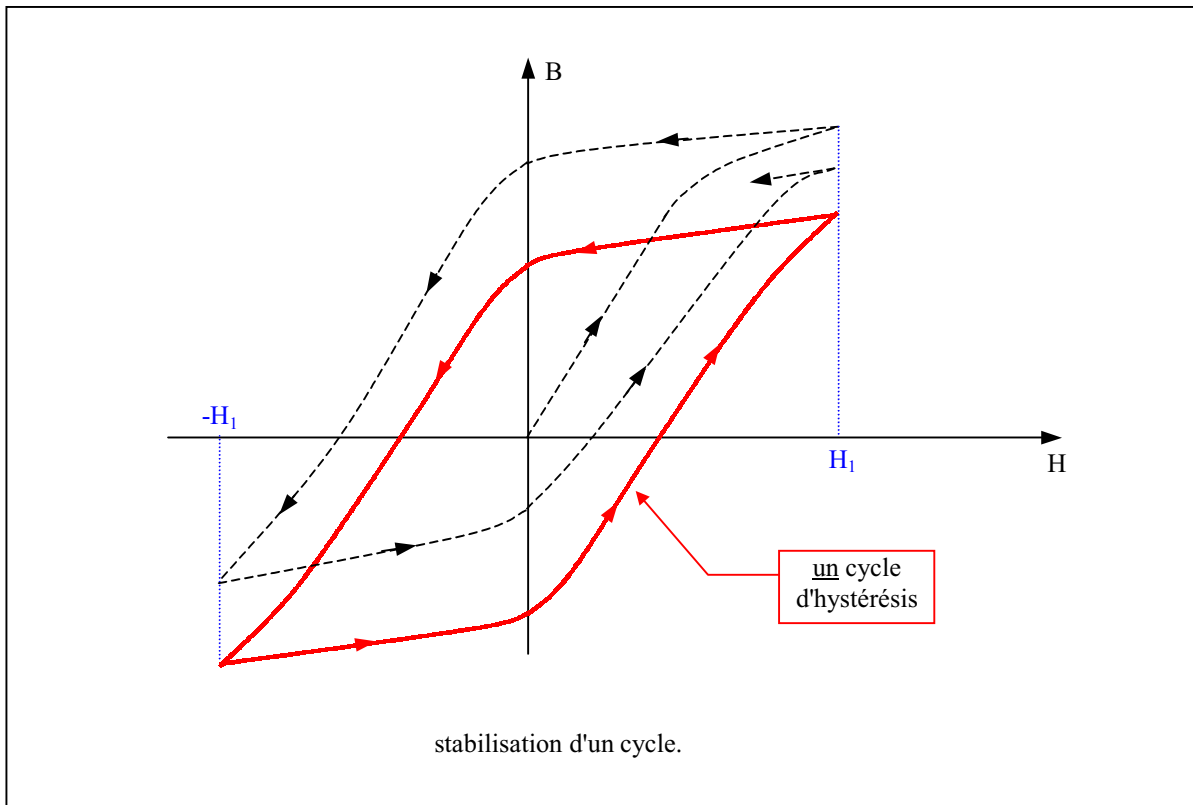
En traçant cette courbe on n'a jamais fait "marche arrière" : on a toujours augmenté l'intensité du courant sans jamais la diminuer...or il se trouve que tous les matériaux magnétiques ne réagissent pas de la même manière lorsqu'on diminue l'intensité du courant. Pour certains matériaux, le fait de diminuer I (donc H) à partir d'une certaine valeur provoque un "dédoublage de la courbe" au lieu d'un simple retour sur la courbe d'origine : ce cas est typique des matériaux que l'on nomme alors "durs". Une absence de dédoublage de la courbe caractérise les matériaux que l'on nomme "doux" ⁽¹⁾. Ce phénomène de dédoublage est appelé phénomène d'*Hystérésis* du grec husterein, "être en retard" = retard à la démagnétisation (*désaimantation* = démagnétisation dans le langage courant).



¹ En réalité, un matériau magnétique parfaitement doux n'existe pas, il y a toujours un léger dédoublage de la courbe.

Ce dédoublement de courbe met en évidence la "non réversibilité"² du phénomène de magnétisation d'un matériau magnétique dur : pour une excitation H donnée, B peut avoir plusieurs valeurs possibles, cela dépend du passé magnétique du matériau. En d'autres termes il y a un effet de mémorisation (qui sera utilisé pour les bandes magnétiques audio ou vidéo !). Cet effet de mémorisation³ sera inévitablement suivi d'un emmagasinement d'une énergie (magnétique) dans le matériau⁴, à l'origine des pertes par hystérésis observées en courant alternatif, c'est-à-dire où le phénomène d'hystérésis se met en évidence.

La courbe $B(H)$ d'un matériau dur se dédoublant, on finit par obtenir un cycle lorsqu'on applique un I variant progressivement de $-I_1$ à $+I_1$ (donc H varie de $-H_1$ à H_1) : un cycle fermé est obtenu lorsqu'on effectue plusieurs "passes" de $-I_1$ à $+I_1$: on dit que l'on "stabilise" le cycle. Le cycle fermé obtenu est appelé "cycle d'hystérésis" :



Le cycle d'hystérésis précédent ne possède cependant pas une forme précise typique du matériau : il dépendait de l'intensité maximale I_1 obtenue pour réaliser le cycle. Pour obtenir un cycle caractéristique du matériau seul (et indépendant de I maximum appliqué à la bobine magnétisante) il faut augmenter I jusqu'à I_{sat} (vu à la courbe de 1^{ère} aimantation) qui provoque la saturation du matériau (repérable précisément par une absence de dédoublement de la courbe lorsqu'on réduit à nouveau l'intensité du courant). On aboutit alors à un cycle limite qui, quant à lui, est bien caractéristique du matériau seul. Les intersections qu'il a avec les axes sont donc caractéristiques du matériau : on les appelle "excitation coercitive H_c " et "induction (ou champ magnétique) rémanent B_r ", donné par le fabricant du matériau étudié ;

On pourra constater que la courbe d'hystérésis ne passe pas par le point $(0,0)$. On verra que cela signifie qu'avec la présence d'un entrefer on pourra avoir H différent de 0 alors même que $I = 0$: la relation $H = NI/l$ (c'est-à-dire $H = 0$ lorsque $I = 0$) n'est valable qu'en absence d'entrefer ou en présence de matériaux doux uniquement.

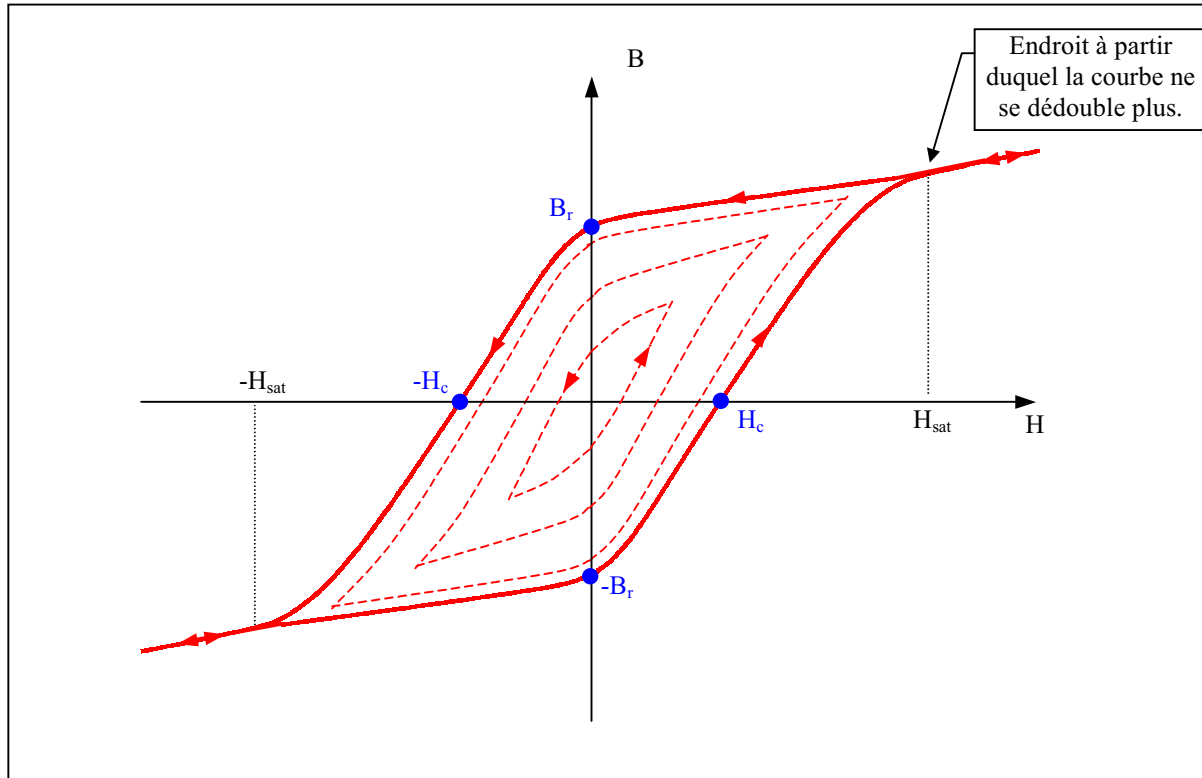
Noter également que B_{sat} ne peut pas se lire sur le cycle d'hystérésis mais seulement sur la courbe de première aimantation⁽⁵⁾.

² Comparables aux transformations non réversibles vues en Thermodynamique (BTS Cira, BTS maintenance...)

³ Qui constitue finalement une information sur le passé magnétique du matériau étudié.

⁴ Toute information nécessite l'apparition d'une énergie.

⁵ D'ailleurs B_{sat} (induction de saturation) porte mal son nom puisqu'il ne s'agit pas d'une induction maximale.



Une fois que le matériau a été *complètement magnétisé* (c'est-à-dire mené à saturation), on constate que la coupure du courant ($I = 0 \Rightarrow$ en absence d'entrefer on a $H = NI/\ell = 0$) n'aboutit plus à une annulation du champ magnétique : on obtient B_r ou $-B_r$, selon le sens de variation du courant au moment de sa coupure. C'est cette propriété que l'on va exploiter pour fabriquer des aimants permanents.

Remarques :

- la réluctance $\mathfrak{R} \triangleq NI/\Phi$ n'est plus connue car à un flux Φ donné correspond une infinité de NI possibles (infinité de cycles d'hystérésis) \Rightarrow **\mathfrak{R} (donc également μ) n'existe pas pour un matériau dur.**⁽⁶⁾
- Pour annuler le champ magnétique on constate qu'il ne suffit plus de couper le courant de la bobine magnétisante, comme on le faisait pour un matériau doux : il faut appliquer l'excitation coercitive, c'est-à-dire un courant (positif ou négatif selon l'état de magnétisation) tel que $I = H_c \times \ell/N$. Attention : le champ magnétique n'est annulé que si le tore est complètement fermé ; en la présence d'un entrefer cela n'aboutit pas tout à fait à une annulation de champ magnétique (il faudrait un courant plus intense). On en parlera ultérieurement plus précisément avec "la droite de recul".

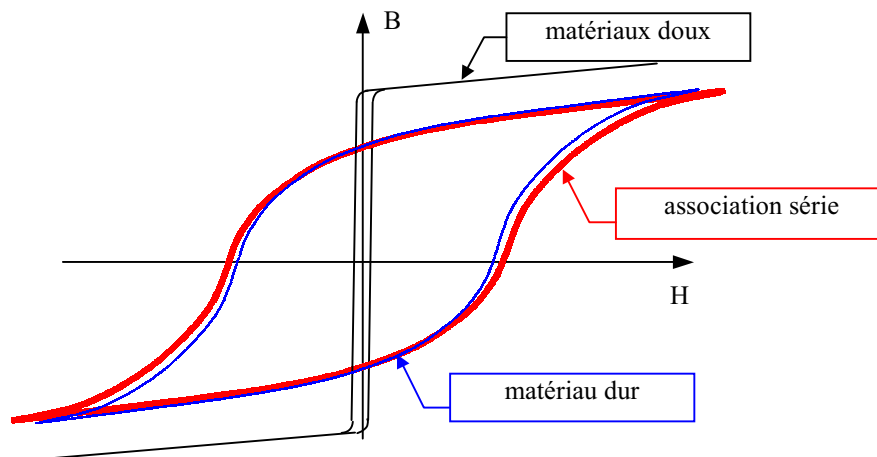
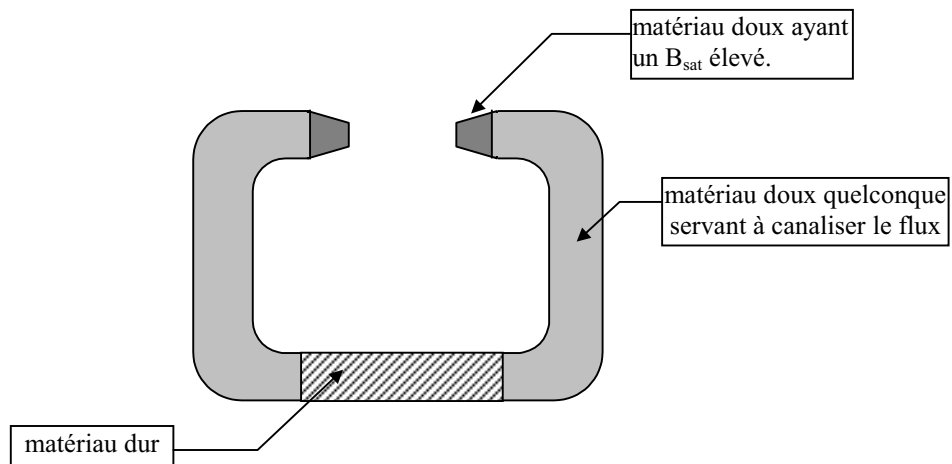
Un matériau magnétique est dit "doux" s'il possède une excitation coercitive faible (≤ 100 A/m). Un matériau magnétique qui n'est pas doux est dit "dur". On utilise les matériaux magnétiques durs pour fabriquer des aimants permanents.

A noter qu'un matériau parfaitement doux (c'est-à-dire $B = 0$ lorsque $H = 0$) n'existe pas : il existe toujours un cycle d'hystérésis, aussi "mince" soit-il. L'excitation coercitive minimale que l'on arrive à créer (matériaux amorphes au cobalt) est de l'ordre de 0,01 A/m. L'excitation coercitive maximale que l'on arrive à créer (avec un alliage Nd, Fe, B) est quant à elle de l'ordre de 1 000 000 A/m (soit 100 millions de fois plus élevée que précédemment).

⁶ A noter que les constructeurs indiquent parfois μ pour un matériau dur : il s'agit en fait du μ maximal obtenu sur la courbe de 1^{ère} aimantation, parfaitement inexploitable en régime alternatif. On peut cependant définir un μ dynamique lorsque le courant est légèrement variable autour d'une valeur fixe. Sur ce sujet il faut voir plus précisément un cours sur les bobines de lissage de courant.

1.2. Association série d'un matériau doux et d'un matériau dur.

Un aimant permanent n'est généralement pas fabriqué à partir d'un seul matériau :



L'association série⁷ d'un matériau doux et d'un matériau dur donne un matériau dur : le cycle d'hystérésis de l'association (en rouge) est pratiquement identique à celle du matériau dur à condition que B_{sat} des matériaux doux soit $> B_{sat}$ du matériau dur. On peut donc considérer que l'association série d'un matériau dur et d'un matériau doux est équivalent à la présence du matériau dur seul (on verra ultérieurement que les dimensions du matériau doux sont également "transparentes" car elles n'interviendront pratiquement pas lors de la construction de l'aimant permanent).

1.3. Désaimantation.

Désaimanter un aimant (ou tout matériau magnétique) revient à lui retirer son passé magnétique. Il ne s'agit pas seulement d'obtenir $B = 0$ (une simple excitation égale à l'excitation coercitive suffirait si le matériau était refermé sur lui-même, légèrement supérieure dans le cas contraire) mais d'obtenir $B = 0$ lorsque $H = 0$, c'est - à - dire $B = 0$ lorsque l'aimant est isolé de tout champ magnétique ou excitation extérieure. Pour obtenir cela, la solution la plus simple est de faire décrire au point de fonctionnement (B,H) des cycles d'hystérésis de + en + petits centrés autour de l'origine 0 des axes, cela s'effectue en appliquant un courant $i(t)$ alternatif que l'on diminue petit à petit.

Des désaimantations accidentelles peuvent cependant avoir lieu lorsque la température du matériau augmente⁽⁸⁾ (à la température de Curie du matériau le champ magnétique s'annule) ou lors de chocs mécaniques (certains matériaux magnétiques y sont sensibles). On verra ultérieurement que la présence d'un entrefer a également pour effet de désaimanter plus ou moins légèrement le matériau mais il ne s'agit pas de la désaimantation du matériau, au sens strict du terme.

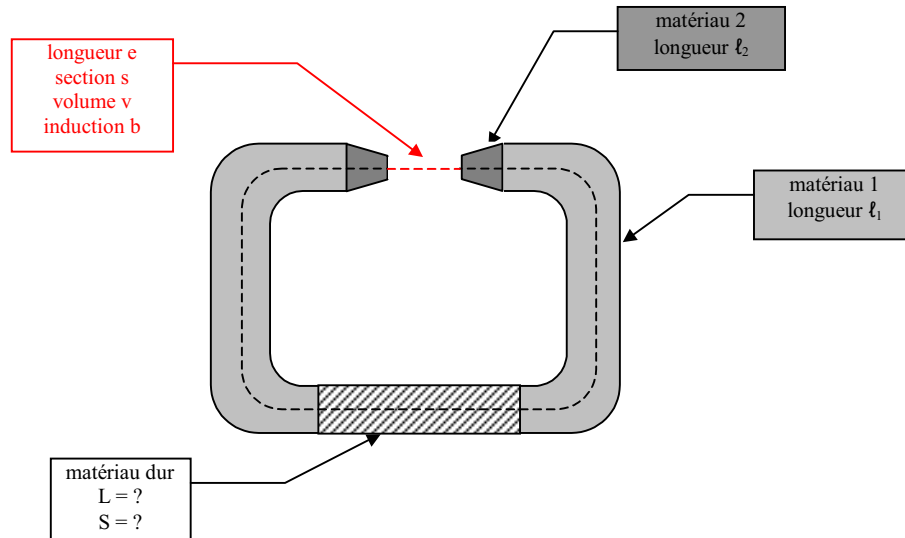
⁷ = matériaux traversés par le même flux, c'est-à-dire mis bout à bout.

⁸ Les ferrites sont très sensibles aux variations de température.

2. Fabrication d'un aimant.

2.1. Objectif de la fabrication.

Un aimant correctement fabriqué a été soumis à des règles de fabrication précises. Ces règles visent toutes à atteindre un seul but : produire une induction b donnée dans l'air (entrefer) avec le minimum de volume de matériau. **Le volume d'entrefer $v = e \times s$ est imposé** (il s'agit donc d'une donnée de départ, issu d'un cahier des charges par exemple) par des contraintes d'encombrement ou de puissance (en général e est pris le plus petit possible et s est tel que l'on ait un flux ou des surfaces utiles acceptables). Les caractéristiques de l'entrefer sont donc des données du problème (en rouge ci-dessous) :

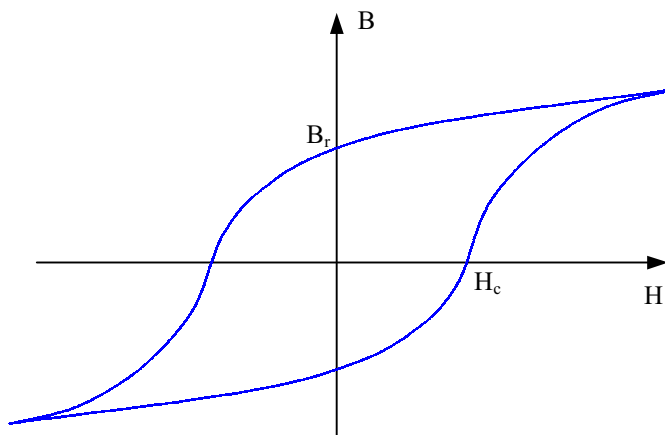


Le matériau 1 est du fer doux pas cher, facilement "usinable" ⁽⁹⁾ pour donner la géométrie voulue à l'aimant et le matériau 2 est un matériau doux dont B_{sat} est $\geq b$ qui est là pour permettre la production d'un b éventuellement intense (la technologie actuelle permet de fabriquer des matériaux dont B_{sat} atteint 2,45 T).

Les matériaux 1 et 2 seront des matériaux "transparents" pour notre étude : on verra que leur longueur l_1 et l_2 n'interviendra pas. Le matériau dur est souvent moins facilement usinable que les matériaux doux ⁽¹⁰⁾. Ce sera un "pavé" dans la suite du cours.

2.2. Détermination des dimensions L et S du matériau dur.

Le matériau dur est supposé choisi ⁽¹¹⁾, c'est-à-dire que son cycle d'hystérésis est une donnée du problème. Imaginons que le cycle d'hystérésis du matériau dur est le suivant :



⁹ A l'origine les matériaux utilisés pour fabriquer les aimants permanents étaient des aciers, matériaux mécaniquement "durs" par rapport au fer. C'est l'origine du mot "dur" utilisé en magnétisme. Par la suite on donnera aux matériaux magnétiques incapables de produire des aimants permanents (comme le fer) l'adjectif de "doux" qui étaient, à l'origine, mécaniquement "mous".

¹⁰ noter que certains aimants permanents sont mécaniquement mous pour des applications précises (aimants à l'intérieur des portes de réfrigérateur, aimants de moteurs à courant continu de quelques watt...).

¹¹ On verra plus tard la manière de le choisir parmi une liste de matériaux candidats.

Ce matériau dur impose une caractéristique B(H) qui joue le même rôle que la caractéristique statique d'un générateur U(I) d'un circuit électrique. L'entrefer peut être considéré comme la "charge" du circuit magnétique, il impose également une caractéristique B(H) au circuit magnétique et joue le même rôle qu'une résistance électrique connectée au générateur électrique précédent. Si l'on applique le théorème d'Ampère à la ligne de champ moyenne dessinée au paragraphe 2.1. précédent nous pouvons connaître la caractéristique B(H) imposée par la présence de l'entrefer :

$$\sum H\ell = NI \Rightarrow \sum H\ell = 0 \text{ (pas de bobine magnétisante, donc } I = 0) \Rightarrow H.L + H_1.\ell_1 + H_2.\ell_2 + h.e = 0$$

Or les matériaux 1 et 2 sont des matériaux magnétiques doux, qui possèdent donc forcément un H faible devant le H du matériau dur (et devant le h de l'entrefer qui est de loin le plus intense) on peut donc supposer que l'on peut négliger $H_1.\ell_1 + H_2.\ell_2$ devant H.L (une fois tous les calculs terminés, il faudrait s'assurer, pour être rigoureux, que cette hypothèse de calcul est bien vérifiée). On considère donc que l'équation précédente se résume à :

$$H.L + h.e = 0$$

Il faut obtenir une fonction B(H) à partir de la relation précédente afin de pouvoir l'associer à la courbe B(H) du matériau magnétique : il faut donc éliminer la variable h...on n'a pas encore grillé toutes nos cartouches car on sait que l'entrefer est non magnétique, et donc que $h = b/\mu_0$. La relation précédente peut donc s'écrire également $H.L + \frac{b}{\mu_0}.e = 0$. De plus on peut

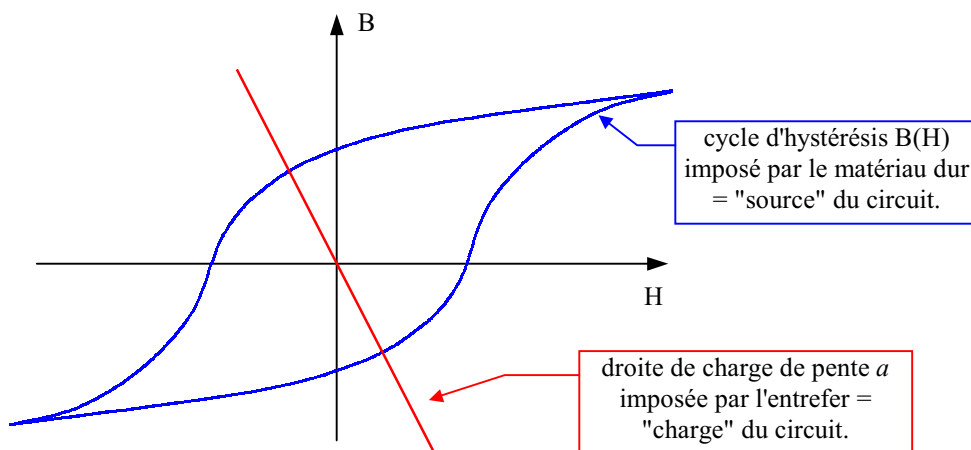
considérer que l'on a un tube de champ, et si l'on considère que l'entrefer sera suffisamment petit pour que les lignes de champ ne s'écartent pas les unes des autres lorsqu'elles le traverse, on peut considérer que le flux se conserve, et donc que $B \times S = b \times s$. On obtient donc la relation :

$$H.L + \frac{S.e}{s.\mu_0}.B = 0$$

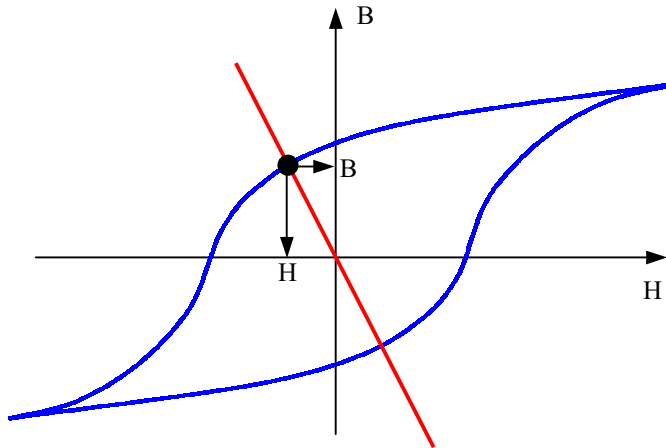
C'est gagné ! On en déduit que :

$$B = -\mu_0 \frac{s.L}{S.e} \times H \triangleq -a \times H$$

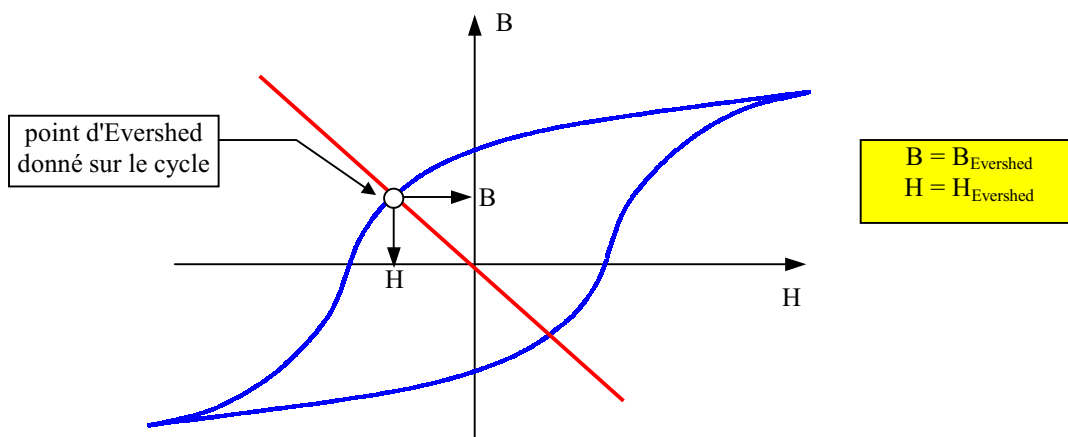
La caractéristique de la charge est donc une droite de pente $a \triangleq \mu_0 \frac{s.L}{S.e}$ analogue de la droite U(I) d'une résistance ! Cette droite est appelé "droite de charge" car elle est imposée par la charge du circuit magnétique, c'est-à-dire par l'entrefer. Si L et S sont données cela nous donne une valeur numérique de a et l'on peut alors tracer la droite de charge dans le plan B(H) du cycle d'hystérésis du matériau dur :



La solution graphique (= valeur de B dans le matériau dur) qui obéit au deux contraintes est donnée par l'intersection des 2 courbes B(H) qui nous donne B et H présent dans le matériau dur :



En fait le critère d'Evershed (que l'on démontrera ultérieurement) nous apprend que la droite doit passer par un point précis si l'on veut un minimum de volume de matériau dur (son prix est proportionnel à son volume, ou poids !) : cela va imposer des dimensions L et S au matériau dur. Ce point est parfois mentionné sur les courbes B(H) données par les fabricants de matériaux, on doit donc faire passer la droite par ce point (point blanc ci-dessous) ce qui nous impose B et H mais aussi la pente de la droite de charge : $a = B/H$ en valeur absolue :



A partir du point d'Evershed on en déduit la section S du matériau dur, grâce à la loi de conservation du flux (rappel : b et s dans l'entrefer sont des données du problème, B est l'ordonnée du point d'Evershed du matériau dur considéré) :

$$S = \frac{b}{B} s$$

A partir de la connaissance de S, on peut en déduire la longueur L du matériau dur : $a = B/H$, or $a = \mu_0 \frac{s.L}{S.e}$, d'où la valeur de L

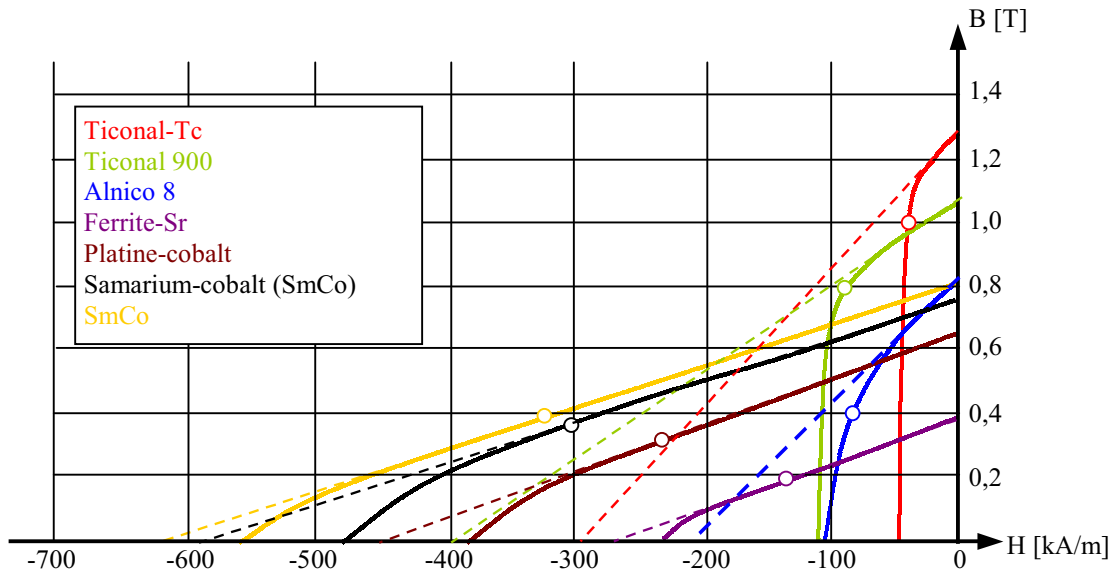
$$L = \frac{B.S}{\mu_0.H.s} \times e$$

Les dimensions L et S du matériau dur sont donc déterminées...il n'y a plus qu'à le découper ! Les matériaux doux 1 et 2 vus auparavant sont uniquement là pour conduire le flux vers l'entrefer (rappel : ils sont plus faciles à usiner que les matériaux durs). Leur forme dépend de l'application que l'on envisage. On doit cependant vérifier que leur longueur reste telle que $H_1 \times \ell_1 + H_2 \times \ell_2 \ll H \times L$. En pratique, la présence des matériaux doux et des fuites de flux amènent à augmenter légèrement les dimensions du matériau dur.

Remarque : il y a en réalité 2 points d'intersections de la courbe d'hystérésis avec la droite de charge, cela n'a aucune importance car ça détermine uniquement la polarité Nord ou Sud des pôles. Le point d'intersection considéré dépend en fait de l'état magnétique du matériau avant "l'introduction" de l'entrefer (voir le processus de fabrication de l'aimant ultérieurement).

2.3. Critère d'Evershed.

Le point d'Evershed vu précédemment était une donnée du problème : on l'obtient en fait à partir de la caractéristique utile B(H) du matériau dur utilisé. Ci-dessous on a représenté plusieurs caractéristiques utiles de matériaux durs avec les points d'Evershed (points blancs) et les tangentes à l'origine (que l'on utilisera par la suite pour les droites de recul) :



Comment les fabricants peuvent-ils connaître le point d'Evershed d'un matériau ? En fait on sait que pour tout circuit magnétique (assimilé à un tube de champ) on a la conservation du flux :

$$\Phi = B \times S = b \times s \quad (1)$$

De plus on a vu que le théorème d'Ampère appliqué à la ligne de champ moyenne du circuit magnétique nous donne :

$$H \times L = - h \times e \quad (2)$$

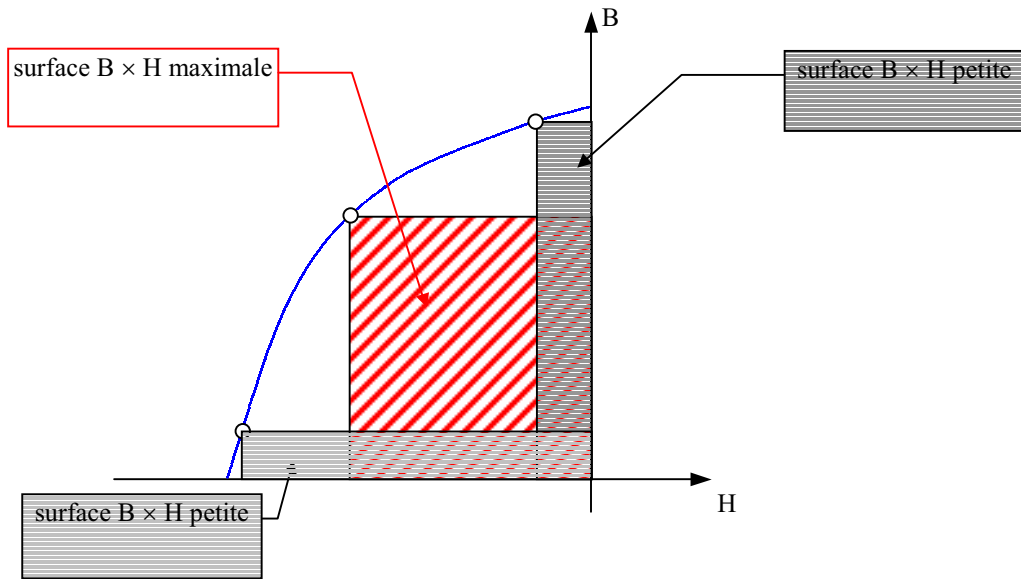
(1) × (2) nous donne $B \times S \times H \times L = - b \times s \times h \times e$ ce qui nous permet d'introduire le volume $V = S \times L$ du matériau dur. On a donc $B \times H \times V = - b \times s \times h \times e = -b^2/\mu_0 \times s \times e$ car $h = b/\mu_0$ dans l'entrefer. Ainsi on obtient :

$$V = \frac{b^2 \cdot s \cdot e}{\mu_0} \times \left| \frac{1}{B \times H} \right| = C^{te} \times \left| \frac{1}{B \times H} \right|$$

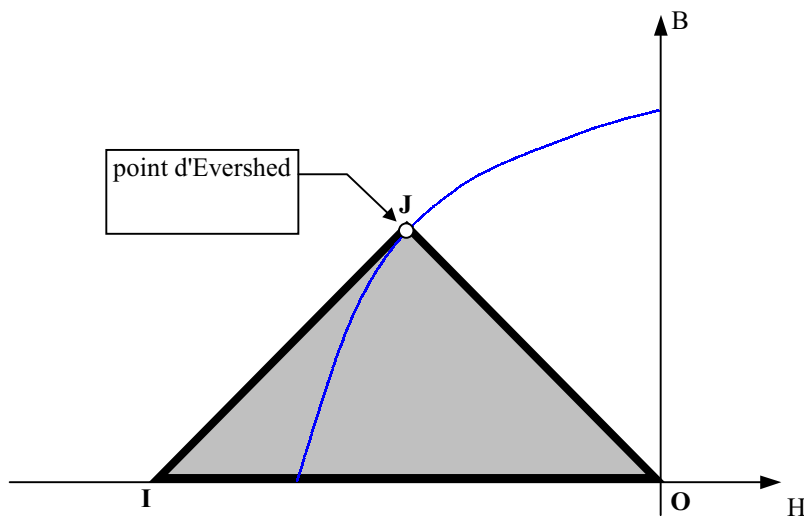
Critère d'Evershed :

Le volume V du matériau magnétique est minimal lorsque le produit B × H dans le matériau dur est maximal.

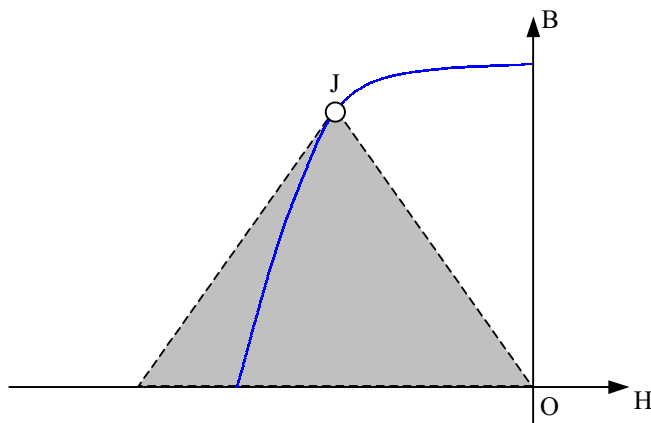
Reprenons alors la partie utile du cycle d'hystérésis du matériau dur précédent : on constate qu'il n'y a qu'un seul point qui vérifie ce critère (facilement repérable car B × H représente une surface) : c'est le "point d'Evershed" :



Pour repérer avec précision le point d'Evershed, on démontre mathématiquement que $B \times H$ est maximal en J si le point J est tracé tel que la droite (IJ) tangente en O au cycle d'hystérésis et la droite (OJ) qui passe par l'origine O forment un triangle (O,I,J) isocèle en J :



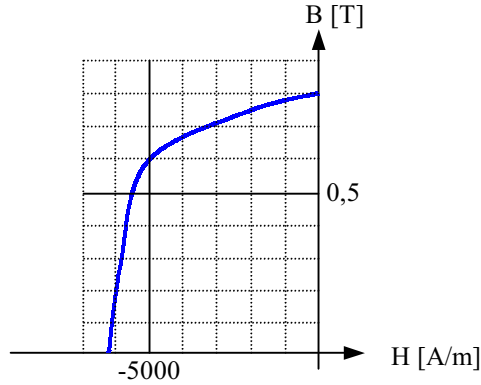
On pourra vérifier que les points d'Evershed donnés sur les courbes utiles des différents matériaux données précédemment vérifient bien cette propriété. En pratique, le point d'Evershed est aisément repérable si la courbe utile est suffisamment coudée : le point J se trouve très proche du coude :



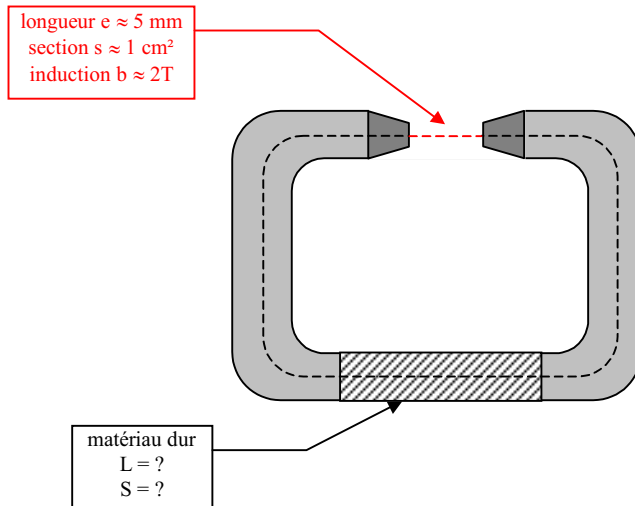
On constate finalement que la droite de charge définie précédemment par la relation $B = -\mu_0 \frac{s \cdot L}{S \cdot e} \times H$ doit se confondre avec la droite (OJ) si l'on veut respecter le critère d'Evershed.

Exercice

On possède un matériau dont la caractéristique utile B(H) est donnée ci - dessous :



Le fabricant n'a pas donné la position du point d'Evershed. L'aimant est soumis au contraintes suivantes :

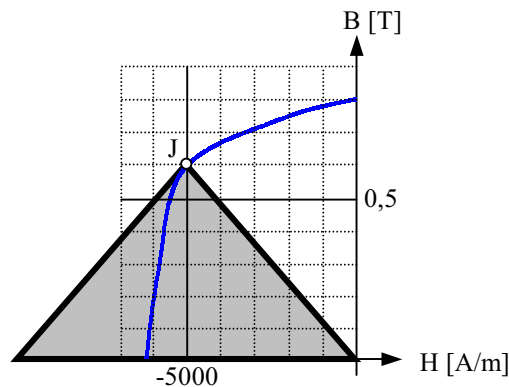


1. Déterminez graphiquement B et H de manière à avoir le produit $B \times H$ maximal.
2. Donnez la section S du matériau pour avoir le champ magnétique b voulu dans l'entrefer.
3. Déduisez-en la longueur L nécessaire à la production de b.
4. Que conclure de cette étude ?

Réponse :

1.

On trace le triangle isocèle de manière à avoir le point d'Evershed : ce point nous donne B et H qui donnent le produit $B \times H$ maximal pour ce matériau :



On lit donc les coordonnées du point J : $B \approx 0,6 \text{ T}$ et $H \approx - 5000 \text{ A/m}$

2.

On assimile le circuit magnétique à un tube de champ, on néglige les fuites de flux dans l'entrefer, on a donc $B \times S = b \times e$ et donc :

$$S = \frac{b}{B} \times s \approx \frac{2}{0,6} \times 1.10^{-4} \approx 333.10^{-6} \text{ m}^2, \text{ soit } 3,3 \text{ cm}^2 \text{ environ}$$

3.

La droite de charge doit passer par le point J, elle a donc pour pente (au signe près) $a = B/H \approx 0,6/(5000) \approx 120.10^{-6} \text{ T.m/A}$. Or on sait (ou on le retrouve à l'aide du théorème d'Ampère) que la pente de la droite a pour expression $a = \mu_0 \frac{s.L}{S.e}$

On en déduit que :

$$L = \frac{a.S}{\mu_0.s} e \approx \frac{120.10^{-6} \times 333.10^{-6}}{4\pi.10^{-7} \times 1.10^{-4}} \times 5.10^{-3} \approx 1,6 \text{ mètre}$$

4.

La grande valeur de L trouvée précédemment nous conduit à admettre qu'il ne faut pas être trop "gourmand" : une valeur $b \approx 2$ teslas est déjà énorme et ne s'acquiert qu'au prix fort (volume de matériau important). On peut à présent vérifier que notre hypothèse "fuite de flux négligeable" est bonne car on a bien $e \ll L$

2.4. Choix du matériau qui donne le plus petit volume.

Pour un matériau donné, les coordonnées H_j et B_j du point J d'Evershed donnent l'énergie spécifique¹² du matériau, elle est définie par la relation :

$$E \triangleq |B_j \times H_j| \text{ en joule par mètre-cube [J/m}^3\text{]}$$

Plus l'énergie spécifique E d'un matériau dur est grande, et plus le volume de matériau (inversement proportionnel à E) sera donc petit : c'est donc le matériau qui possède la plus grande énergie spécifique qui donne le minimum de volume à l'aimant. L'énergie spécifique d'un matériau est souvent donnée par son fabricant.

Comment fabriquer un "bon" matériau à aimant ? En fait on s'aperçoit que l'allure de la courbe utile ne doit pas être quelconque si l'on veut obtenir une énergie spécifique élevée :

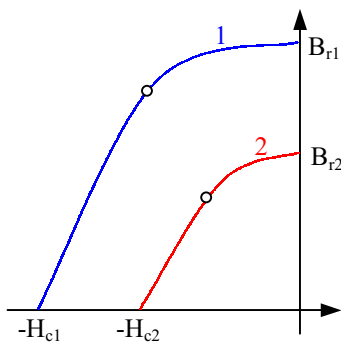


figure 1

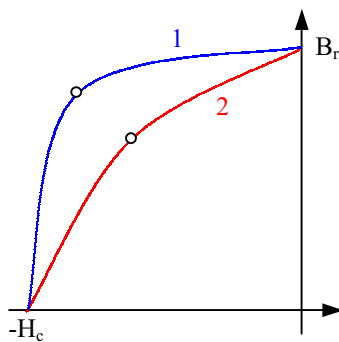


figure 2

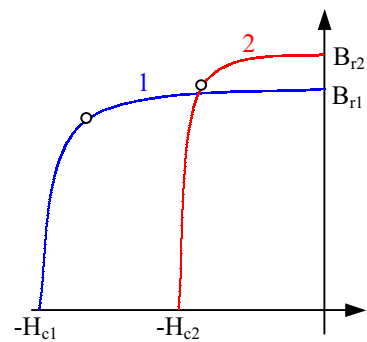


figure 3

Pour les 3 figures précédentes, le matériau 1 peut être privilégié au matériau 2 car il donnera un volume d'acier à aimant plus petit :

¹² Il s'agit en fait d'une densité volumique d'énergie.

figure 1 : l'énergie spécifique du matériau 1 est supérieure à l'énergie spécifique du matériau 2.

figure 2 : malgré un champ rémanent et une excitation coercitive identiques, l'énergie spécifique du matériau 1 est encore supérieure à l'énergie spécifique du matériau 2.

figure 3 : malgré un champ rémanent plus élevé du matériau 2, l'énergie spécifique du matériau 1 reste supérieure à l'énergie spécifique du matériau 2.

Conclusion :

Pour avoir une énergie spécifique élevée il faut privilégier le matériau qui possède non seulement $B_{\text{rémanent}}$ et $H_{\text{coercitif}}$ les plus élevés possibles, mais également avoir la courbe utile la plus rectangulaire possible si l'on veut obtenir le minimum de volume de matériau.

Remarques :

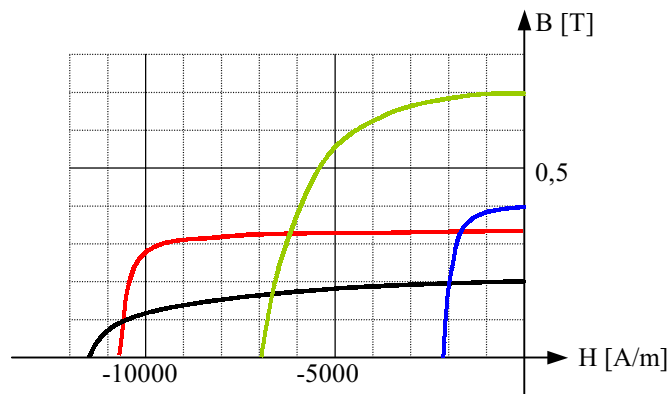
- 2 matériaux qui ont la même énergie spécifique donneront le même volume de matériau dur, mais ils ne seront pas forcément équivalents car ils ne donneront pas obligatoirement la même section S et la même longueur L , même si le produit $S \times L$ reste le même.
- Un matériau Al-Ni-Co (alliage aluminium, nickel, cobalt) qui possède une plus faible énergie spécifique qu'une ferrite (voir courbes utiles 3 et 4 données au début du paragraphe 2.3.) peut être préféré à la ferrite car ce dernier matériau n'est pas très stable en température ce qui aboutit à de système de régulation de vitesse des moteurs difficile ⁽¹³⁾.
- Des considérations de "facilité de maintenance" peuvent également aboutir au choix d'un matériau de faible énergie spécifique qui possède cependant une droite tangente au point $(0, B_r)$ très raide (voir la *droite de recul* ultérieurement).
- La densité du matériau intervient également pour le poids de l'aimant, la facilité de réalisation en grande série (qui abaisse le coût de production)
- La largeur du cycle d'hystérésis et la conductibilité du matériau influence largement son échauffement, ce qui aboutit à un abaissement de l'induction, donc du flux, donc de la puissance nominale d'un moteur.
- Une excitation coercitive élevée permet aux moteur de mieux résister aux actions démagnétisantes des réactions magnétiques d'induit et permet, en outre, de travailler avec des entrefers élevés, ce qui autorise une moindre précision d'usinage pour les petites moteurs ($P < 100^{\text{aine}}$ de W)
- et d'autres critères peuvent intervenir !!!

En conclusion :

Le choix d'un matériau est très difficile car il doit être réalisé à la lecture de plusieurs critères (énergie spécifique, dimensions, tenue en température, entrefer variable...) Une fois que le matériau est choisi (ce qui n'est pas une mince affaire) le critère d'Evershed permet facilement de le dimensionner.

Exercice

Pour construire un aimant, on a le choix entre 4 matériaux dont les portions utiles du cycle d'hystérésis sont donnés ci-dessous :

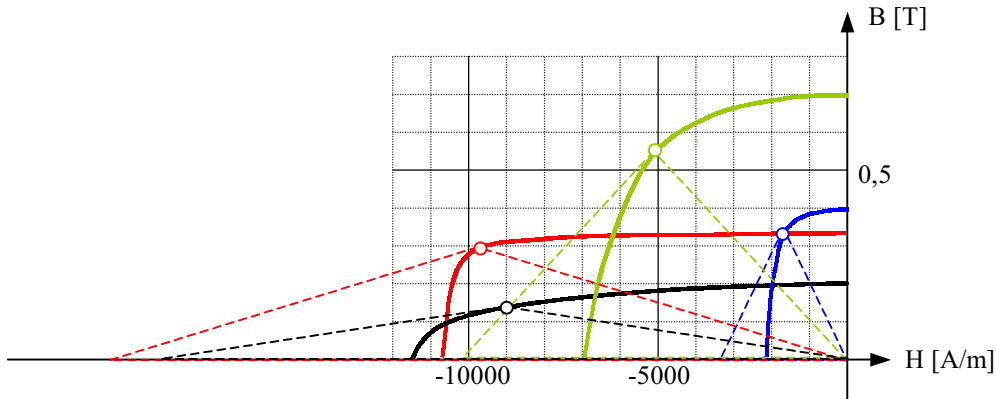


Choisir le matériau qui donnera le minimum de volume.

¹³ Une régulation de vitesse est d'autant plus aisée que les paramètres du moteur ne dépendent pas de son fonctionnement, c'est-à-dire, entre autre, de son échauffement.

Réponse

Il faut déterminer les points d'Evershed puis en déduire les énergies spécifiques des 4 matériaux :



On en déduit déjà que ce n'est pas la peine de considérer les matériaux "bleu" et "noir" qui possèdent finalement une énergie spécifique inférieure à l'énergie spécifique des matériaux "rouge" et "vert". Examinons alors plus précisément l'énergie spécifique de ces 2 derniers matériaux :

Matériau "rouge" : $B \approx 0,30 \text{ T}$ et $H \approx -9800 \text{ A/m} \Rightarrow E = |B \times H| \approx 2940 \text{ J/m}^3$

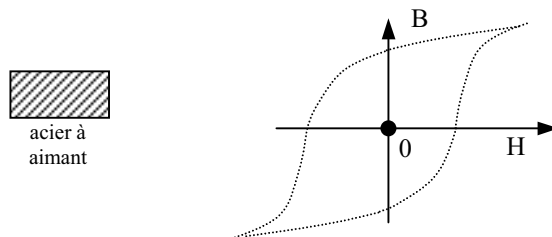
Matériau "vert" : $B \approx 0,55 \text{ T}$ et $H \approx -5000 \text{ A/m} \Rightarrow E = |B \times H| \approx 2750 \text{ J/m}^3$

Il faudra donc privilégier le matériau "rouge" qui est celui qui donnera le minimum de volume. En pratique on peut être amené à prendre le matériau "vert" qui donne un champ B plus intense que le matériau "rouge" : cela aboutit à une section S plus petite (car $B \times S = b \times s = C^{te}$ donnée du problème) au détriment d'une longueur L plus grande, il faut voir où doit être "logé" le futur aimant !

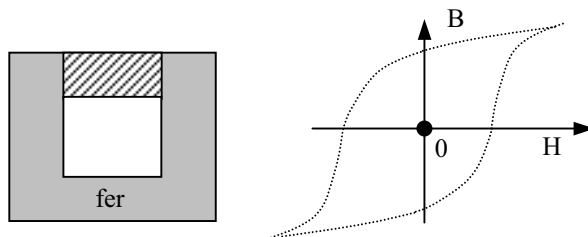
2.5. Droite de recul.

Cette droite doit être considérée lorsque l'aimant est soumis à un entrefer variable. Considérons le processus de fabrication d'un aimant, le matériau étant choisi :

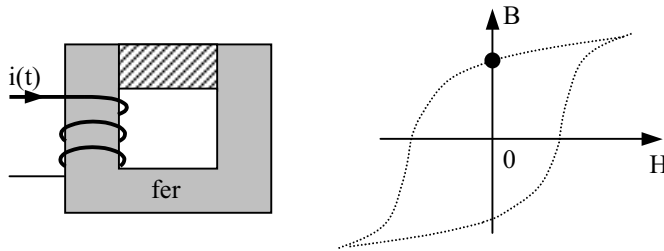
étape 1 : on usine l'acier à aimant aux dimensions calculées par l'étude théorique. Le matériau n'étant pas encore magnétisé on a le point de fonctionnement B(H) de l'aimant en 0 :



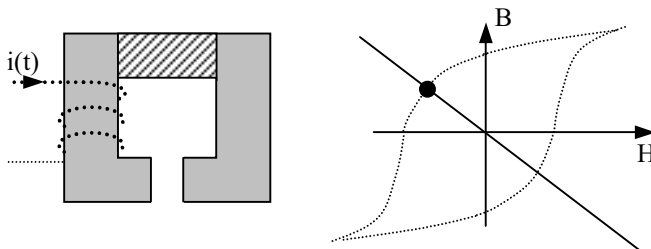
étape 2 : on ferme l'aimant par un matériau doux, le pont de fonctionnement B(H) se trouve toujours en 0 :



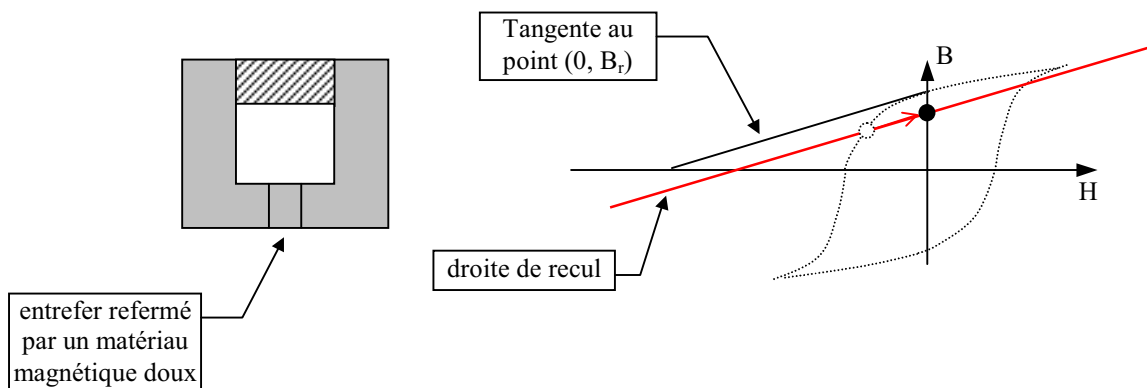
étape 3 : on magnétise le circuit magnétique par une bobine magnétisante parcourue par un courant suffisamment intense (pour saturer le circuit magnétique) et alternatif (pour stabiliser le cycle). Lorsque le courant est coupé le point de fonctionnement se trouve en $(0, B_r)$:



étape 4 : on découpe le fer pour obtenir l'entrefer souhaité. Cette ouverture provoque l'apparition de la droite de charge et donc un déplacement du point de fonctionnement $B(H)$ tel que le point se retrouve à l'intersection de la courbe d'hystérésis et de la droite de charge. On aurait eu directement ce point en magnétisant l'aimant avec l'entrefer initialement présent, c'est d'ailleurs ce que l'on fait en pratique :



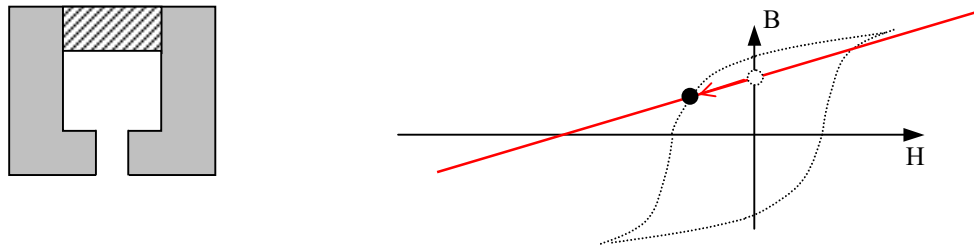
La figure suivante nous indique que si l'on referme l'aimant (en supprimant l'entrefer), alors la droite de charge devient verticale mais le point de fonctionnement ne se retrouve plus en $(0, B_r)$ comme à l'étape 3 : ce chemin n'était pas réversible ! **Le point de fonctionnement prend le trajet de la droite de recul** ⁽¹⁴⁾ qui est tracée approximativement parallèle à la droite tangente en $(0, B_r)$ à la courbe d'hystérésis :



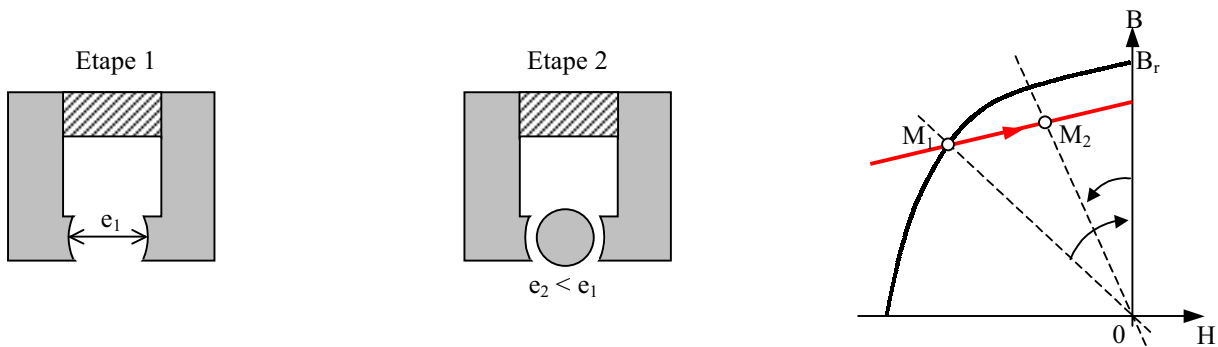
Le champ magnétique qui règne à présent est plus faible que le champ magnétique B_r observé lorsque l'entrefer n'avait pas été encore pratiqué à l'étape 3 : il y a eu **désaimantation** de l'aimant¹⁵. Si l'on ouvre à nouveau l'aimant avec le même entrefer que précédemment, le point de fonctionnement revient à sa position initiale en restant, cependant, sur la droite de recul :

¹⁴ En réalité la droite de recul possède également une légère hystérésis.

¹⁵ C'est ce qui est observé avec les aimants droits utilisés pour fixer des objets au tableau de cours par exemple !



Si l'on pratique des entrefers de longueurs différentes, la droite de recul est imposée par l'ouverture (longueur) maximale de l'entrefer :

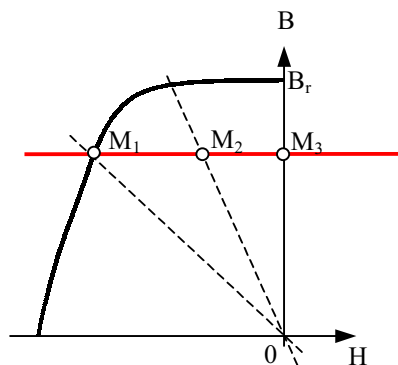


- **Etape 1** : point de fonctionnement en M_1 . L'entrefer de longueur e_1 est pratiqué initialement dans le matériau doux puis on magnétise le circuit magnétique à l'aide d'une bobine magnétisante (non représentée sur le schéma ci-dessus).
- **Etape 2** : point M_2 . On place par exemple un rotor (pour fabriquer un moteur à courant continu), ce qui réduit la longueur de l'entrefer. Le point M_2 se trouve sur la droite de recul qui avait été imposée par l'ouverture maximale de l'entrefer (étape 1 précédente).

En conclusion :

C'est l'ouverture maximale de l'aimant qui détermine la droite de recul sur laquelle se déplaceront dorénavant les points de fonctionnement de l'aimant. Plus l'ouverture a été grande et plus les champs magnétiques seront éloignés de la valeur maximale atteignable : $B_{r\text{émanent}}$. Finalement la magnétisation d'un aimant est donc faite après placement définitif de toutes les pièces du circuit magnétique afin de conserver un champ magnétique suffisamment proche du champ magnétique rémanent.

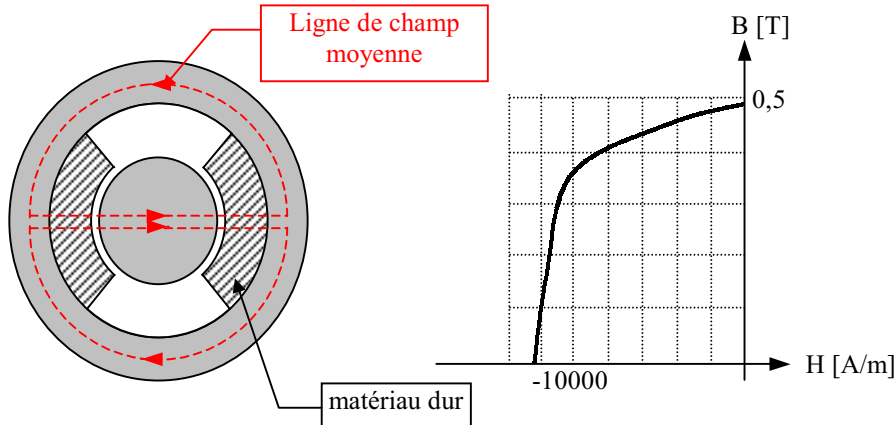
Si la droite de recul était horizontale, cela signifierait que le champ magnétique resterait insensible aux ouvertures successives de l'aimant mais aurait comme inconvénient d'être faible, car imposé par l'ouverture maximal de l'aimant :



Application : désaimantation accidentelle d'un moteur à courant continu à aimants permanents.

Sur les moteurs Axem à aimants permanents on voit parfois l'indication suivante : "ne pas ouvrir le moteur". Observons ce qu'il pourrait se passer si on passait outre cette recommandation.

On usine les pièces polaires d'un moteur à courant continu dans un matériau dont la courbe utile d'aimantation est donnée ci-dessous :



L'entrefer a pour longueur (ou épaisseur) $e \approx 2 \times 2$ mm, l'épaisseur de chaque aimant vaut $L \approx 6$ cm.

1. Tracez la droite de charge du circuit magnétique dans le plan B(H). Vérifie-t-il le critère d'Evershed ?
2. Déduisez - en l'induction B créée par l'aimant dans l'entrefer.

Le rotor a pour diamètre $D \approx 30$ cm. On décide de l'enlever pour manutention de son collecteur.

3. Tracer la nouvelle droite de charge et déduisez-en la nouvelle induction B' régnant dans l'entrefer.

La réparation du rotor ayant été effectuée, on replace le rotor dans la culasse du moteur.

4. Donnez la nouvelle induction B'' régnant dans l'entrefer : conclusion ?

réponse :

1.

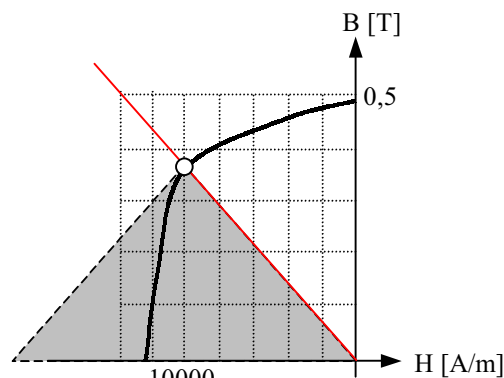
On a la section de l'entrefer $s =$ section S de l'aimant, et donc dans l'aimant $B \approx b$ dans l'entrefer. Le théorème d'Ampère écrit sur une ligne de champ moyenne (en négligeant l'influence de la culasse du moteur faite en matériau doux) nous donne :

$$H \times 2L = - h \times e$$

Comme $h = b/\mu_0 = B/\mu_0$ on en déduit que $H \times 2L = -\frac{B}{\mu_0} \times e$ et donc on obtient la droite de charge :

$$B = -\mu_0 \times \frac{2L}{e} \times H \approx -4\pi \cdot 10^{-7} \times \frac{2 \times 6 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^{-3}} \times H \approx -38 \cdot 10^{-6} \times H$$

C'est une droite qui passe par le point 0(0,0) et le point $(H = -10\ 000$ A/m, $B \approx 0,38$ T). On détermine le point d'Evershed en traçant le triangle isocèle vu en cours. On s'aperçoit que la droite de charge (en rouge ci-dessous) passe approximativement par le point d'Evershed (point blanc ci-dessous) :



Le critère d'Evershed est bien vérifié !

2.

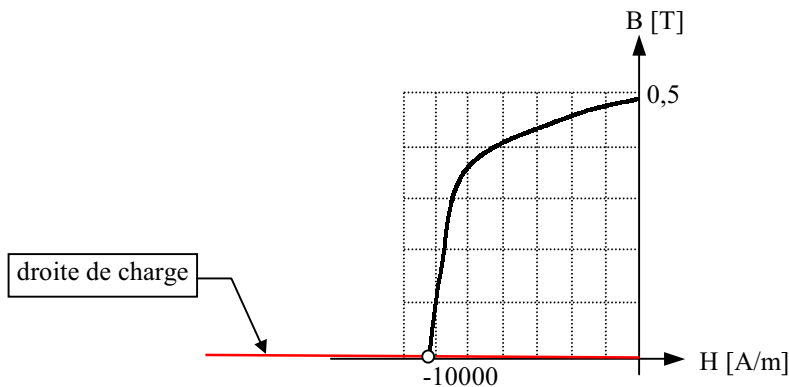
B est donné par l'ordonnée du point d'Evershed, on lit graphiquement $B \approx 0,38 \text{ T}$

3.

L'entrefer a maintenant pour longueur $D + e$, on en déduit l'équation de la nouvelle droite de charge :

$$B = -\mu_0 \times \frac{2L}{D+e} \times H \approx -0,5 \cdot 10^{-6} \times H$$

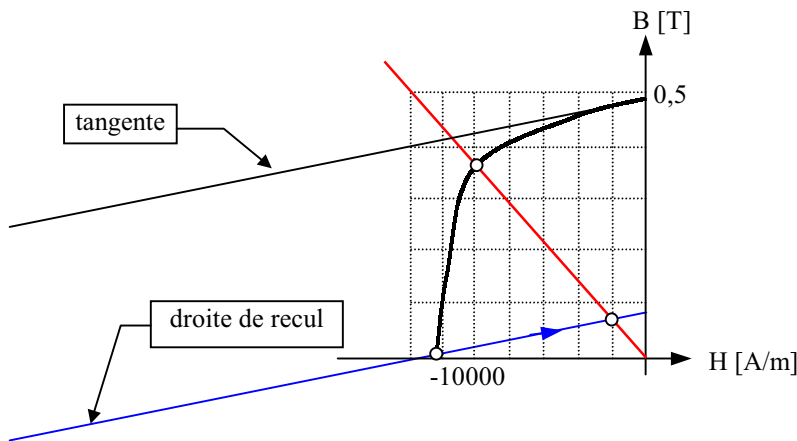
Elle passe par le point 0 et le point ($H = -10000 \text{ A/m}$, $B \approx 0,005 \text{ T}$), elle est pratiquement confondue avec l'axe des abscisses :



On a donc graphiquement $B' \approx 0,005 \text{ T}$ (intersection de la droite de charge et de la courbe utile du cycle), que l'on peut confondre avec 0 T approximativement : le moteur est complètement démagnétisé.

4.

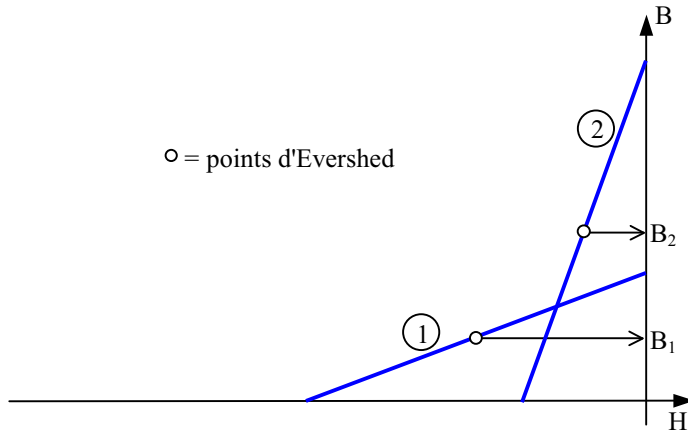
On trace la droite de recul parallèle à la droite tangente au cycle en $(0, B_1)$ et la droite de charge déterminée à la question 1 précédente :



La nouvelle induction est lue à l'intersection de la droite de charge (rouge) et la droite de recul (bleue) : on lit graphiquement : $B'' \approx 0,06 \text{ T}$

Conclusion : l'induction qui règne dans l'entrefer est passée de $0,38 \text{ T}$ à $0,06 \text{ T}$ après avoir enlevé puis replacé le rotor à sa position initiale : l'induction a été divisée par environ 6, le moteur a été démagnétisé, il est à présent inexploitable !

L'exercice précédent nous prouve qu'il n'est pas toujours judicieux de prendre l'aimant qui possède la plus grande énergie spécifique : si le rotor doit être souvent enlevé il faudra utiliser un matériau qui possède une caractéristique utile $B(H)$ très proche d'une droite afin qu'elle soit confondue avec la droite de recul : on retrouve alors l'induction d'origine après maintenance du rotor. En pratique certains aimants permanents de moteurs à courant continu sont construits à partir d'un alliage Samarium-Cobalt qui possèdent une caractéristique $B(H)$ utile proche d'une droite (courbe 1 ci-dessous, un tel matériau reste cependant relativement cher) :

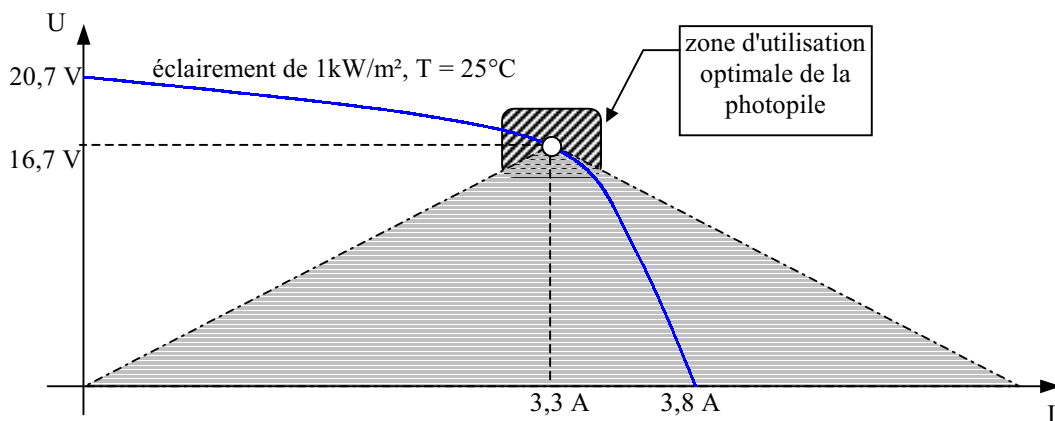


Les matériaux qui ont des caractéristiques utiles confondues avec des droites ne conviennent cependant pas forcément : considérons les 2 matériaux dont les caractéristiques utiles $B(H)$ sont données ci-dessous (en bleu) et sur lesquelles les points de fonctionnement du circuit magnétique sont confondus avec les points d'Evershed (cas idéal).

- B_1 = induction présente après dépose puis remplacement du rotor en utilisant le matériau 1.
- B_2 = induction présente après dépose puis remplacement du rotor en utilisant le matériau 2

Les 2 matériaux ont la même énergie spécifique : ils donneront donc le même volume. Cependant le matériau 1 donnera une section S plus grande (pour obtenir un flux Φ donné) que le matériau 2, et donc une épaisseur ℓ plus petite que le matériau 2 : les aimants du type 1 (Samarium-Cobalt) conviennent bien pour les moteurs à aimants permanents dans lesquels l'épaisseur des aimants doit être faible pour limiter leur encombrement.

Remarque : pour les cellules photovoltaïques (= photopiles, ou capteurs d'énergie solaire) on a également une sorte de critère d'Evershed qui nous donne les conditions optimales d'utilisation de la photopile. Traçons la caractéristique $U(I)$ d'un photopile (Module monocristallin Phebus 55 Wc - 12V)



Lorsque la charge est telle que l'on se trouve au "point d'Evershed", le produit $U \times I$ est maximal : la photopile fournit le maximum de puissance à sa charge. C'est la zone d'utilisation optimale conseillée par le fabricant.

3. Résumé.

- Les aimants permanents possèdent un champ magnétique même en l'absence d'une force magnétomotrice. leur circuit magnétique se compose d'un matériau dur et de un ou plusieurs matériaux doux.
- C'est le matériau dur qui impose ses caractéristiques à la totalité du circuit magnétique.
- Le champ magnétique qui règne dans le matériau dur est plus petit que le champ rémanent. Il est imposé par la longueur de l'entrefer (droite de charge). Il faut agir sur la section droite des matériaux doux pour obtenir le champ magnétique voulu dans l'entrefer.
- Pour un matériau donné, il faut donner une longueur L au matériau de manière à respecter le critère d'Evershed qui donnera le minimum de volume (donc de poids) au matériau dur.
- Si l'on possède plusieurs matériaux, on peut privilégier celui qui possède la plus grande énergie spécifique car c'est celui qui donnera le minimum de volume. Cependant l'énergie spécifique n'est pas le seul paramètre à prendre en compte : si l'entrefer est variable il faut considérer également la droite de recul.
- l'ouverture (même furtive) d'un aimant permanent modifie souvent définitivement ses caractéristiques.

Bibliographie :

Transducteurs électromécaniques, de Jüffer, Traité de l'école Polytechnique Fédérale de Lausanne
Matériaux aimants permanents pour l'électrotechnique, de Gilbert NICOUUD, revue RGE - Mars 1981.
Renouveau des petits moteurs électriques, de Gérard lacroux, revue RGE - Mars 1981.