

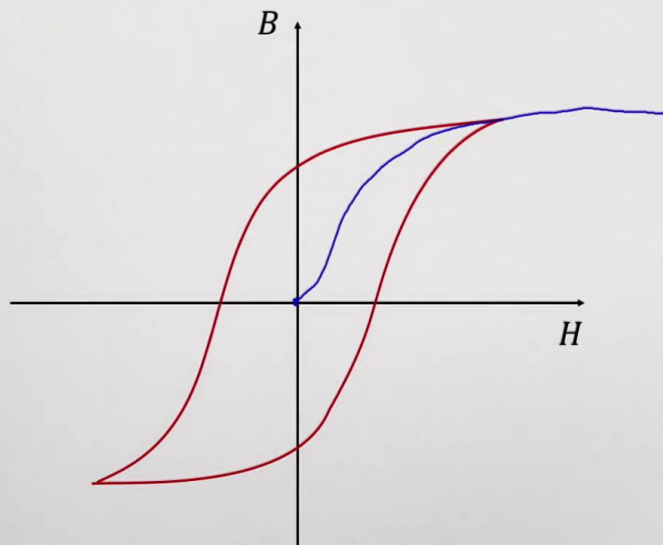
Bonjour. Tout le monde a déjà joué avec un aimant permanent. C'est vrai que c'est un peu magique. Nous avons déjà vu qu'il était possible d'expliquer ces propriétés magnétiques à l'aide des domaines de Weiss. Aujourd'hui, nous allons analyser le cycle d'hystérésis des aimants et voir de quoi il dépend. Nous parlerons aussi des types d'aimant qu'on peut trouver sur le marché. Le cycle d'hystérésis est un aimant. Le voici. On va supposer que j'ai mon aimant puis que je peux imposer le champ magnétique à l'intérieur de l'aimant d'une manière externe. Si on commence avec un aimant brut, on va avoir un champ magnétique au tout début qui va être nul puis ce qu'on va faire, c'est qu'on va mettre la source externe puis imposer le champ magnétique dans l'aimant puis ce champ magnétique va augmenter, donc l'induction va augmenter avec selon une courbe qui a à peu près cette allure-là et qu'on appelle « courbe de première magnétisation ». On a magnétisé l'aimant. En général, quand on magnétise l'aimant, on utilise des bobines ou une bobine dans lequel on fait circuler des énormes courants électriques qu'on obtient en déchargeant des condensateurs très rapidement, c'est un détail, comment on fait pour magnétiser un aimant.

Notes

Summary



0m 04s



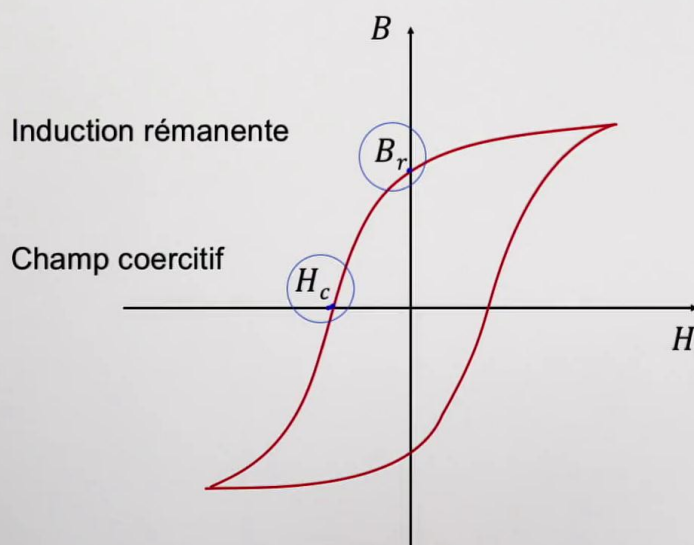
La courbe continue comme ça avec une pente qui s'approche de plus en plus de μ_0 , la perméabilité du vide. Ce qui nous intéresse, c'est pas tellement ça. On revient en arrière, on réimpose un champ magnétique plus faible puis on va parcourir le cycle d'hystérésis, le cycle d'hystérésis qui va avoir cette allure ici. C'est un cycle typique pour matériaux magnétiques.

Notes

Summary



1m 46s



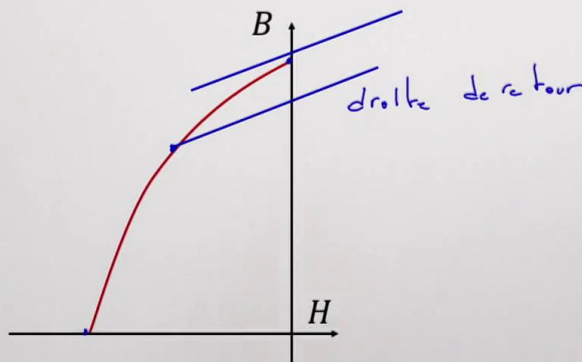
Dans ce cycle, y a deux points qui nous intéressent particulièrement, c'est le point à champ magnétique nul. Ce point-là est ici puis à cet endroit, on a une induction rémanente, une induction à champ magnétique nul qui elle n'est pas nulle, qu'on appelle, justement, induction rémanente. Le deuxième point, c'est la même chose mais ce coup-là à induction nul, on a un champ magnétique qui n'est pas nul et qu'on appelle « champ coercitif ». Induction rémanente et champ coercitif, ce sont les grandeurs qui vont nous permettre d'avoir une quantification, en quelque sorte, de notre cycle d'hystérésis. Puis on va voir que dans le cas de l'aimant permanent, on cherche à obtenir une induction rémanente et un champ coercitif qui soit le plus grand possible parce qu'on va travailler dans cette partie ici du cycle. On va voir ça plus tard et on va le prouver. On va avoir besoin d'un aimant qui soit le plus fort possible dans un volume le plus faible possible puis, donc, qui a une induction rémanente qui soit la plus grande possible. C'est les propriétés magnétiques qu'on recherche.

Notes

Summary



2m 25s



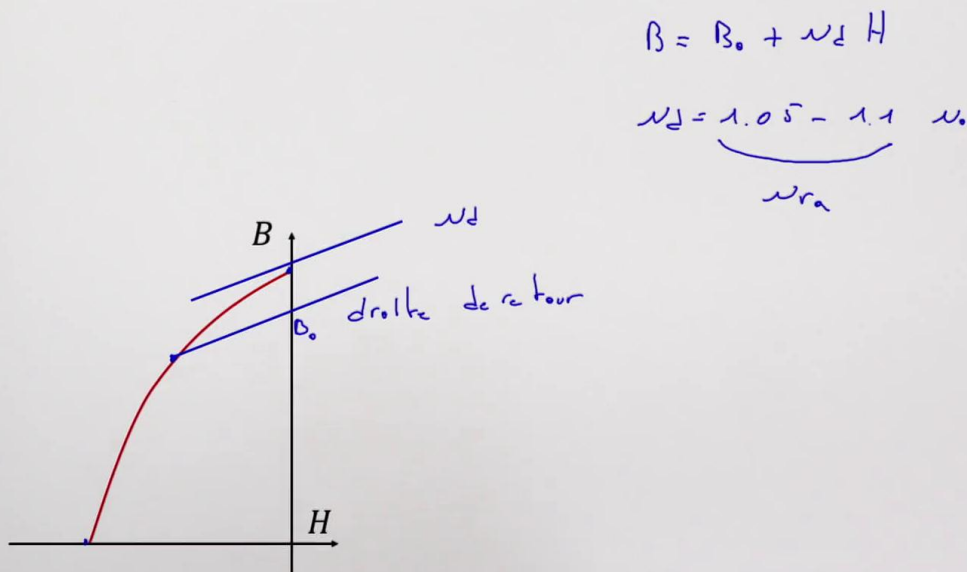
Comme je l'ai dit, on va travailler dans le 2e cadran, un champ négatif, induction positive. On a ici l'induction rémanente, ici le champ coercitif. On va voir ce qui se passe lorsque on a un champ qui varie. On va supposer que je descends avec mon champ magnétique, je l'affaiblis. Je m'arrête ici. Après, je vais le réaugmenter. Jusqu'à présent, on a fait un cycle complet puis on peut regarder ce qui se passe lorsqu'on fait un petit bout de cycle. On se rend compte que si on fait un petit bout de cycle, lorsque je réaugmente le champ magnétique, l'induction va pas suivre la même courbe. Pour savoir ce qui se passe, on fait des mesures puis on se rend compte que lorsqu'on veut savoir où va l'induction à partir de ce point-là, lorsqu'on réaugmente le champ magnétique, bien il faut tracer une droite qui est à la pente, la même pente que la tangente en ce point-là. On peut tracer la tangente en ce point-là, ensuite on trace une parallèle à cette droite comme ça puis on va avoir une induction qui ne suis plus la courbe rouge mais qui suit bien cette droite bleu. Cette droite, on va l'appeler « la droite de retour ». Cette droite a comme pente la pente de la tangente à la courbe lorsque H égal zéro, au point où on a l'induction rémanente.

Notes

Summary



4m 07s



Son équation, si ce point ici, on l'appelle B_0 puis que la pente de cette tangente, c'est μ_d , une perméabilité différentielle, c'est plus une perméabilité B sur H . C'est toujours un rapport B/H mais plutôt dB sur dH , une dérivée donc l'unité, c'est bien l'unité d'une perméabilité mais c'est plus une perméabilité standard, c'est une perméabilité différentielle. Si j'écris l'équation de cette droite, on a que B , c'est égal à B_0 . Ordonnées à l'origine, plus la pente fois H . C'est vraiment la perméabilité différentiel de l'aimant, on parle par extension de perméabilité de l'aimant et est μ_d en général. Pour les aimants standards, c'est quelque chose qui vaut entre 1,05 et 1,1 fois μ_0 . C'est quelque chose qui est très proche de μ_0 . Certains ont un peu plus mais c'est jamais 1 000 μ_0 , c'est toujours des valeurs jusqu'à quelquefois μ_0 dans des aimants particuliers. On peut aussi parler comme étant une perméabilité relative de l'aimant, par exemple, par extension. C'est la droite de retour. Cette droite de retour est très intéressante. Pourquoi ?

Notes

Summary



6m 25s

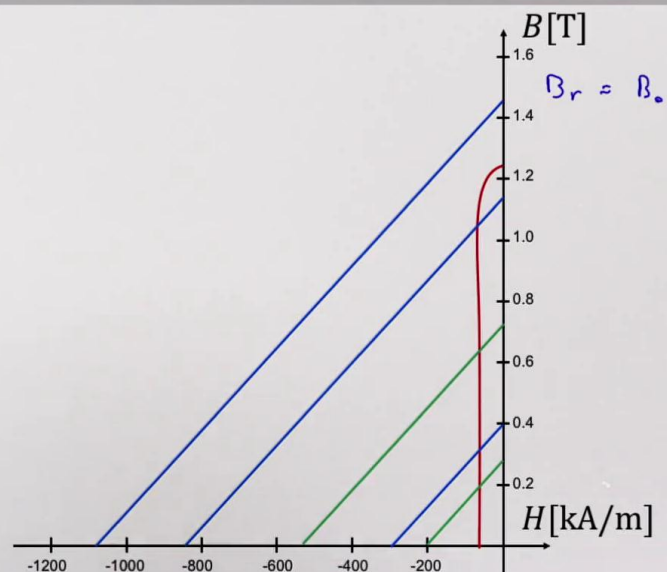
- Aimants frittés

- NdFeB Br -> 1.4 [T]
- SmCo Br -> 1.15 [T]
- Ferrite Br -> 0.4 [T]

- AlNiCo Br -> 1.25 [T]

- Aimants liés au plastique

- NdFeB Br -> 0.7 [T]
- Ferrite Br -> 0.3 [T]



Parce que si on regarde des aimants qu'on trouve sur le marché, je vous en ai mis quelques-uns ici et leurs caractéristiques à droite. Vous voyez que le seul qui a une caractéristique non linéaire dans des températures standards, c'est l'AlNiCo. L'AlNiCo est en rouge ici. Il a vraiment une caractéristique non linéaire. Tous les autres ont des caractéristiques linéaires. Donc dans tous les autres cas, la droite de retour se confond avec la caractéristique standard. On va voir tout à l'heure pourquoi on doit quand même étudier ces problèmes avec une caractéristique non linéaire, en dehors des cas de l'AlNiCo. Pour le moment, on va se dire que dans la plupart des cas et dans pratiquement tous les cas qui vont nous intéresser, on prend comme caractéristique l'équation de la droite de retour. Dans ce cas-là, l'induction rémanente et la valeur B_0 de notre droite de retour sont égales. Je reviens aux divers aimants. Celui qu'on trouve le plus aujourd'hui, c'est un alliage de néodyme fer-bore qui est fritté, qui est encore souvent orienté, c'est-à-dire qu'on lui fait subir un recuit avec une orientation des grains avec un petit champ magnétique.

Notes

Summary



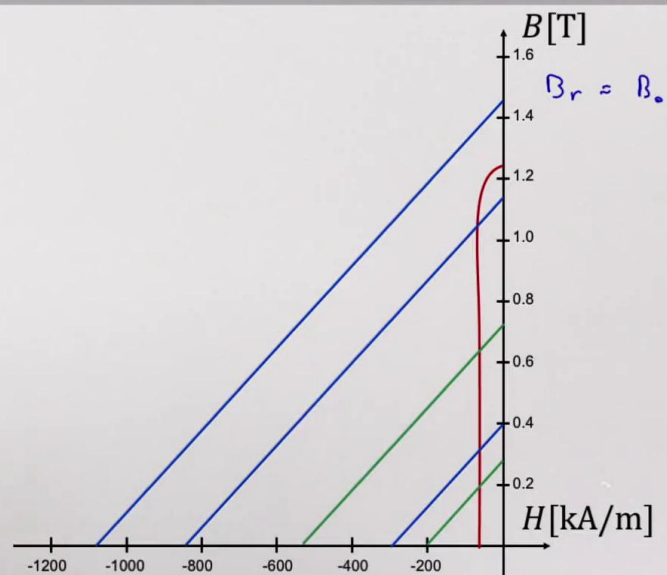
• Aimants frittés

- NdFeB Br -> 1.4 [T]
- SmCo Br -> 1.15 [T]
- Ferrite Br -> 0.4 [T]

- AlNiCo Br -> 1.25 [T]

• Aimants liés au plastique

- NdFeB Br -> 0.7 [T]
- Ferrite Br -> 0.3 [T]



C'est assez compliqué à fabriquer mais grâce à ça, on obtient des inductions rémanentes qui sont maintenant au-delà de 1,4 Tesla, c'est énorme. Après, les autres variantes, on a le samarium-cobalt qui a des inductions rémanentes plus faibles mais qui a des meilleures résistances à la température; la ferrite. La ferrite est à cet endroit ici. Elle a des inductions rémanentes très faibles, par contre qui coûte pas cher du tout. On trouve encore des choses qui sont faites en ferrite à cause de ça parce que le prix est intéressant; les AlNiCo. Ils ont une excellente résistance à la température par contre, le prix à payer, c'est cette caractéristique non linéaire qui est assez abominable quand il faut travailler avec ça. J'ai eu la chance de ne jamais avoir besoin de travailler avec des AlNiCo. En gros, c'est des aimants qui ont des caractéristiques non linéaires mais c'est pas souvent qu'on doit les utiliser. Il y a d'autres variantes. AlNiCo, c'est aluminium, nickel, cobalt puis il y a des Ticonals et d'autres variantes, même dans les AlNiCo qui ont des propriétés un peu différentes. J'entre pas dans ces variantes-là, c'est juste un exemple pour vous montrer que ça existe encore.

Notes

Summary



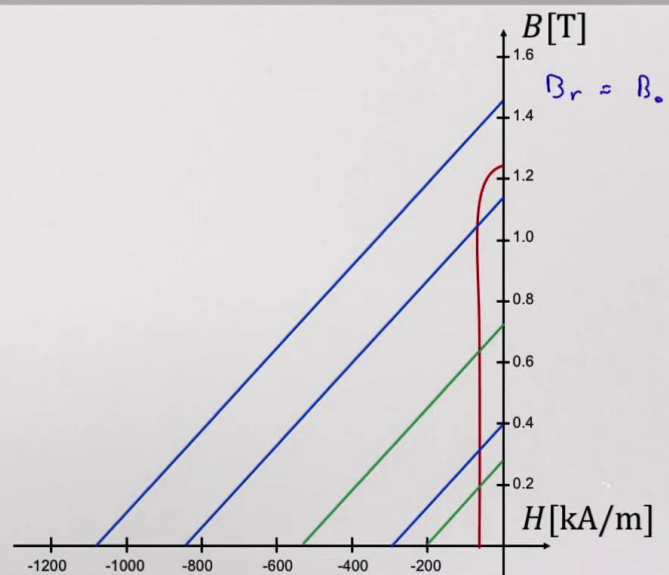
- Aimants frittés

- NdFeB Br -> 1.4 [T]
- SmCo Br -> 1.15 [T]
- Ferrite Br -> 0.4 [T]

- AlNiCo Br -> 1.25 [T]

- Aimants liés au plastique

- NdFeB Br -> 0.7 [T]
- Ferrite Br -> 0.3 [T]



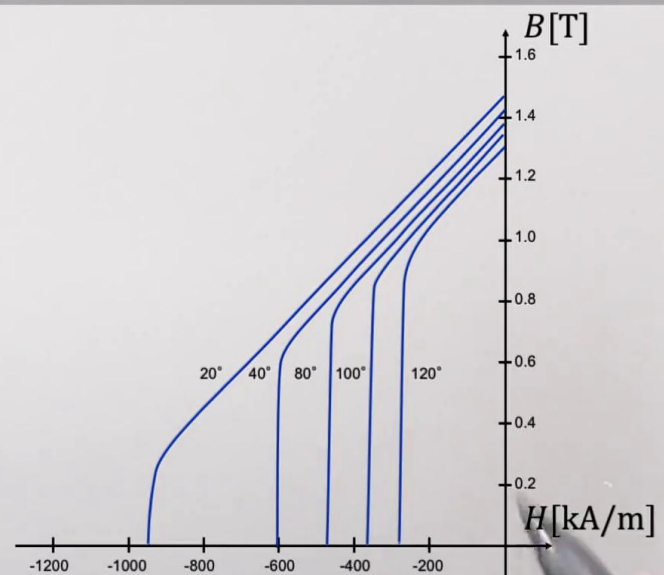
AlNiCo, l'avantage, c'est la résistance à la température ou la variation de l'induction liée à la température qui est vraiment très constante. Après, on a des aimants liés au plastique qui nous permettent de les usiner plus facilement, qui vont être moins cher. On met de la poudre d'aimant dans du plastique, dans un thermoplastique par exemple. Par contre, forcément, comme il y a du plastique, ça prend un peu de place et on a des inductions rémanente qui vont chuter. Le néodyme qui était au-delà de 1,4 se retrouve plutôt du côté de 0,7, 0,8 Tesla. Puis les ferrites, j'en ai vu liés au plastique qui étaient à 0,3 Tesla. Il faut croire qu'on en a, c'est pas vraiment... Les aimants ferrites liés au plastique, c'est des aimants hyper bon marchés. C'est pas ce qui m'occupe tous les jours.

Notes

Summary



11m 50s

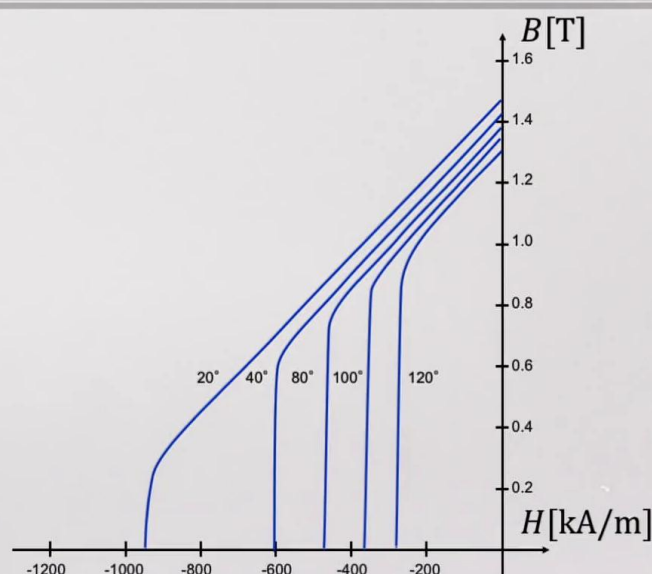


Il y a encore une chose qu'il faut dire, c'est que j'en ai parlé un peu, les aimants sont sensibles à la température. Je vous ai représenté la caractéristique d'un aimant existant c'est un néodyme-fer-bore avec une induction rémanente au-delà de 1,4 Tesla mais qui est au-delà de 1,4 Tesla vraiment qu'à 20 degrés. Après ça diminue puis ça diminue puis ça diminue et cetera. Puis vous voyez que la caractéristique est un peu différente. On voit réapparaître le coude du cycle d'hystérésis. On imagine le cycle d'hystérésis qui se poursuit là-bas puis qui va se poursuivre en-dessous de mon deuxième cadran avec ce coude de qui remonte. On va voir plus tard que ça peut nous poser passablement de problème parce que si le coude remonte, on se retrouve dans la zone non linéaire puis la droite de retour est plus avec un B_0 qui est 1,4 Tesla donc on peut avoir, à cause de la température en chauffant l'aimant, de la démagnétisation. De la démagnétisation qui va se produire avant ce qu'on appelle la température de Curie. La température de Curie, c'est quand les domaines de Weiss disparaissent et où l'aimant est totalement démagnétisé. Là, même en-dessous de la température de Curie, qui, pour un néodyme fer-bore est aux alentours 300 degrés, bien au-dessous.

Notes

Summary





On va avoir des problèmes avec la caractéristique de cet aimant. C'est un néodyme fer-bore qui est très sensible à la température, il a des inductions rémanentes qui sont très élevées. Il en existe des qui ont des inductions rémanentes qui sont à peine en-dessous et qui le sont beaucoup moins, donc en rajoutant un des petites impuretés, etcetera, d'autres éléments, on arrive à faire en sorte que notre aimant, même en néodyme fer-bore, puisse être plus résistant à la température. En général, ça coûte un petit peu plus cher. On a différentes catégories pour chaque type d'aimant. Pour les néodyme fer-bore, on a toute une ribambelle de catégorie d'aimants différentes, chacune ayant des propriétés en induction rémanente et en caractéristiques de température qui peut-être différentes. Je vais pas rentrer plus loin dans les détails.

Notes

Summary



14m 26s



- Hysteresis (B_r , H_c)
- Droite de retour
$$B = B_0 + \mu_d H$$
- Effet de la température
- Types d'aimants
NdFeB, SmCo, Ferrite

Voilà. En résumé, les aimants permanents sont des matériaux magnétiques qui se caractérisent par une très grande induction rémanente et un très fort champ coercitif. Nous avons vu que même si leur caractéristique est non linéaire, on peut les modéliser par leurs droites de retour qui ont une pente modérée, la perméabilité différentielle de l'aimant et qui est proche de celle du vide. Si on trouve des aimants puissants, qui ont des inductions rémanentes élevées, ces derniers sont sensibles à la température. Un échauffement trop grand peut conduire à la démagnétisation de l'aimant sans avoir besoin d'atteindre la température de Curie. C'est particulièrement le cas pour les aimants au néodyme fer-bore mais tous les autres types y sont aussi sensibles. La suite, maintenant qu'on a un modèle macroscopique de l'aimant, c'est de l'inclure dans un circuit magnétique.

Notes

Summary



15m 28s