

$$\vec{H} = \oint \vec{J}$$

Madame, monsieur, bonjour et bienvenue, à cette leçon sur la loi d'Ampère, et nous allons voir un certain nombre d'autres éléments durant cette leçon, comme par exemple le flux magnétique ou la continuité de ce flux, ou encore, qu'est-ce qu'une courbe B-H. Je commence par la loi d'Ampère, qui est une des principales lois de Maxwell, que nous avons vue dans une précédente leçon. Je vous rappelle l'équation de Maxwell, qui lie le champ magnétique H et la densité de courant J , et que l'on écrit : Rotationnel de $H = J$. Maintenant, ceux-ci sont des vecteurs, évidemment. On travaille sur des vecteurs, en trois dimensions. Dans ce cours de conversion, nous allons essentiellement utiliser un seul degré de liberté, et déjà simplifier l'écriture de toutes les équations que nous aurons, vectorielles, d'ailleurs, à quelque chose d'un seul degré de liberté. Si j'écris un degré de liberté pour tout ce qui est vecteurs, et qu'en plus, j'applique le théorème de Navier-Stokes, pour écrire cette équation vectorielle en une équation intégrale, j'arrive avec cette loi d'Ampère, très connue, qui nous dit que l'intégrale sur un contour fermé C , du champ magnétique H fois une distance dl .

Notes

Summary



$$\vec{H} = \oint \vec{J}$$

↓ Maxwell - Stokes

1 des lib.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad [A]$$

On verra par la suite comment est-ce qu'on applique ceci sur un cas concret. est égal à l'intégrale sur une surface fermée de la densité de courant fois ds. Voilà cette loi d'Ampère, qui lie le domaine magnétique, vous avez H, champ magnétique, au monde électrique, vous avez J, à droite. Alors qu'on pourrait avoir une bobine qui n'est pas en contact physique avec le fer mais dans le fer, ou dans une structure magnétique, on va avoir un champ magnétique H, parce que nous avons une densité de courant J. C'est ce qu'on appelle le fait d'avoir une imbrication de ces deux mondes, électrique et magnétique, tout le temps, et c'est ce que nous dit l'équation de Maxwell ici, sous sa forme intégrale. On a toujours un lien entre le monde électrique et le monde magnétique, grâce à cette formulation. Je précise aussi que la densité de courant étant en ampère par mètre carré, vous voyez que si j'ai l'intégrale de Jds et ds, c'est des mètres carrés, on a quelque chose qui est sous la forme d'ampères. Ici l'unité, ce sont des ampères. Attention, ce sont des ampères, mais dans le monde magnétique Hdl, on a des ampères pas mètres fois des mètres, donc, c'est toujours bien des ampères.

Notes

Summary



1m 38s

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}$$

↓ Maxwell - Stokes

1 deg. lib.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad [A]$$

Potentiel Magnétique
Potentiel Magnétique

Et ceci, ce que nous avons là, comme ce que nous avons ici, ce sont par définition, deux potentiels magnétiques. On a ici un potentiel magnétique. On va revenir sur cette définition mais je souhaitais déjà. Potentiel magnétique. Comme ça, vous l'avez déjà vu une fois. L'unité de ce potentiel magnétique, dans la loi d'Ampère, c'est des ampères.

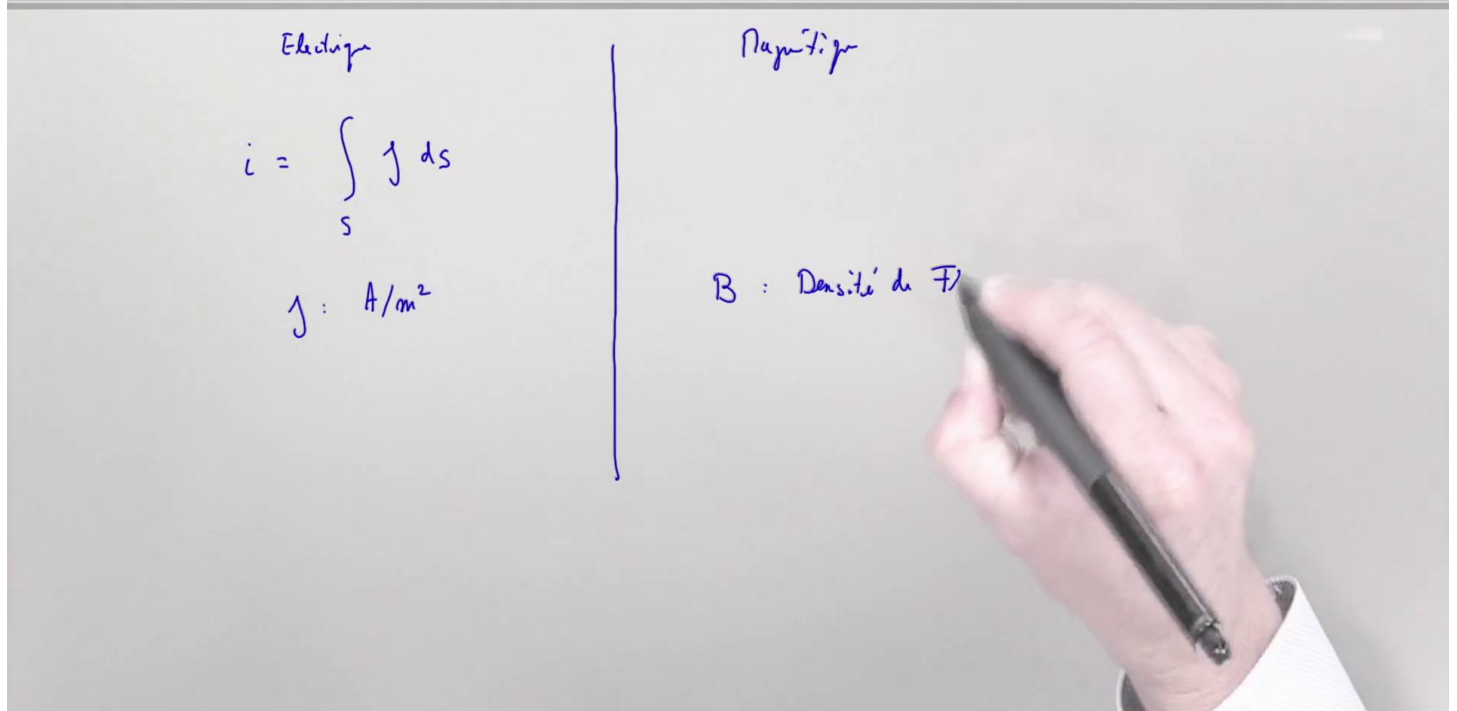
Notes

Summary



3m 05s

Définition du flux magnétique



Le flux magnétique. On voit ici qu'il va y avoir, à un certain moment, un flux, qui va apparaître. Difficile, évidemment de c'est un concept, on ne peut pas le voir. Le champ magnétique, le flux magnétique, sont des choses invisibles mais on va tenter de le modéliser, de le caractériser. Dans le monde électrique, vous savez que i , le courant, c'est l'intégrale sur une surface de la densité de courant fois s . Et puis J , c'est des ampères par mètre carré, par exemple. Le courant, dans un conducteur, est défini comme l'intégrale de Jds . Ça, c'est le monde électrique. J'aimerais faire une analogie avec le monde magnétique, et dans le monde magnétique, Ce J , qui est en ampère par mètre carré, qui définit la densité de courant, dans le monde magnétique on a un tel élément qui existe, qui est la densité de flux. C'est ce fameux B , le champ d'induction magnétique. Malheureusement, en français, le nom est assez mal choisi, on dit champ d'induction magnétique. En anglais, on dit « flux density », donc, densité de flux. Mais c'est très exactement la même chose si vous faites cette équivalence avec le monde électrique, avec la densité de courant.

Notes

Summary



3m 44s

Définition du flux magnétique

Electrique

$$i = \int_S j \, ds$$

$$j : A/m^2$$

Magnétique

$$\Phi = \int_S B \, ds \quad [Vs]$$

$$B : \text{Densité de Flux} \quad \left[\frac{Vs}{m^2} \right] [T]$$

Ce B, ce sont des volts seconde par mètre carré, c'est bien une densité de flux, mais qu'on simplifie souvent par l'unité tesla, T. Donc, si on a le courant qui est égal à $\int j \, ds$, intégral de $j \, ds$, on va inventer, on va définir le flux magnétique Φ qu'on va noter par une lettre grecque Φ , qui sera l'intégrale sur une surface de cette densité de flux, $B \, ds$. Et l'unité, ce sera des volts secondes. Ainsi, on a défini le flux magnétique qui correspond au courant, dans le monde électrique. On va avoir des flux, qui peuvent se balader et on espère qu'ils vont pouvoir être maîtrisés, donc on va voir un petit peu dans la page suivante, comment se comporte ce flux magnétique dans un tube, au minimum déjà, dans un tube.

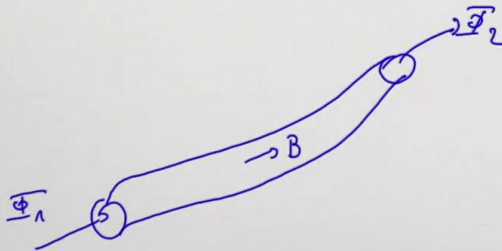
Notes

Summary



5m 19s

$$\text{Div } \vec{B} = 0$$



$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \rightarrow \quad \Phi_1 = \Phi_2$$

Nous allons voir maintenant la continuité du flux magnétique. On va devoir inventer, si j'ose dire, un concept, comme dans le courant électrique, on a vu qu'on a maintenant du flux magnétique, mais ce flux magnétique, comment se comporte-il ? Tout ceci vient d'une des équations de Maxwell, Divergence de $B = 0$, qui nous dit que grâce à cette divergence de $B = 0$, on a une conservation du flux. Ça veut dire que pour un tube de flux qu'on aurait ainsi, avec un champ d'induction magnétique qui circule avec un flux Φ_1 qui sort flux Φ_2 ici, on peut indiquer que l'intégrale sur une boucle fermée de $B \cdot ds$, c'est en fait, l'écriture intégrale de divergence de $B = 0$, on a l'intégrale sur une surface fermée de $B \cdot ds$, on a ceci qui est égal à 0, qui nous emmène automatiquement au fait que le flux Φ_1 est égal au flux Φ_2 . En somme, exactement comme dans un courant électrique, un courant i_1 rentrerait dans le fil, le courant i_2 en sort, et il n'y a pas de courant créé ou qui disparaît, c'est la même chose avec le flux. On a une conservation qui nous vient, évidemment, des grands principes de la thermodynamique qui font qu'on ne peut pas créer ou faire disparaître de l'énergie ainsi.

Notes

Summary



6m 20s

B : Densité de Flux (Flux density) $[T]$

H : Champ magnétique $[A/m]$

Maintenant, question assez importante pour bien comprendre la suite du cours, c'est bien sûr la différence entre B et H. J'ai déjà indiqué juste avant dans cette leçon, cette notion de B qui est en fait une densité de flux. Je note ici que B, c'est en fait une densité de flux. En anglais, « flux density ». Qui signifie vraiment la quantité de flux par mètre carré que je peux mettre dans une matière. La quantité de flux par mètre carré que je peux mettre dans une matière, c'est la conséquence de quelque chose, donc, j'observe une densité de flux. C'est la conséquence de quoi ? C'est la conséquence du fait que j'ai mis un champ magnétique H. H, c'est le champ magnétique qui crée le flux, et qui nous permet d'analyser la densité de flux, donc B. On va, comme unité, utiliser le T, pour B. Et le champ magnétique, ce sont des ampères par mètres. La grande différence qu'on a entre B et H, B est la conséquence de quelque chose qui se passe grâce à un phénomène magnétique, et qui se passe parce qu'on a mis un champ magnétique. Comment on va créer ce champ magnétique, on verra plus tard, mais grosso modo, il y a deux grandes méthodes pour le faire, soit on va avoir un aimant permanent, qui nous stocke quelque part de l'énergie et nous permet de « fabriquer » du champ magnétique.

Notes

Summary



7m 59s

B : Densité de Flux (Flux density) [T]

H : Champ magnétique [A/m]

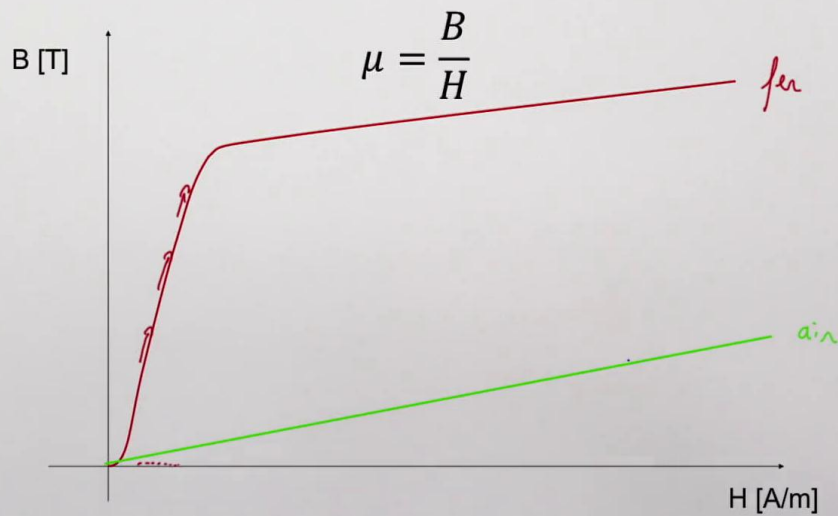
Ou alors, une bobine et on va découvrir que grâce à une bobine, nous pouvons fabriquer du champ magnétique. B , la densité de flux, ça ne sera que la conséquence de ce qui se passe et qui nous permettra de dire est-ce que j'ai beaucoup de flux par mètre carré dans cette matière ? Ou est-ce que je n'ai pas beaucoup de flux par mètre carré dans cette matière ?

Notes

Summary



9m 44s

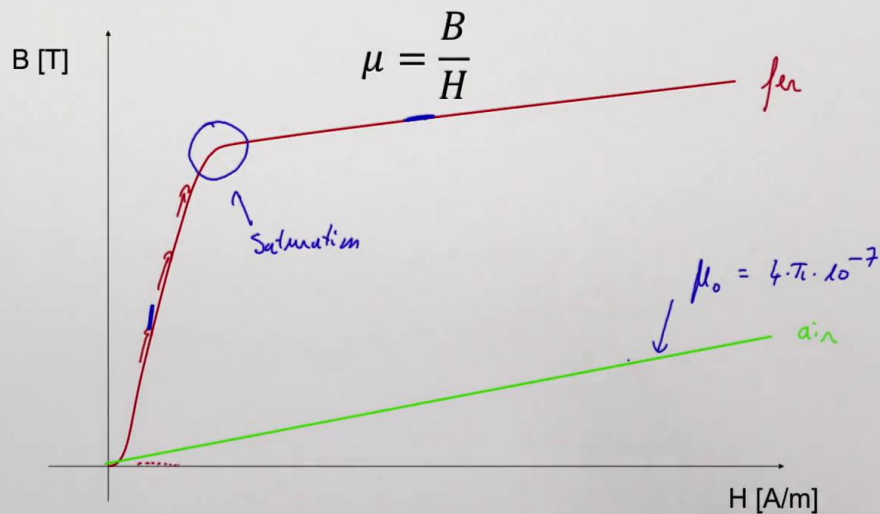


Ce qui m'amène à la page suivante, pour dire que quand on est dans une matière, ce qu'on va vouloir faire souvent, c'est un graphique qu'on appelle la courbe B-H et qui nous permet de mesurer l'état de la matière. Est-ce que la matière peut accepter une grande densité de flux ou pas ? Essayons de comprendre déjà ce que nous avons ici, et typiquement, ce que vous avez là, la courbe que j'ai dessinée ici, c'est la courbe d'un matériau ferromagnétique. Quand H est petit, vous voyez que la pente est très élevée, que quand H ici, augmente, j'ai mon B qui augmente de plus en plus. De plus en plus, de plus en plus, le B monte très vite, donc j'ai une densité de flux qui monte très vite. Prenons un autre matériau, pour prendre un autre élément. Si je prends ici un autre matériau. On va dire que ça, c'est de l'air. Vous voyez que si j'augmente mon champ magnétique ici, le B n'augmente pas beaucoup. Il faut mettre beaucoup de H pour avoir un petit peu de B . Par contre, pour la courbe rouge, je mets un petit peu de H , très vite, j'ai beaucoup de B . J'ai une densité de flux très grande. Il se passe un phénomène spécial, particulier, que vous voyez là, tout d'un coup, la courbe cesse de monter, cesse d'augmenter, et se met à utiliser une autre pente.

Notes

Summary



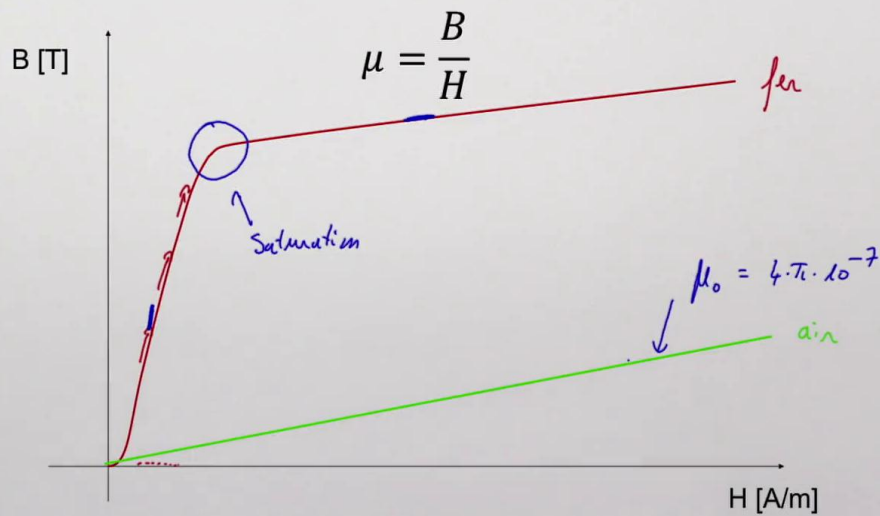


Ce phénomène-là, qu'on verra également plus tard, mais je vous donne déjà des indications, s'appelle la saturation. On a donc le matériau qui va saturer. On ne peut pas mettre plus de flux dans la matière. On est arrivé à un maximum. On n'arrive pas aller plus loin, le B va augmenter bien moins vite. Et si on fait le rapport entre B et H , la fameuse perméabilité magnétique qu'on a déjà vu ensemble, on voit que ce μ , cette perméabilité magnétique, tout d'un coup, va diminuer. Là, le μ a une certaine valeur qui n'est pas la même que celle-là. L'autre matériau que j'ai noté ici air, a une perméabilité magnétique constante, et cette perméabilité magnétique vaut μ_0 , donc $4 \pi 10^{-7}$. On a des matériaux qui peuvent être de bons conducteurs, mais on voit que tout d'un coup, il peut y avoir ce phénomène de saturation qui va faire aussi, quand on a de la saturation, comme le μ n'est pas constant pendant toute la plage, balayé par le champ magnétique H , on a un phénomène clairement non-linéaire. Qui dit un phénomène non-linéaire dit toutes sortes de problèmes qui vont apparaître par la suite.

Notes

Summary





Donc, nous devons chaque fois veiller à soit, prendre les dispositions nécessaires pour poser les bonnes hypothèses, soit faire très attention au moment où on résout les équations, pour être certain qu'on a le droit de résoudre ces équations, de dériver, d'intégrer, etc. Alors même que nous sommes en présence d'un effet non-linéaire, tel que la saturation.

Notes

Summary



13m 08s

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

- Notion de bon conducteur ou pas
- Varie \rightarrow Saturation
- Air : $\mu_0 : 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ le plus petit possible !!

Comme indiqué précédemment, cette perméabilité magnétique μ , qui vaut B/H . Perméabilité, je vais le réécrire encore une fois, il est écrit en haut. Perméabilité magnétique. Nous donne, cette notion de savoir est-ce que le matériau est un bon conducteur magnétique ou pas. Une notion de bon conducteur ou pas. Elle nous dit aussi si ce μ est constant ou s'il varie, donc, s'il varie, c'est un indicateur de saturation. Ensuite, ce μ va nous permettre, comme je l'ai dit avant, de dire si c'est un bon conducteur ou pas. Il y a encore un autre élément parce que quand on dit bon conducteur électrique, par exemple, ou pas, quand c'est bon conducteur électrique, même à la limite, on va dire un bon conducteur, il aura une résistance la plus faible possible, ou de 0. Ici, le mauvais conducteur, qui serait pour la résistance, une résistance infinie, donc on tire le fil, on coupe. En électromagnétisme, ce μ , puisque vous voyez on a l'air, c'est le μ_0 le plus petit. Pour l'air, on a μ_0 qui vaut $4 \pi 10^{-7}$. C'est la constante du vide, c'est le plus petit possible. Ça veut dire quoi ? Ça veut dire que si je veux dans un circuit électrique, couper un fil électrique pour qu'il y ait une résistance infinie, je tire le fil, il n'y a plus de courant qui passe.

Notes

Summary



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

• Motin de bon conducteur ou pas

• Varie \rightarrow Saturation

• Air : $\mu_0 : 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ le plus petit possible !!

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \Rightarrow 1 \cdot \mu_0$$

\uparrow \uparrow
 $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ relative

$$\mu_{\text{air}} = 1$$

$$\Rightarrow 1000 \cdot \mu_0$$

$$\mu_{\text{fer}} = 1000$$

Maintenant, si je veux couper le lien magnétique entre deux points, comment est-ce que je peux faire ? Je mets quoi comme matériau qui bloquerait ? L'air étant déjà le plus mauvais conducteur magnétique, on voit que c'est μ_0 , et je ne peux pas aller plus bas. Donc, je ne peux pas couper, je ne peux pas empêcher le champ magnétique de passer. Il va mal passer, mais il passera quand même. C'est une notion très particulière, qui rend l'analogie électrique magnétique parfois un peu délicate, puisqu'ici on voit que ça n'est pas comparable avec l'analogie électrique. Ce μ va nous permettre de dire est-ce que c'est un bon conducteur ou un mauvais conducteur. Par exemple, pour un matériau quelconque, on va le rapporter souvent à μ_0 . On va avoir le μ constante du vide. $4 \pi 10^{-7}$. Et là, on a ce qu'on appelle la perméabilité relative. Typiquement, si c'est de l'air, on aura 1 fois μ_0 . Donc, le μ relatif de l'air vaut 1. Puisque c'est μ_0 . Maintenant, on peut imaginer un autre matériau, par exemple, mille fois μ_0 . Donc, là, μ relatif du fer, parce que c'est le fer qui peut être aussi bon ou aussi meilleur que l'air. 1000, on peut monter à 10,000. On peut monter peut-être à 20, 30,000. Plus on sera élevé dans le μ relatif et dans le μ , plus on conduira bien le champ magnétique parce que plus on aura une densité de flux importante dans la matière.

Notes

Summary





- Loi d'Ampère
- Perméabilité magnétique
- Flux magnétique
- Courbe B-H
- Signification de l'induction magnétique

En conclusion de cette leçon, on a vu la loi d'Ampère, sa forme intégrale, on a vu la définition de la perméabilité magnétique, du flux magnétique, qu'est-ce que c'est qu'une courbe B-H. On a vu apparaître cette notion de saturation, qui peut apparaître ici. Cette signification intrinsèque de l'induction magnétique, ce B, qui n'est autre qu'une densité de flux. Merci.

Notes

Summary



17m 17s