

Chapitre 10a

Matériaux et propriétés magnétiques

Sommaire

- Les matériaux magnétiques
- Champ magnétique et lignes de force
- Champ d'induction et flux
- Bobine avec et sans noyau magnétique
- Effet Hall
- Forces électromagnétiques
- Cycle d'Hystérésis
- Exercices

Introduction

Tout comme le courant électrique, nous ne pouvons que constater les effets du magnétisme. Nous ne pouvons pas voir les lignes de force qui existent autour d'un aimant. Les propriétés magnétiques de certains matériaux sont dues à la rotation des électrons sur eux-mêmes dans l'atome.

Ce phénomène est appelé SPIN.

Les matériaux magnétiques sont classés en trois catégories.

- | | | |
|----|------------------------------|---|
| 1. | Matériaux ferromagnétiques : | Ils peuvent être fortement magnétisés. Leur aimantation persiste plus ou moins lorsque le champ magnétisant est supprimé.

<u>Exemples :</u> Fer , Nickel , Acier , Cobalt |
| 2. | Matériaux paramagnétiques : | Ils s'aimantent faiblement dans le sens du champ magnétisant. Leur aimantation cesse dès que le champ magnétisant est supprimé.

<u>Exemples :</u> Aluminium , Platine , Manganèse |
| 3. | Matériaux diamagnétiques : | Ils s'aimantent faiblement dans le sens opposé au champ magnétisant. Leur aimantation cesse dès que le champ magnétisant est supprimé.

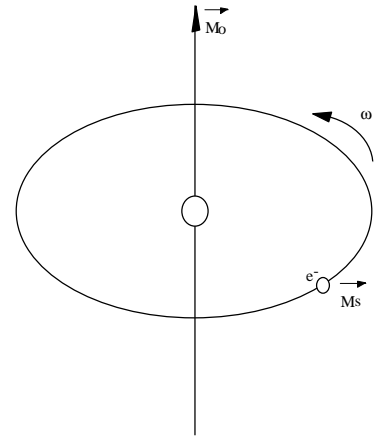
<u>Exemples :</u> Cuivre , Zinc , Or , Argent |

Pour expliquer ces différents types d'aimantation, il faut considérer le moment magnétique de chaque atome et celui d'une parcelle de corps comprenant un grand nombre d'atomes.

Le moment magnétique atomique résulte des mouvements des électrons qui gravitent autour du noyau et qui en même temps tournent sur eux-mêmes.

La rotation de l'électron sur lui-même, Spin, provoque un moment magnétique \vec{M}_s .

La rotation de l'électron e^- , charge électrique négative, autour du noyau provoque un moment magnétique \vec{M}_o .



Dans un atome, ces différents moments magnétiques se composent pour donner le

Moment magnétique atomique	$\vec{M}_a = \Sigma \vec{M}_o + \vec{M}_s$
-----------------------------------	--

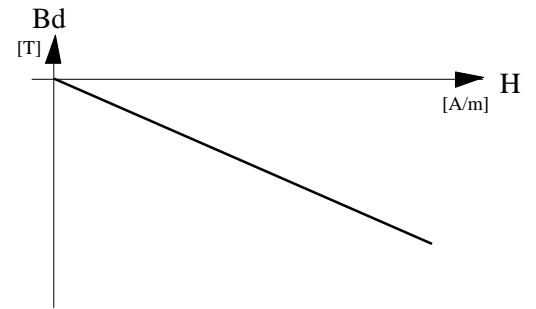
Pour les matériaux diamagnétiques, ce moment \vec{M}_a est nul. Pour les matériaux paramagnétiques, il n'est pas nul, mais les moments de l'ensemble des atomes est nul.

Pour les matériaux ferromagnétiques, des parcelles de matières appelées domaines de Weiss, ont un moment magnétique \vec{M}_a non-nul. Mais, en l'absence de champ magnétique extérieur, l'ensemble des moments de ces parcelles s'annulent les uns les autres.

en présence d'un champ magnétisant extérieur, le corps s'aimante et toutes les parcelles de ce corps présentent un moment magnétique. L'aimantation ainsi obtenue dépend de la nature du corps.

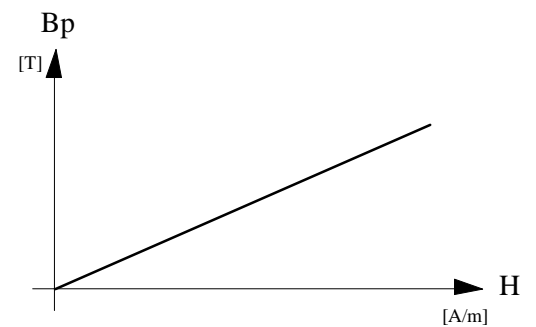
Les matériaux diamagnétiques s'aimantent proportionnellement au champ dans lequel ils sont placés, mais en sens inverse.

Le rapport entre la valeur de l'aimantation du corps et celle du champ qui le produit est faible



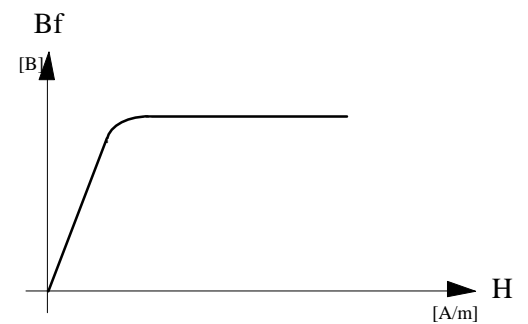
Les matériaux paramagnétiques présentent une aimantation proportionnelle au champ dans lequel ils sont placés, et de même sens.

Le rapport entre la valeur de l'aimantation du corps et celle du champ qui le produit est faible



Les matériaux ferromagnétiques sont capables de s'aimanter de manière beaucoup plus forte.

Leur aimantation est de même sens que le champ inducteur, mais elle n'est pas proportionnelle. Elle croît avec le champ inducteur et tend vers une limite.



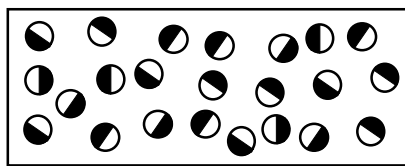
Les matériaux que nous allons étudier font partie de la dernière catégorie. Ce sont eux qui sont utilisés pour toutes les applications magnétiques en électrotechnique.

10.1 Les aimants permanents

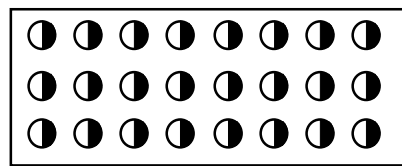
Les aimants permanents ont d'abord été élaborés à partir d'acier ou de chrome-cobalt. Vers 1935, on a commencé à étudier des alliages de fer-aluminium, nickel, cobalt et cuivre. Ces alliages fondus ou frittés sont connus sous le nom de ticonal ou alnico. En 1951, on a utilisé les ferrites de baryum et de strontium. Actuellement les alliages ticonal et ferrites sont employés couramment et sont les deux types de matériaux à aimants permanents les plus utilisés.

Avec les matériaux modernes, la désaimantation due au vieillissement ou à l'action d'un champ magnétique (pas trop intense), peut être considérée comme négligeable. Cette propriété permet d'ailleurs de réaliser des aimants présentant des pôles de nom contraires très proche les uns des autres. Ces différentes propriétés ont permis d'abandonner les formes classiques d'aimants permanents en fer à cheval ou en long barreau. Il est maintenant possible de réaliser des aimants de formes diverses et très pratiques.

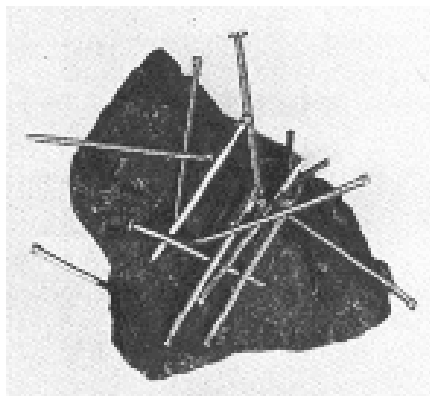
Dans les appareils de mesures électriques (galvanomètres, ampèremètres et voltmètres), ils ont permis notamment une grande amélioration de la sensibilité et de la fiabilité. Dans certains moteurs et certains générateurs (alternateurs de voitures, dynamos, magnétos), ils sont employés à la place d'électroaimants. On les emploie aussi en électronique pour les haut-parleurs et les microphones.



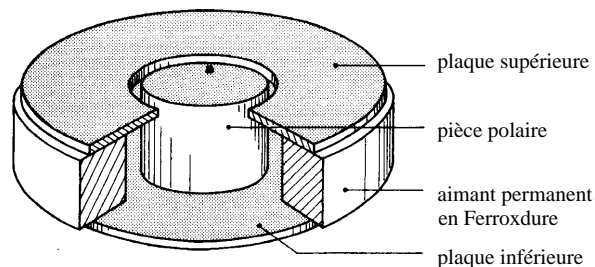
Barreau non aimanté



Barreau aimanté



Pierre de Magnésie

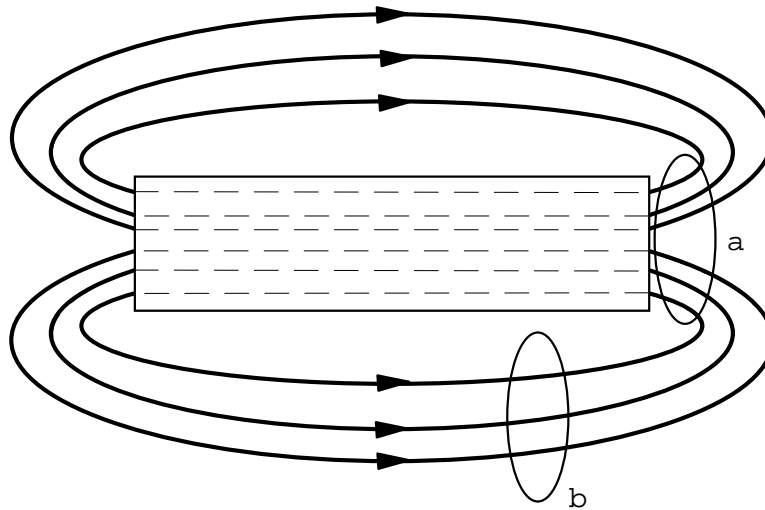


Aimant permanent pour haut-parleur

10.2 Champs magnétiques

Dans la région autour d'un aimant permanent, il existe un champ magnétique que l'on peut représenter au moyen de lignes de force magnétique semblables aux lignes de force électrique.

Contrairement aux lignes de force électrique, les lignes de force magnétique ne partent d'aucun point et n'arrivent à aucun point; elles se présentent plutôt sous forme de boucles.



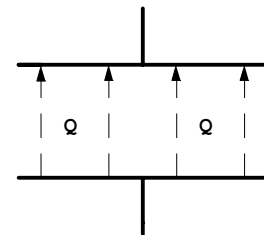
Les lignes de force vont du pôle nord au pôle sud, à l'extérieur du barreau aimanté, et du pôle sud au pôle Nord à l'intérieur. Elles sont également espacées et symétriquement distribuées autour du barreau.

Les lignes de force occupent la plus petite aire possible et leur longueur interpolaire est minimale. La force du champ magnétique d'une région quelconque dépend directement du nombre de ligne de force par aire unitaire. Dans la figure ci-dessus, l'intensité du champ est deux fois plus grande au point a par rapport au point b, alors que les deux aires sont identiques.

10.3 Intensité du champ magnétique :

L'intensité du champ magnétique \vec{H} présente les mêmes caractéristiques que le champ électrique \vec{E} .

Par analogie au champ électrique \vec{E} , nous constatons que lors de leur déplacement les charges électrostatiques \vec{Q} provoquent une force électromagnétique \vec{F} capable d'attirer les aiguilles d'une boussole.



Symbole de la grandeur : H

Symbole de l'unité : $[A \cdot m^{-1}]$ ou $\left[\frac{A}{m}\right]$

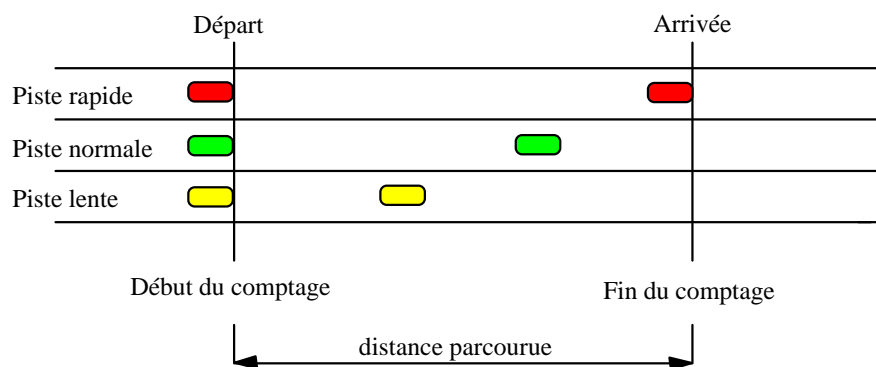
10.4 Potentiel magnétique Θ :

Dans le vide ou dans l'air, l'intensité du champ magnétique \vec{H} est une source de courant et peut être définie par la notion de potentiel magnétique.

Symbole de la grandeur :	Θ
Symbole de l'unité :	[A]

Pour imaginer cette notion de potentiel, comparons-la au débit des voitures sur une autoroute à trois pistes.

Chaque piste est un tube de circulation routière possédant sur une longueur bien définie un nombre de voitures différent à cause des différentes vitesses. Nous pouvons donc la comparer à un certain potentiel de passage de voitures.

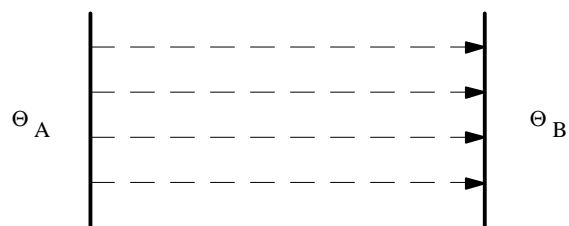


10.4 Différence de potentiel magnétique :

La différence de potentiel magnétique est définie comme la présence d'une intensité de champ magnétique \vec{H} entre les points A et B. Les charges se déplaçant dans l'air avec une certaine facilité.

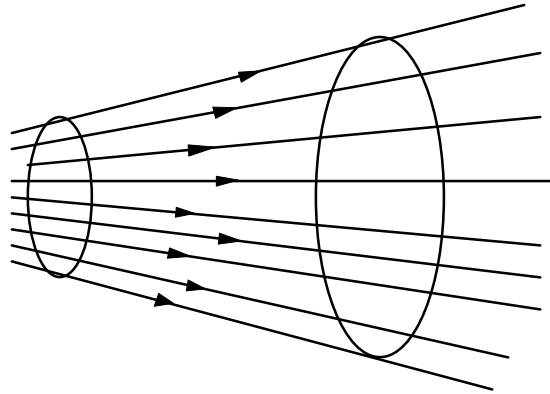
Relation :

$$H_{AB} = \frac{\Theta_A - \Theta_B}{d}$$



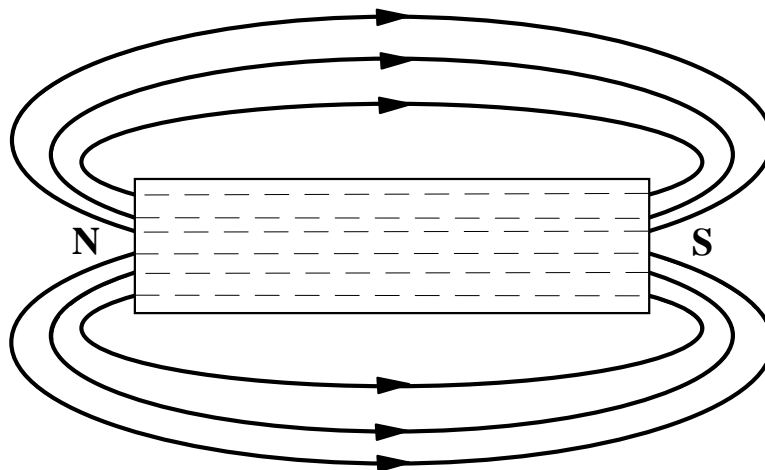
10.4 Lignes de force ou lignes d'induction :

Les lignes d'induction ou lignes de force représentent les vecteurs du champ d'induction \vec{B} influençant l'espace.



10.5 Spectre magnétique :

Le spectre magnétique représente L'ENSEMBLE des lignes de force.

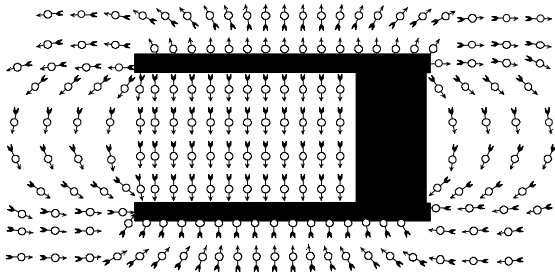


Ces lignes de force sont issues d'un pôle admis par convention pôle Nord, perpendiculairement à l'aire A , passant dans un milieu pouvant être l'espace ou autre, pour se refermer à un autre pôle admis par convention Sud.

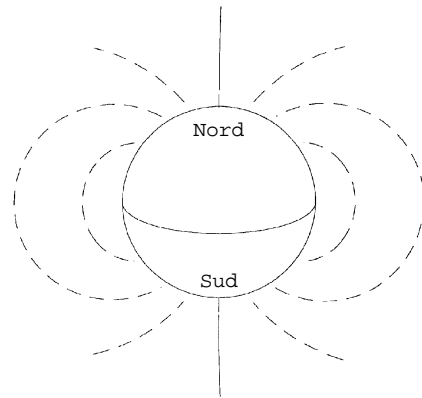
Chaque ligne de force se referme obligatoirement. Comme pour le courant électrique I , elle circule en circuit fermé.

Ce qui implique une ligne de force circulant du pôle Sud au pôle Nord à l'intérieur de l'élément constituant le générateur de champ d'induction \mathbf{B} . Ce générateur peut être un aimant permanent, un électroaimant ou un courant passant dans un conducteur.

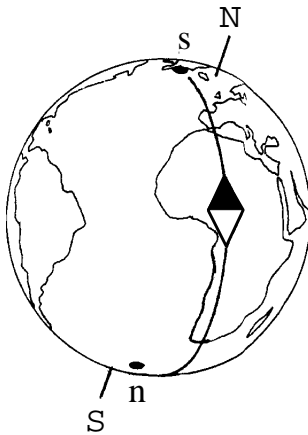
10.6 Exemples de spectres magnétiques



Champ magnétique d'un aimant permanent



Champ magnétique terrestre



En minuscule :

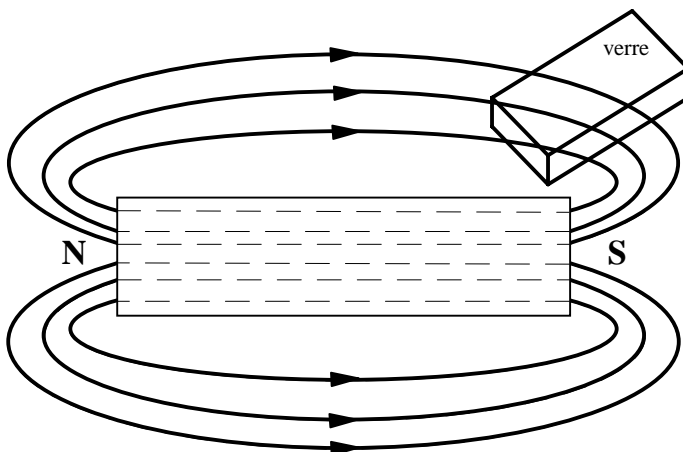
Pôles magnétiques de la Terre. La boussole s'oriente vers ces pôles.

Nous constatons également que les pôles magnétiques sont inversés par rapport aux pôles géographiques.

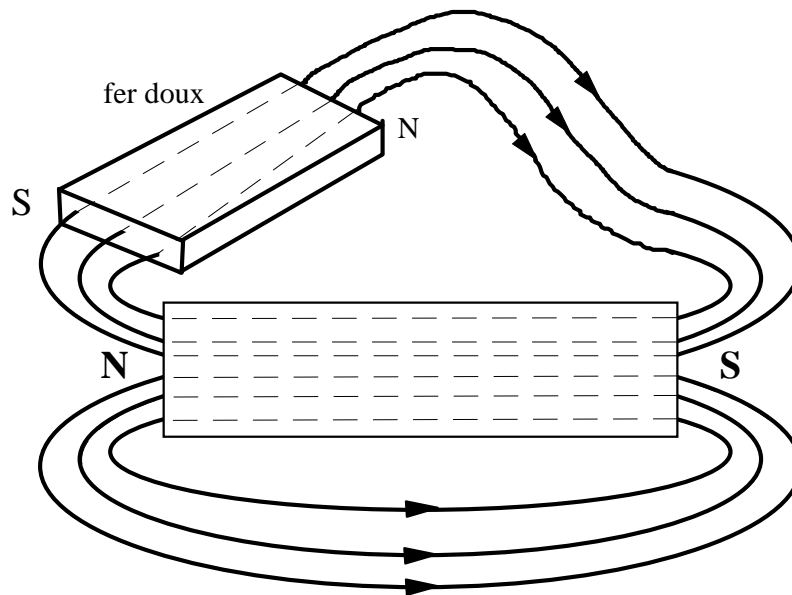
En Majuscule :

Pôles géographiques de la Terre. Ils correspondent à l'axe de rotation terrestre et sont décalés d'environ 15° par rapport aux pôles magnétiques.

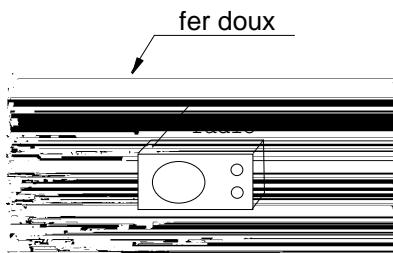
10.7 Comportement des lignes de forces :



Lorsqu'un objet non-magnétique est placé dans les lignes de force magnétique, il n'y a aucune modification. Les lignes traversent l'objet sans changer de trajectoires.



Si l'objet placé dans les lignes de force a des propriétés magnétiques, les lignes de force seront déviées. Un pôle Nord et un pôle sud vont apparaître sur les côtés de l'objet.



Cette particularité est utilisée pour protéger certains appareils sensibles au champ magnétique.

Dans notre exemple, le récepteur radio se trouve protégé des perturbations magnétiques extérieures par un blindage en fer doux.

10.8 Perméabilité du vide μ_0 (mu zéro) :

Les matériaux magnétiques laissent passer les lignes de force avec une certaine facilité. Ils sont caractérisés par une perméabilité relative. La perméabilité relative est symbolisée par la lettre grecque μ (mu). Elle représente la facilité avec laquelle les lignes de force magnétiques peuvent s'établir dans le matériau. Pour l'air, elle a été définie expérimentalement, et représente une référence.

Symbole de la grandeur :	μ_0
Symbole de l'unité :	$\left[\frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$ ou $[\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$

Tous les matériaux ont une perméabilité. Même s'il ne s'agit pas de matériaux magnétiques, comme le vide par exemple. L'air se comporte de façon identique au vide. Sa perméabilité est symbolisée par μ_0 et elle est donnée par la relation suivante :

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad [\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$$

$$\mu_0 = 1.25 \cdot 10^{-6} \quad [\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$$

10.9 Perméabilité relative μ_r

La perméabilité relative est la valeur dont il faut tenir compte lorsque nous introduisons un noyau dans une bobine. Pour les matériaux non-magnétique elle a été admise comme 1, puisque ces matériaux ne facilitent pas le passage des lignes de force.

Par contre, il n'est pas possible de faire pareil avec les matériaux magnétiques. Ils ont tous un comportement différent en fonction de leur composition. C'est pourquoi leur perméabilité a été appelée perméabilité relative. Elle est symbolisée par μ_r . Elle qualifie la facilité avec laquelle les charges magnétiques peuvent se déplacer dans le matériau.

La valeur de μ_r varie fortement d'un matériau à un autre. Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs indicatives. Pour certains matériaux, la valeur de μ_r est comprise entre un minimum et un maximum. Nous verrons plus tard que la perméabilité relative dépend de la valeur de l'induction \vec{B} .

Symbole de la grandeur : μ_r

Il n'y a pas d'unité

10.10 Tableau de la perméabilité des principaux matériaux magnétiques

Matériau	Composition	Perméabilité relative μ_r	Utilisation
Fer Armco	Fer pur	10'000	relais, électroaimant
Acier Hypersyl	Si à 3 %	40'000 à 50'000	inductances transformateurs
Mumétal Permalloy C	Ni à 80 %	70'000 à 130'000	blindages magnétiques relais rapides
Acier au cobalt Permendur V	Co à 35 - 50 %	3'500	tôles pour petites machines tournantes

Relation entre l'intensité du champ magnétique \vec{H} , la perméabilité de l'air μ_0 et la perméabilité relative μ_r .

Les charges Q se déplaçant dans un tube magnétique avec une certaine vitesse provoquent une force électromagnétique \vec{F} .

Cette force est liée à la matière du tube magnétique et à l'intensité du champ magnétique \vec{H} .

$$\frac{F}{Q \cdot v} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

Le quotient $\frac{F}{Q \cdot v}$ est appelé champ d'induction magnétique \vec{B}

Nous obtenons donc la relation suivante, en admettant la perpendicularité entre les vecteurs :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H}$$

10.11 Champ d'induction magnétique B :

Au voisinage des aimants permanents et des conducteurs de courant électrique, c'est-à-dire à proximité des charges électriques en mouvement, l'espace se trouve modifié par un champ d'induction magnétique.

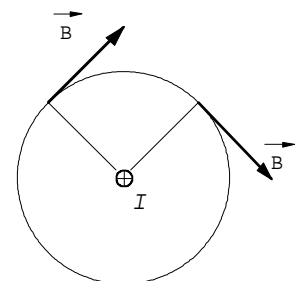
Symbole de la grandeur :	B
Symbole de l'unité :	[T] tesla

Une induction de 1 tesla correspond à un flux magnétique de 1 weber pour une surface de 1 [m²]

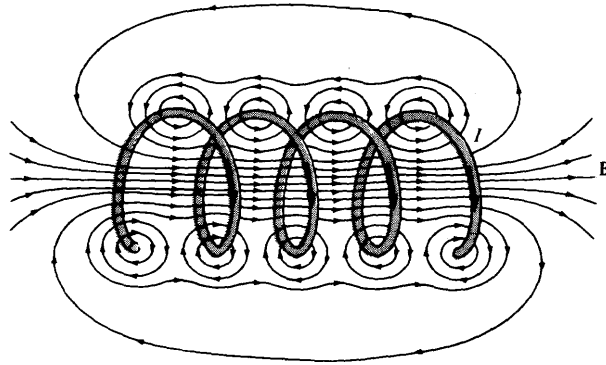
Une fois de plus, l'induction ne peut être mise en évidence que par ses effets.

Valeurs moyennes du champ d'induction magnétique B			
Terre	0.3 [μT]	électroaimant	0.1 à >1 [T]
Soleil	5 [mT]	aimant supraconducteur	> 10 [T]

Pour décrire les propriétés de l'espace, il faut donner un caractère vectoriel à la grandeur \vec{B} . La force électromagnétique \vec{F} , exercée sur les charges électriques, peut être caractérisée par un vecteur représentant un ensemble forces électromagnétiques élémentaires.



Une bobine de grande longueur et comportant un grand nombre de spires circulaires jointives est appelée un solénoïde. Lorsqu'un courant électrique traverse cette bobine, une induction B est produite. Le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde est presque uniforme, ce qui représente un avantage.

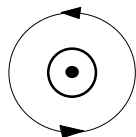


10.12 Propriétés du champ d'induction B :

Dès qu'un courant traverse un conducteur, des lignes de force magnétiques s'établissent autour de lui. On peut définir la DIRECTION des lignes d'induction comme circulaire par rapport au conducteur parcouru par le courant I .

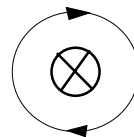
Le SENS des lignes de forces est défini par plusieurs règles. Celle de la main droite, du tire-bouchon, ou celle de la vis.

Dans les dessins, nous trouverons toujours le courant dans les conducteurs représenté de la même manière. Elle se rapporte à la règle de la vis. Lorsque le courant pénètre dans le conducteur, on voit la tête de la vis, nous dessinerons donc une croix. Lorsque le courant sort du conducteur, nous verrons la pointe de la vis et nous dessinerons un point.



Le point indique
que le courant sort
du conducteur.

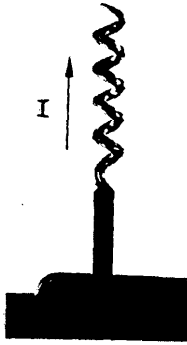
La flèche donne le
sens des lignes de force



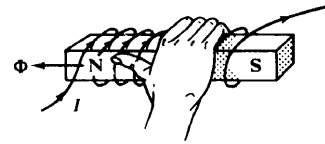
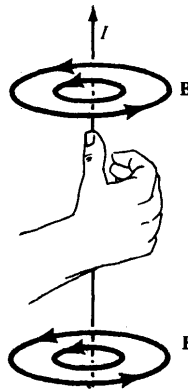
La croix indique
que le courant entre
dans le conducteur.

La flèche donne le
sens des lignes de force

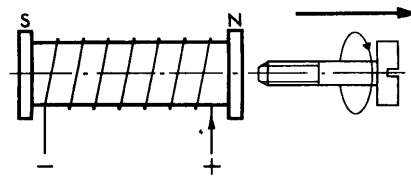
Dans le cas de la règle de la main droite, le pouce indique le sens du courant et les doigts le sens des lignes de force.



Règle du tire-bouchon

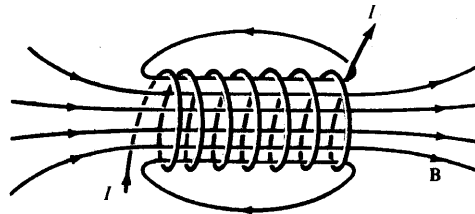


Règles de la main droite



Règle de la vis.

10.13 Champ d'induction d'une bobine dans l'air (sans noyau) :



Soit une bobine parcourue par un courant électrique. Des lignes de force magnétique vont être créées par le passage du courant et une induction B va apparaître.

L'induction B sera égale à :

$$B = \mu_0 \cdot H \quad \text{en tesla [T]}$$

Dans notre cas, le champ H représente les ampères-tours par mètre de la bobine.

$N \Rightarrow$ nombre de spire de la bobine (sans unité)

$I \Rightarrow$ intensité du courant dans la bobine [A]

$l \Rightarrow$ longueur de la bobine [m]

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$$

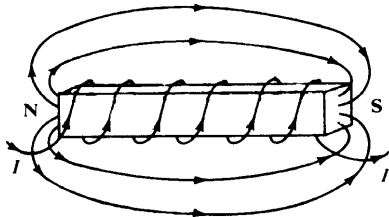
Remarque : Ce calcul n'est valable que pour une bobine longue avec une seule couche de spires.

10.14 Champ d'induction d'une bobine avec noyau

Comme nous l'avons vu au chapitre des propriétés magnétiques, les matériaux magnétiques concentrent les lignes de force. Si nous reprenons la bobine précédente et que nous plaçons un noyau, l'induction augmentera.

La perméabilité relative μ_r du noyau va définir l'augmentation de l'induction.

L'induction B sera égale à : $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ en tesla [T]



Comme pour la bobine sans noyau, le champ H représente les ampères-tours par mètre de la bobine.

Remarque : L'augmentation du courant I va provoquer une augmentation de l'induction B , mais jusqu'à une valeur limite. Cette valeur est déterminée par les caractéristiques du noyau et provient de sa saturation.

10.15 Flux magnétique Φ : (phi)

Le flux magnétique Φ quantifie le nombre de lignes de force d'un champ d'induction B , traversant l'aire A d'une matière.

Symbole de la grandeur :	Φ
Symbole de l'unité :	[Wb] weber

Le flux d'induction magnétique Φ représente le produit de l'induction magnétique B pour une aire A bien délimitée.

Cette aire peut être oblique ou, dans notre cas, perpendiculaire au champ d'induction B .

Relation :	$\Phi = B \cdot A \cdot \cos \alpha$	[Wb]
------------	--------------------------------------	------

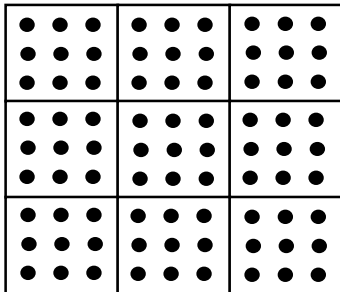
$B \Rightarrow$ induction magnétique [T] $A \Rightarrow$ aire de l'aimant [m^2] $\alpha \Rightarrow$ angle d'inclinaison [$^\circ$]

Par analogie avec la population humaine, nous pouvons dire que :

- la densité de population en nombre de personne par [km^2] peut être comparée au champ d'induction magnétique B .
- La population, quant à elle, peut être comparée au flux d'induction magnétique Φ

10.16 Comparaison entre l'induction B et le flux magnétique Φ :

Le flux magnétique Φ quantifie le nombre de lignes de force d'un champ d'induction B pour une surface donnée.



Cet aimant mesure 3 [cm] de côté, ce qui représente une surface totale de 9 [cm²]

Dans chaque compartiment de 1 [cm] de côté se trouvent 9 lignes de force magnétique de 1 [μWb] chacune.

Comme nous l'avons vu, l'induction magnétique B est donnée pour une surface de 1 [m²]. donc si nous désirons connaître l'induction pour un compartiment, il faut procéder au calcul suivant :

Le flux Φ pour un compartiment correspond au nombre de lignes de force présentent soit : 9 [μWb]

$$\text{Induction B pour un compartiment} \Rightarrow B = \frac{\Phi}{A} = \frac{9 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-4}} = 90 \cdot 10^{-3} [\text{T}] \Rightarrow 90 [\text{mT}]$$

Exemple :

Le flux magnétique engendré par une bobine dans l'air est de 1.5 [μWb] .

Cette bobine dont le diamètre vaut 8 [mm], est composée de 350 spires réparties en une seule couche sur une longueur utile de 8 [cm]

1. Calculer le courant la traversant.
2. Calculer la valeur du courant si l'on introduit un noyau magnétique dont la perméabilité vaut 4700.

Données :

$$\begin{aligned} \Phi &= 1.5 [\mu\text{Wb}] & N &= 350 \text{ spires} & d &= 8 \cdot 10^{-3} [\text{m}^2] & l &= 8 \cdot 10^{-2} [\text{m}] \\ \mu_r &= 1 & \mu_0 &= 1.25 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right] \end{aligned}$$

Inconnue : $I = ?$

Relations :

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos \alpha \quad B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad H = \frac{N \cdot I}{l} \quad B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

Pour notre calcul, nous admettrons la perpendicularité, il n'est donc pas nécessaire de tenir compte de l'angle α .

Nous recherchons I , et nous pouvons remplacer dans la première formule B par sa valeur

$$\Phi = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l} \cdot A$$

Ensuite, il faut transformer la formule pour isoler le courant I :

$$I = \frac{\Phi \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot A}$$

Application numérique :

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 50.26 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2 \text{]}$$

$$I = \frac{\Phi \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot A} = \frac{1.5 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{1.25 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 350 \cdot 50.26 \cdot 10^{-6}} = 5.46 \text{ [A]}$$

Calcul du courant avec un noyau :

$$I = \frac{\Phi \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot A} = \frac{1.5 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{1.25 \cdot 10^{-6} \cdot 4700 \cdot 350 \cdot 50.26 \cdot 10^{-6}} = 1.16 \text{ [mA]}$$

10.17 Perméance Λ : (lambda)

La perméance Λ exprime avec quelle facilité les charges peuvent passer à travers la matière, en fonction du flux magnétique Φ par rapport à la différence de potentiel magnétique θ .

$$\text{Relation : } \Lambda = \frac{\Phi}{\theta_A - \theta_B}$$

Symbole de la grandeur : Λ lambda

Symbole de l'unité : [H] henry

10.18 Réluctance \mathfrak{R} :

La réluctance \mathfrak{R} exprime l'opposition faite au passage des charges électriques dans un circuit magnétique constitué par la matière. Nous parlons parfois de résistance magnétique. Elle est l'inverse de la perméance. (Voir analogie avec la conductance G).

$$\text{Relation : } \mathfrak{R} = \frac{1}{\Lambda}$$

Symbole de la grandeur :	\mathfrak{R}
Symbole de l'unité :	$[\text{H}^{-1}]$

10.19 Limite du flux magnétique Φ :

Le flux d'induction Φ a certaines limites physiques. La matière ne peut pas indéfiniment laisser passer facilement les charges Q.

C'est, par analogie, comme une autoroute. Elle peut avoir des limites physiques propres à ses dimensions. S'il y a plus de voiture que possible, nous disons que l'autoroute est SATURÉE. En magnétisme, le phénomène de saturation existe aussi.

Les limites de la saturation sont données par les caractéristiques du circuit magnétique.

10.22 Effet Hall :

En 1879, E. H. Hall a observé qu'une faible tension était engendrée à travers un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique externe. Cette tension était très faible avec des conducteurs classiques et cet effet fut peu utilisé.

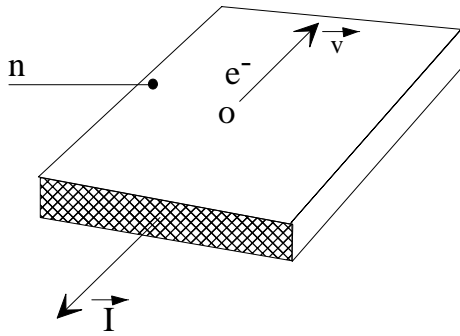
Avec le développement des semi-conducteurs, des valeurs plus élevées de tensions de Hall peuvent être engendrées. Comme matériau semi-conducteur, il est souvent fait usage de l'arséniure d'indium (In As).

Un élément de In As, placé dans un champ magnétique, peut engendrer une tension Hall de 60 [mV] lorsque l'induction vaut 1 [T] et qu'il est parcouru par un courant de 100 [mA] .

Le flux appliqué doit être perpendiculaire à la direction du courant. Lorsque le courant circule dans le sens longitudinal du conducteur, la tension engendrée est développée au travers de la largeur.

La valeur de la tension Hall U_H est directement proportionnelle à la valeur de la densité de l'induction magnétique B . Cela signifie qu'il est possible de mesurer la valeur de l'induction B par l'intermédiaire de la tension Hall U_H .

Principe :



Un conducteur contenant n charges libres e^- est traversé par un courant \vec{I} .

Supposons que tous les électrons se déplacent avec une vitesse \vec{v} uniforme.

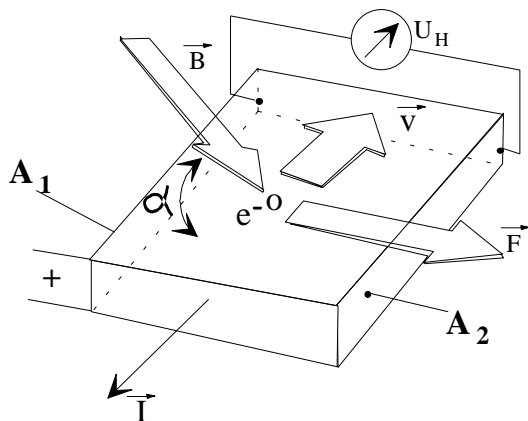
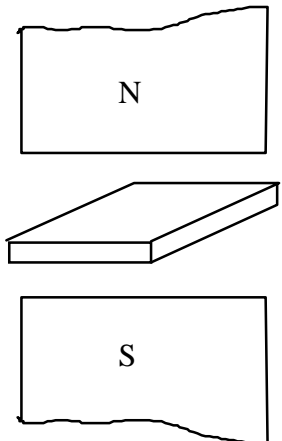
Le nombre n de charges électriques e- passant durant le temps t à travers l'aire A vaut :

$$\frac{Q}{t} = n e A v$$

Mais un delta Q sur un delta t est un courant électrique I .

Plongeons ce conducteur dans un champ d'induction magnétique \vec{B} .

Les électrons circulant à la vitesse \vec{v} dans le conducteur sont déviés par la force électromagnétique \vec{F} .



Les différentes lois du magnétisme font apparaître une dissymétrie dans la répartition des charges entre les faces A_1 et A_2 .

Cette dissymétrie provoque une différence de potentiel, appelée tension de Hall U_H proportionnelle au champ d'induction \vec{B} et au courant \vec{I} , dans le conducteur.

La tension de Hall U_H est donc une combinaison de lois d'électrostatique $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$

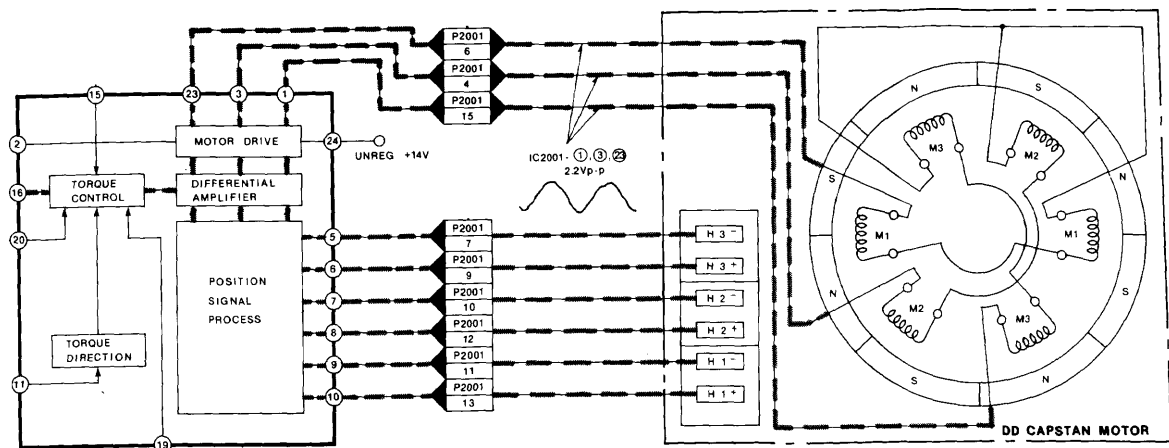
et de magnétisme $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$

En les combinant, nous obtenons :

$$U_H = \frac{I \cdot B \cdot \sin \alpha}{n \cdot d \cdot q}$$

Cette tension de Hall est exprimée en volt [V].

Exemple d'utilisation :



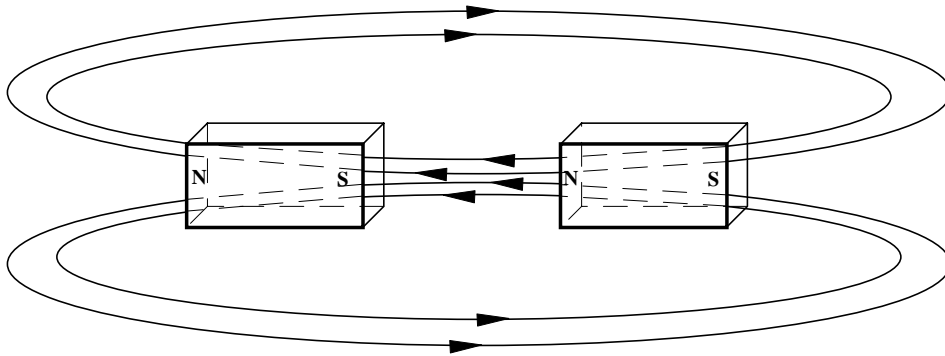
Ce circuit représente l'asservissement du moteur de cabestan d'un magnétoscope. Pour assurer une bonne qualité d'image, la position du moteur doit être connue en permanence.

Pour effectuer ce contrôle, des petits capteurs à effet Hall ($H_1 - H_2 - H_3$) sont placés sous le rotor du moteur.

En fonction de la rotation du moteur, ils sont soumis à des champs magnétiques variables. Des tensions Hall sont ainsi produites et transmises au circuit de contrôle de la position (Position Signal Process). Ce dernier fournira les informations nécessaires au circuit de commande du moteur (motor drive) pour ajuster sa position.

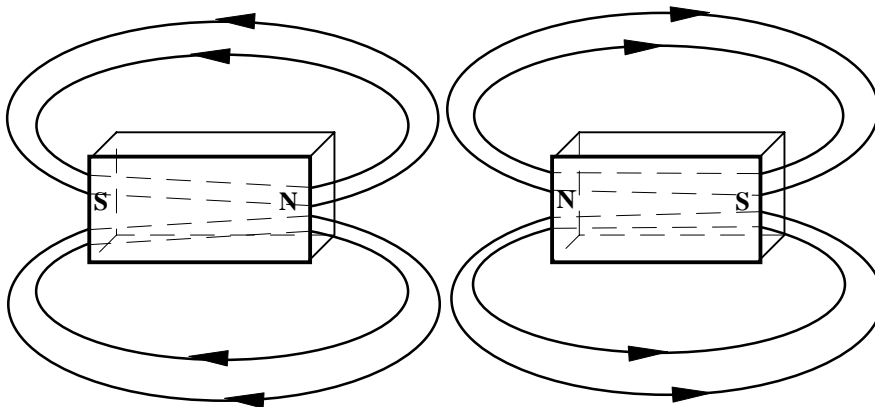
10.23 Attraction et répulsion des aimants :

Lorsque nous mettons en présence deux champs magnétiques, il se produit des forces, comme nous allons l'étudier dans un prochain chapitre. Ces forces apparaissent aussi entre des aimants, suivant le sens de leurs pôles. Nous constatons soit une attraction soit une répulsion entre les aimants, comme le montrent les exemples ci-dessous.



Les lignes de force sont dans le même sens.
Les pôles des aimants sont opposés.

Il se produit une attraction entre les deux aimants.



Les lignes de force sont dans un sens opposé.
Les pôles des aimants sont dans le même sens.

Il se produit une répulsion entre les deux aimants.

10.24 Force électromagnétique F :

Les champs magnétiques sont produits par des aimants permanents et des charges en déplacement. Ces champs, à leur tour, exercent des forces sur d'autres aimants permanents et sur des charges en mouvement.

La force magnétique sur une charge Q se déplaçant à une vitesse \vec{v} dans un champ magnétique \vec{B} est :

loi de Coulomb appliquée par analogie au magnétisme.

$$\vec{F} = Q\vec{v} \times \vec{B} \quad [N]$$

Cette loi deviendra la loi de Laplace.

Q charge électrique en [As]
 v vitesse de déplacement en [$m \cdot s^{-1}$]

nous savons que $Q = I \cdot t$ et que $v = \frac{\text{déplacement}}{\text{temps}} = \frac{l}{t}$

nous pouvons donc écrire
$$\vec{F} = (I \cdot t) \cdot \left(\frac{l}{t}\right) \times \vec{B}$$

par simplification, nous pouvons obtenir la loi suivante :

$$\Delta\vec{F} = \vec{I} \Delta l \times \vec{B} \quad \text{produit vectoriel !}$$

Unités utilisées :

force F newton [N]

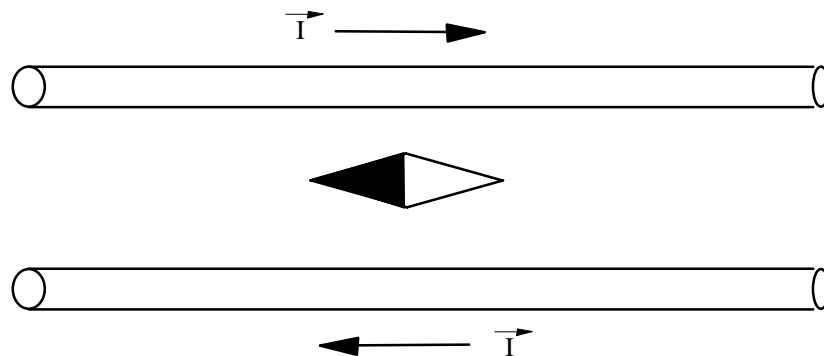
B induction tesla [T]

courant I ampère [A]

longueur l mètre [m]

Démonstration :

Lorsque nous faisons circuler un courant électrique dans deux conducteurs parallèles, des lignes de force s'établissent autour des conducteurs. Nous avons vu qu'il est possible de définir les sens de ces lignes de forces au moyen de règles simples (par exemple celle de la main droite).



Dans cet exemple, la force obtenue par les deux conducteurs déplace l'aiguille de la boussole placée entre eux.

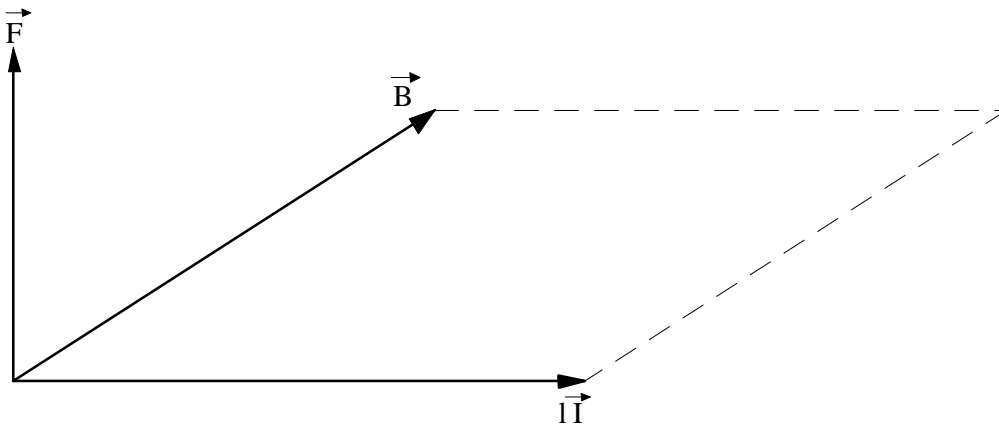
10.25 Influence du courant dans les conducteurs :

Il est bien entendu que la relation est donnée par rapport à une référence que nous admettrons 0. Mais nous devons savoir qu'il existe un champ d'induction magnétique \vec{B} partout dans l'espace.

Nous mesurerons toujours un écart de force électromagnétique \vec{F} pour un certain écart de longueur l

Nous retrouvons la relation : $\vec{F} = \vec{I}l \times \vec{B}$ produit vectoriel !

Dans notre cas, le vecteur \vec{B} et le vecteur courant \vec{I} constitue un plan :

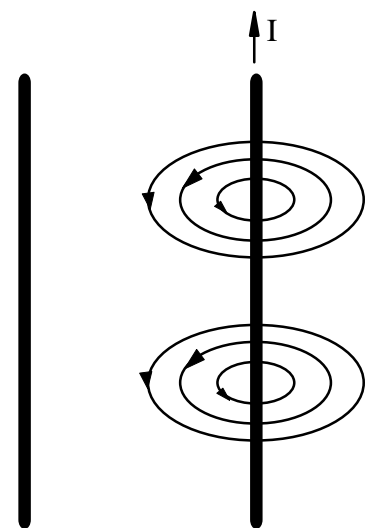


Nous constatons que la force électromagnétique \vec{F} représente l'ensemble de toutes les forces que subit la longueur \vec{I} perpendiculaire au champ d'induction \vec{B} .

Pour matérialiser cette relation, nous plaçons 2 conducteurs rectilignes en parallèle, distants de quelques centimètres.

Pour bien comprendre les différentes étapes de l'expérience, nous faisons circuler le courant dans le conducteur de droite.

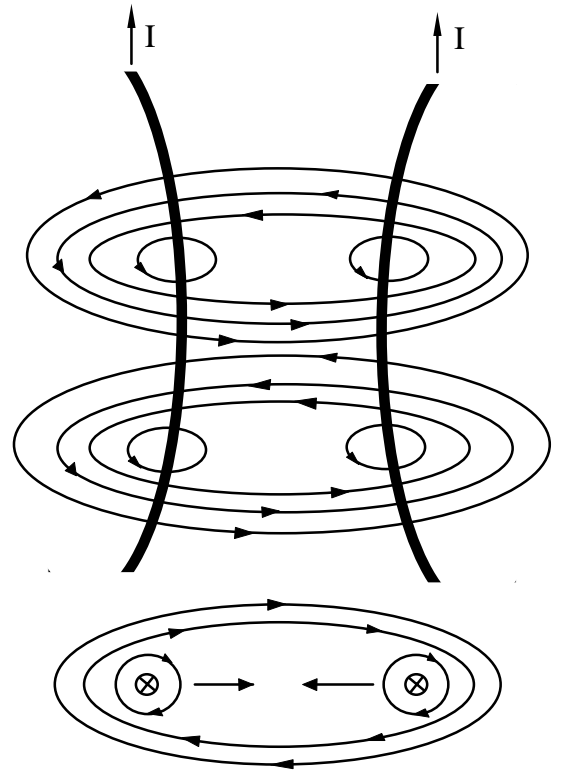
Nous remarquons que d'après la règle du tire-bouchon, il règne un champ d'induction magnétique \vec{B} autour du conducteur. Comme défini par le spectre magnétique, le vecteur \vec{B} nous donne le nom des pôles.



La deuxième phase consiste à faire circuler un courant I dans le second conducteur.

La longueur l du conducteur de droite et l'induction \vec{B} du conducteur de gauche forment un plan vertical.

Dans le même temps, le courant I circulant à l'intérieur du conducteur de droite fait régner un champ d'induction magnétique \vec{B} sur le conducteur gauche, selon la règle du tire-bouchon.



Constatations :

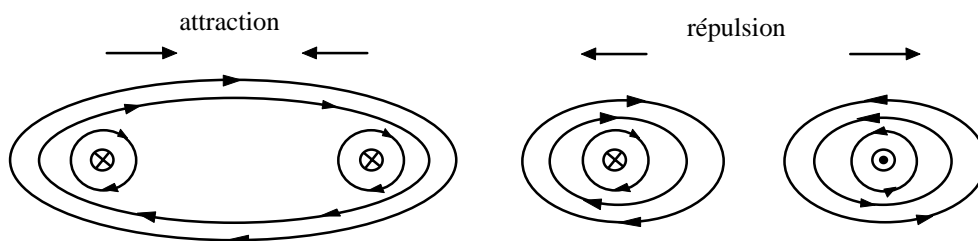
Les deux conducteurs font régner un champ d'induction magnétique \vec{B} égal et opposé.

Les deux conducteurs peuvent être assimilés à 2 aimants dont les pôles sont contraires.

Les deux conducteurs se rapprochent l'un de l'autre.

Nous pouvons déduire de cette expérience la conclusion suivante :

Les pôles de nom opposé s'attirent
Les pôles de même nom se repoussent



Il en va de même pour les conducteurs entre eux, et pour les aimants permanents.

10.26 Règle des trois doigts de la main droite :

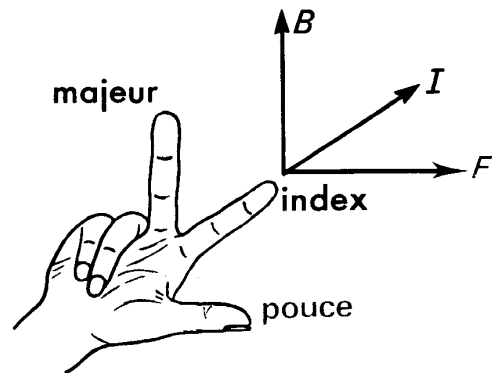
Cette règle est utilisée pour déterminer le sens de la force sur un conducteur parcouru par un courant électrique et placé dans un champ d'induction magnétique.

L'index indique le sens du courant I
(Index \Rightarrow Intensité)

Le majeur indique le sens de l'induction B
(Majeur \Rightarrow Magnétisme)

Le majeur et l'index forment un plan dont l'angle est naturellement de 90° .

Le pouce indique le sens de la force électromagnétique F (Pouce \Rightarrow pousser).

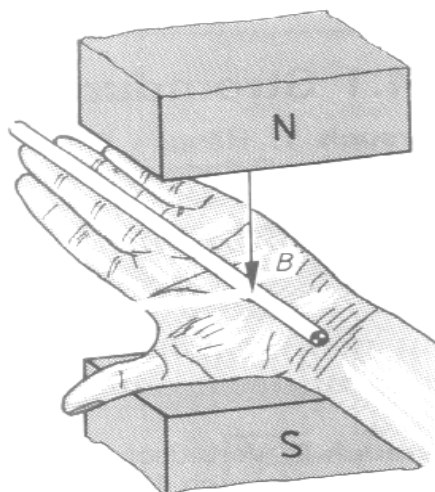


Le pouce est naturellement à 90° par rapport au plan formé par I et B .

10.27 Règle de la main gauche :

Il en existe également une pour la main gauche !

Elle nous donne les mêmes indications que la loi de la main droite.



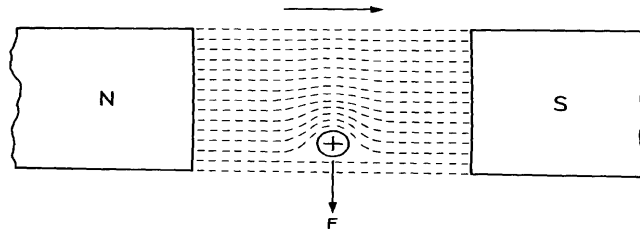
L'extrémité des doigts représente le sens du courant I .

La paume de la main est tournée de telle façon que les lignes d'induction y pénètrent, ou que le pôle Nord soit situé en face.

Le pouce indique la direction de la force électromagnétique F

10.28 Schéma des lignes d'induction :

Le dessin ci-dessous indique le sens des lignes de force de l'aimant, ainsi que le sens de déplacement du conducteur, sachant que la courant y pénètre.



10.29 Votre règle personnelle :

Nous rencontrons parfois des règles qui sont appelées différemment (règle de l'auto-stop, par exemple). C'est en général une règle dérivée des trois précédentes. Elles peuvent être pour l'élève une méthode intuitive correspondant mieux à sa façon de raisonner.

Ces règles nous permettent de représenter le phénomène électromagnétique. Il faut maintenant le quantifier.

Nous pouvons dire que la force électromagnétique \vec{F} est proportionnelle à ces différentes valeurs :

- à la longueur utile l du conducteur
- à l'induction \vec{B} moyenne perpendiculaire au conducteur
- au courant I circulant dans le conducteur

Pour modifier le produit vectoriel en produit scalaire, il suffit de prendre en considération la perpendicularité existant entre le plan formé de l'induction \vec{B} et de la longueur l .

Cette perpendicularité (90°) se traduit par la valeur du sinus de l'angle Θ .

$$\vec{F} = \vec{B} \times I\vec{l} \quad \text{produit vectoriel}$$

Dans ce cas particulier, nous admettons la perpendicularité (90°) entre les grandeurs, ce qui nous donne :

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \Theta \quad \text{mais nous savons que le sin de } 90^\circ \text{ vaut } 1$$

Nous pourrions donc admettre la relation suivante :

$$F = B \cdot I \cdot l \quad \text{exprimée en newton [N]}$$

Il est bien clair que l'angle Θ ne vaut pas toujours 90° .
Il faut donc toujours y prêter attention !

10.30 Exercices

Qu'appelle-t-on lignes de force ?

Comment peut-on définir le sens des lignes de force magnétique ?

Qu'est-ce que le spectre magnétique ?

Qu'est-ce que le Spin de l'électron ?

Donner deux noms de matériaux pour chaque classe de matériaux magnétique.

Peut-on comparer le potentiel magnétique au potentiel électrique ?

Compléter les figures ci-dessous en dessinant les lignes de force magnétique :

Ecrire la relation qui définit le flux magnétique Φ

Quelle est la différence entre l'induction B et le flux Φ ?

Qu'exprime-t-on au moyen de la perméance ?

A quoi peut-on comparer la perméance ?

Quel est l'avantage de placer un noyau magnétique au centre d'une bobine ?

Effectuer le développer littéral qui permet de justifier votre réponse.

Quelle est la valeur de la perméabilité du vide (ou de l'air) ?

Dans la règle de la main droite, quelle est la signification des doigts ?

Que désigne le mot SPIN ?

Que se passe-t-il si le courant augmente dans une bobine dont le noyau est à saturation ?

Qu'est-ce que l'induction rémanente ?

Comment s'appelle le champ qu'il faut opposer pour annuler l'induction rémanente ?

Pourquoi le cycle d'hystérésis n'est-il pas identique pour tous les matériaux ?

Quel est l'effet du noyau dans une bobine ?

Dessiner le cycle d'hystérésis pour une tôle de transformateur :

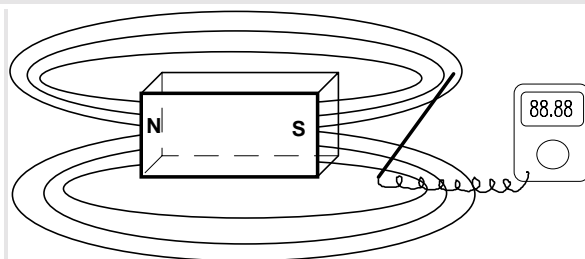
Dessiner le cycle d'hystérésis d'un aimant permanent :

Justifiez vos réponses pour les deux courbes précédentes.

- Un courant de 3 [A] traverse une bobine de 500 spires.
Combien de spires devrait avoir une bobine pour obtenir le même champ d'induction si le courant passe à 900 [mA] ?
- Une bobine sans noyau présente une induction de 1.5 [T]. elle est composée de 1000 spires et parcourue par un courant de 2 [A].
 - Quel sera le nombre de spires si nous utilisons un noyau de perméabilité $\mu_r = 200$?
 - Quel sera le courant dans la bobine si nous conservons le même nombre de spires mais que nous utilisons un noyau de $\mu_r = 300$?
- Avec un fil de cuivre d'une longueur de 150 [m] et d'un diamètre de 500 [μm] , nous réalisons une bobine sans noyau de 200 spires jointives. Elle est raccordée sur une tension continue de 1.5 [V].
Calculer l'induction \vec{B} et la longueur de cette bobine.
- Nous considérons un anneau de rayon intérieur de 3 [cm] et un rayon extérieur de 4 [cm]. Nous trouvons dans cet anneau, un entrefer d'une longueur de 1 [mm]. Cet anneau est placé dans l'air (voir table). Calculer le champ d'induction dans l'entrefer si :

$A_{\text{fer}} = 6 \text{ [cm}^2\text{]}$	$A_{\text{air}} = 8 \text{ [cm}^2\text{]}$ (à cause de la dispersion)	
$\mu_r = 1000$	$N = 100$	$I = 1 \text{ [A]}$

Calculer la valeur du courant si l'on voulait obtenir le même champ d'induction dans un entrefer 10 fois plus grand. Attention aux unités de longueur et d'aire !
- Un fluxmètre, placé avec un angle d'inclinaison de 42° par rapport à un aimant permanent en TICONAL, indique une valeur de [100 μWb] dans un milieu qui est de l'air.



L'aimant a les dimensions suivantes :

longueur $L = 10 \text{ [cm]}$
 largeur $l = 1 \text{ [cm]}$
 hauteur $h = 5 \text{ [mm]}$

- Calculer le champ d'induction magnétique B de l'aimant.
- On réalise une bobine à spires jointives à une seule couche sur un support non magnétique d'un diamètre de 5 [cm]. Le fil a une longueur de 160 [m] et une section de 1 [mm^2]. Elle est raccordée sur une source de tension de 6 [V].

Calculer l'intensité du champ magnétique de cette bobine.

7. Tracer sur une feuille quadrillée la courbe d'aimantation du matériau dont les caractéristiques sont les suivantes :

H		39	117	195	312	585	780	975		[A/m]
B		90	254	400	540	690	730	750		[mT]

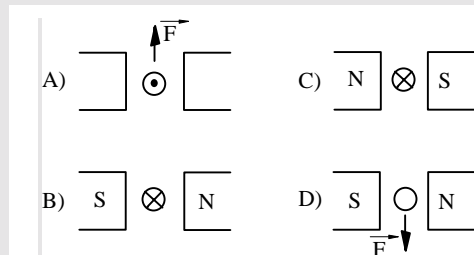
8. Calculer la perméabilité relative du matériau pour plusieurs points de la courbe et établir une constatation.
9. Calculer la force à laquelle est soumis un conducteur parcouru par un courant de 20 [A] lorsqu'il est placé dans l'entrefer d'un électroaimant où règne une induction de 1.5[T].

Le côté de l'électroaimant est de 14 [cm], et on admet la perpendicularité des lignes de force.

10. Calculer la longueur l des conducteurs de la planchette de démonstration des forces électromagnétiques, sachant qu'un dynamomètre (appareil de mesure des forces) indique 10 [N].

Un ampèremètre mesure un courant de 80 [A] et un fluxmètre nous donne 10 [μ Wb]. Le diamètre de l'aire est de 4 [mm]. Cette expérience est réalisée dans un milieu qui est l'air, avec des grandeurs perpendiculaires les unes aux autres.

11. Compléter le dessin en indiquant soit :
la direction du déplacement du conducteur,
le sens du courant qui le parcourt,
ou le pôle de l'aimant



12. Tracer l'allure d'un matériau donnant les valeurs suivantes lors d'un essai en laboratoire :

H	39	117	195	312	585	780	975		[A/m]
B	0.09	0.254	0.40	0.54	0.69	0.73	0.75		[T]

Calculer la perméabilité relative de ce matériau.

13. On désire obtenir une induction de 1.5 [T] dans un tore magnétique fermé en fer, dont le diamètre moyen est de 30 [cm].
Quel doit-être le nombre de spires si le courant est de 6 [A]
et la perméabilité relative de 1040 ?

14. Pour avoir une induction de 1.2 [T] dans une bobine à noyau magnétique en fer doux, il faut un champ de 550 [A·m⁻¹].
- Il faut 11400 [A·m⁻¹] pour obtenir la même induction dans une bobine avec un noyau en fonte.
- Calculer la perméabilité relative des deux matériaux.
15. Une bobine de 1 [m] de longueur comporte 2500 spires et elle est parcourue par un courant de 4 [A] .
- Calculer l'intensité du champ et l'induction magnétique à l'intérieur de la bobine.
16. Nous reprenons la même bobine pour essayer différents matériaux magnétiques. Que va devenir l'induction si nous utilisons des noyaux de perméabilité suivante ?
- a) 150 b) 20000 c) bois d) cuivre

Réponses :

1. N = 1667 spires
2. N = 5 spires I = 6.67 [mA]
3. long. = 23.87 [cm] B = 280.5 [μT]
4. B = 569 [μT] I = 10 [A]
5. B = 2.69 [T]
8. 1899 [A/m]
9. 4.2 [N]
10. l = 15.7 [cm]
11. A) Nord - Sud B) il monte C) il descend D) le courant sort du conducteur
13. N = 180 spires
15. Fer $\mu_r = 1736$ fonte $\mu_r = 84$
15. H = 10'000 [A/m] B = 12.56 [mT]
16. a) B = 1.875 [T] b) B = 250 [T] c) et d) matériaux non magnétiques $\mu_r = 1$