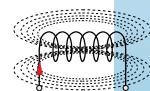


# Chapitre 7



7

## 7.1 Les aimants

### 7.1.1 Définition

On donne le nom d'aimants à des corps capables d'attirer des petits morceaux de fer ou de la limaille.

Cet effet est particulièrement prononcé aux deux extrémités, appelées pôles de l'aimant.

On trouve des aimants naturels : ces matières sont des oxydes de fer (exemple : la magnétite).

Les aimants artificiels sont obtenus avec des alliages spéciaux. Exemples : alnico (acier, aluminium, nickel et cobalt), ferrites durs (oxydes de fer et oxydes de cobalt).

### 7.1.2 Propriétés des aimants

La boussole est une aiguille aimantée montée sur un axe ; elle s'oriente toujours dans la même direction si on évite toute présence proche de courant électrique ou d'aimant.

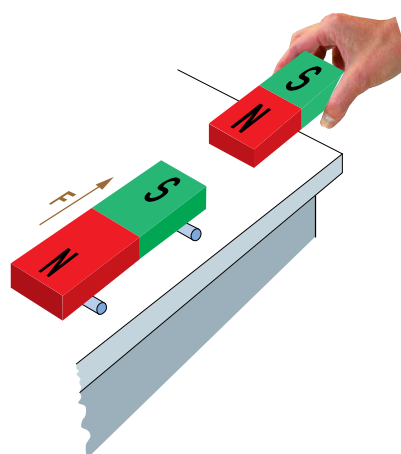
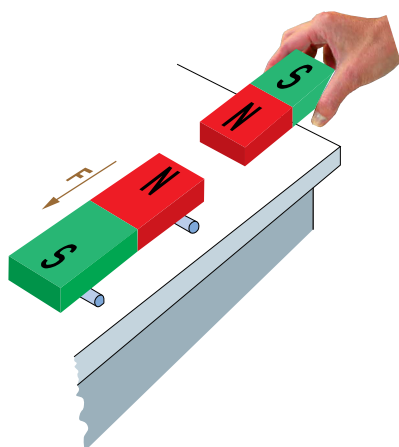
La pointe de l'aiguille qui montre le nord géographique est désignée pôle nord (par convention) et l'extrémité opposée pôle sud.



#### Loi des pôles

L'expérience montre que :

- deux pôles de même nom se repoussent ;
- deux pôles de noms contraires s'attirent.



En partageant en deux un aimant, nous constatons que chaque demi-aimant est devenu un aimant à son tour avec un pôle nord et un pôle sud.

Cette expérience nous montre qu'il est impossible d'isoler un pôle d'aimant. L'aimantation est donc une propriété de la particule de matière la plus petite, l'atome.



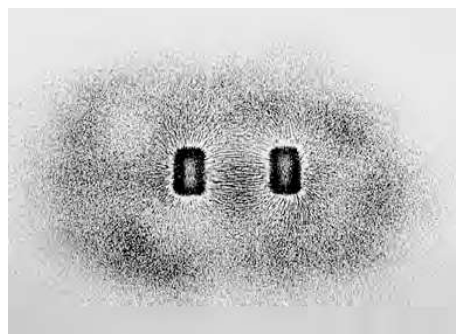
## 7.2 Champ magnétique

L'espace situé autour d'un aimant et dans lequel se produisent les effets magnétiques est appelé champ magnétique.

### 7.2.1 Spectre magnétique

L'utilisation de limaille de fer nous permet de mettre en évidence ce champ magnétique. En saupoudrant de façon régulière une plaque de verre placée en dessus d'un aimant, la limaille se déplace pour former des lignes allant d'un pôle à l'autre.

L'image ainsi obtenue s'appelle spectre magnétique.



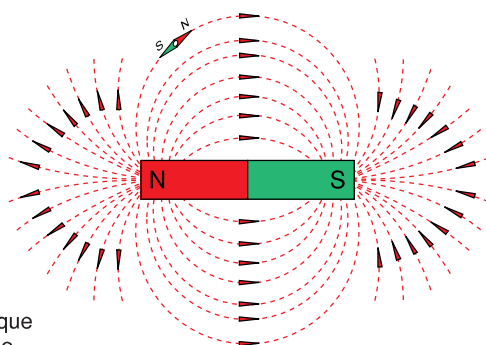
### 7.2.2 Propriétés des lignes de champ magnétique

Par convention, le sens est donné par le pôle nord d'une aiguille aimantée placée sur les lignes de champ magnétique.

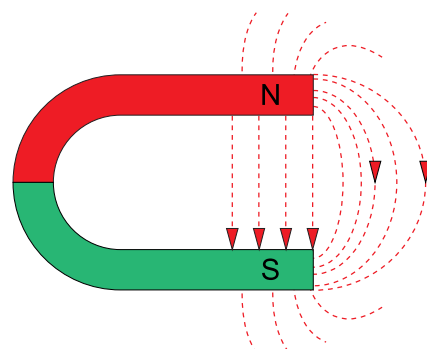
Elles ont donc les propriétés suivantes :

- elles sont orientées du nord vers le sud à l'extérieur de l'aimant ;
- elles forment des courbes fermées, c'est-à-dire qu'elles ne sont interrompues nulle part ;
- deux lignes de champ ne se croisent jamais car il ne passe qu'une seule et unique ligne de champs en un point quelconque du champ magnétique.

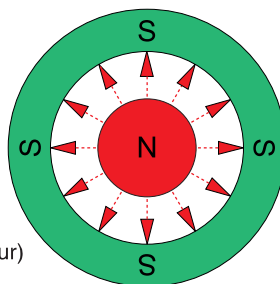
#### Exemples



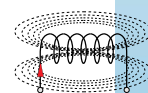
Barreau magnétique  
(par exemple : une  
aiguille aimantée)



Aimant en fer à cheval  
(par exemple : un instrument  
de mesure à cadre mobile)



Aimant annulaire  
(par exemple : un haut-parleur)

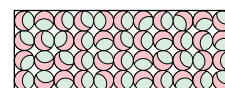
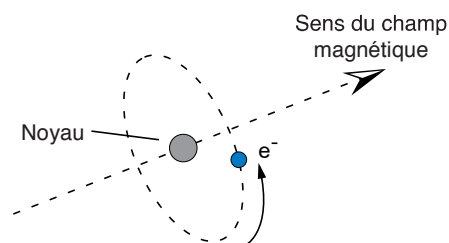


## 7.3 Matériaux dans le champ magnétique

### 7.3.1 Théorie simplifiée du magnétisme

Dans toutes les matières, les électrons gravitent autour du noyau de leur atome. Ce mouvement de charges électriques est comparable à un courant circulaire (spire) : il crée un champ magnétique.

Chaque atome est donc un petit aimant élémentaire.

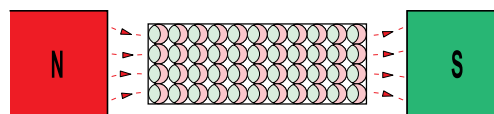


Aimants élémentaires non alignés

Tant qu'une matière n'a pas subi d'influence magnétique, ses aimants élémentaires sont en désordre. Leurs actions se neutralisent et n'ont pas d'effet magnétique extérieur.

Quand une matière est placée dans un champ magnétique et que ses aimants élémentaires ne s'orientent pas, la matière est non magnétique.

S'ils s'alignent par l'influence du champ et additionnent leurs effets au champ magnétique, ce sont des matériaux ferromagnétiques.



Les aimants élémentaires sont alignés

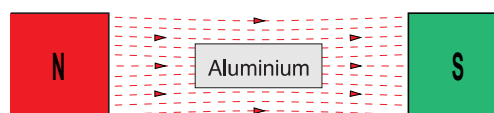
### 7.3.2 Matériaux amagnétiques

Ces matériaux non magnétiques ne subissent pratiquement aucun changement quand on les soumet à un champ magnétique.

Ils ne modifient pas le champ magnétique obtenu dans l'air, ni dans sa forme, ni dans sa valeur.

L'argent, le cuivre, l'aluminium et le laiton, par exemple, sont non magnétiques.

L'eau, l'air et les isolants électriques le sont également.

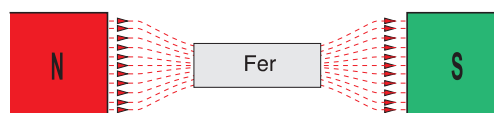


### 7.3.3 Matériaux ferromagnétiques

On peut les rendre magnétiques par l'influence d'un aimant ou d'un électroaimant.

Ils modifient le spectre obtenu dans l'air et renforcent considérablement le champ magnétique.

Le fer, le nickel, le cobalt et un grand nombre de leurs alliages sont ferromagnétiques.



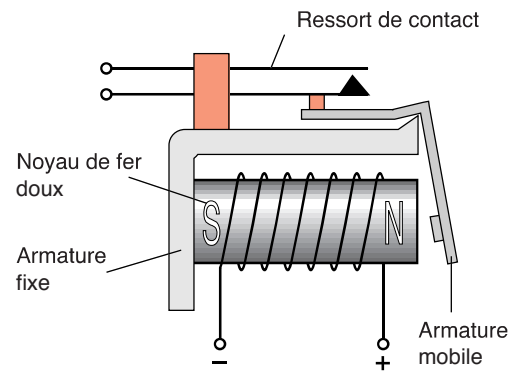
Les lignes de champ empruntent le chemin dont la résistance magnétique est la plus faible

### 7.3.4 Aimantation temporaire

Si après élimination du champ magnétique extérieur, la matière perd la plus grande partie de son aimantation, celle-ci est dite temporaire. Ce type d'aimantation est celui du fer doux.

#### Applications

- relais ;
- sonneries ;
- disjoncteurs ;
- inducteurs de moteurs et générateurs ;
- transformateurs, électroaimants.



Relais

### 7.3.5 Aimantation permanente

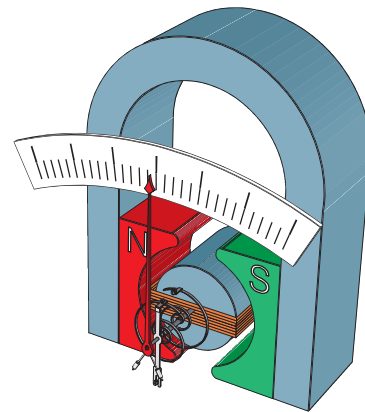
Si après élimination du champ magnétique extérieur, la matière garde la plus grande partie de son aimantation, cette dernière est dite permanente.

Ce type d'aimantation est celui de l'acier, des métaux durs et alliages spéciaux (alnico, ticonal, etc.).

Les aimants permanents sont fabriqués en introduisant une pièce en matériau ferromagnétique dur dans une bobine parcourue par un courant continu intense.

#### Applications

- petits moteurs à courant continu ;
- instruments de mesure ;
- haut-parleurs.

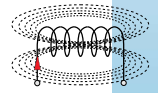


Instrument de mesure

### 7.3.6 Désaimantation

Il est possible de faire disparaître ou de diminuer l'aimantation au moyen des procédés suivants :

- en chauffant les matières au-dessus d'une certaine température, appelée point de Curie, les propriétés magnétiques disparaissent (fer : 768 °C ; nickel : 360 °C ; cobalt : 1131 °C) ;
- en soumettant un aimant permanent à l'influence d'un fort champ alternatif d'intensité décroissante, son magnétisme disparaît également ;
- sous l'action d'un violent choc, la structure interne de l'aimant est modifiée et l'aimantation en est diminuée ;
- le vieillissement de l'aimant est aussi un facteur de désaimantation.



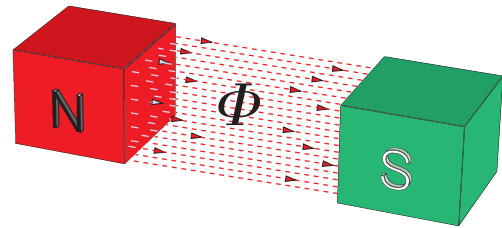
## 7.4 Grandeurs et unités

### 7.4.1 Flux magnétique

#### Définition de la grandeur

Le flux magnétique est l'ensemble des lignes de champ produites par un aimant ou un électroaimant.

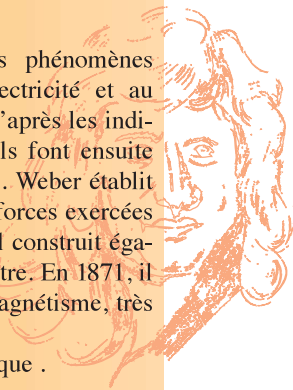
Le flux magnétique  $\Phi$  (phi) s'exprime en webers [Wb]



Weber Wilhelm Eduard, 1804-1891.

Physicien allemand. Il étudie d'abord des phénomènes d'acoustique puis s'intéresse surtout à l'électricité et au magnétisme. Il réalise avec Gauss, en 1833, d'après les indications d'Ampère, un télégraphe électrique. Ils font ensuite des mesures relatives au magnétisme terrestre. Weber établit en 1846 une loi fondamentale concernant les forces exercées par les particules électrisées en mouvement. Il construit également le premier modèle d'électrodynamomètre. En 1871, il publie une théorie du magnétisme et du diamagnétisme, très proche de nos idées modernes.

On a donné son nom à l'unité du flux magnétique.



### 7.4.2 Induction magnétique

Il est souvent utile de connaître la grandeur du flux magnétique par unité de surface. Le rapport du flux magnétique sur la section est appelé induction magnétique.

#### Définition de la grandeur

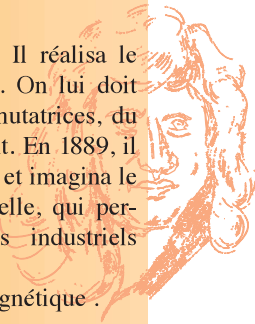
L'induction magnétique est le nombre de lignes de champ magnétique par unité de surface.

L'induction magnétique  $B$   
s'exprime en Tesla [T]

Tesla Nikola, 1856-1943.

Ingénieur électricien et inventeur yougoslave. Il réalisa le premier moteur asynchrone à champ tournant. On lui doit l'invention des courants polyphasés, des commutatrices, du montage étoile et des moteurs à champ tournant. En 1889, il passa à l'étude des courants de haute fréquence et imagina le couplage de deux circuits par induction mutuelle, qui permettront de créer les premiers générateurs industriels d'ondes hertziennes (radio).

On a donné son nom à l'unité de l'induction magnétique.



#### Formule

$B$  induction magnétique [T]

$\Phi$  flux magnétique [Wb]

$A$  surface perpendiculaire au flux [m<sup>2</sup>]

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

#### Valeurs usuelles

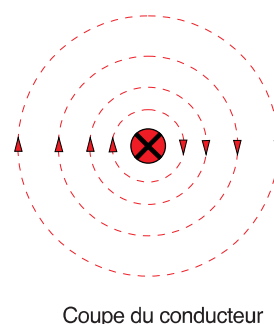
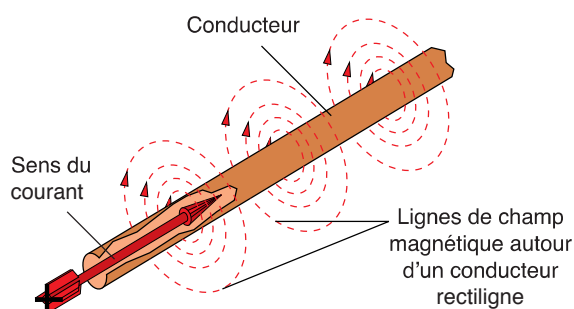
Pôle de machine électrique : 1 à 2 T

Aimant artificiel : 0,5 à 1,5 T

Champ magnétique terrestre (à Neuchâtel): env. 46,7  $\mu$ T

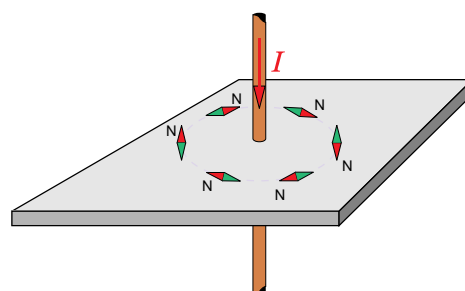
## 7.5 Electromagnétisme

Si un courant circule dans un conducteur, il produit un champ magnétique autour de ce conducteur.  
Le sens des lignes du champ magnétique, vues dans le sens du courant, est celui des aiguilles d'une montre.  
Si le courant circule dans le sens contraire, le sens des lignes du champ magnétique est inversé.



Les caractéristiques des lignes de champ autour d'un conducteur rectiligne parcouru par un courant ont les propriétés suivantes :

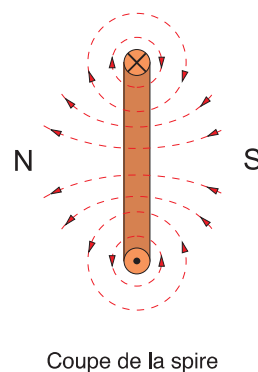
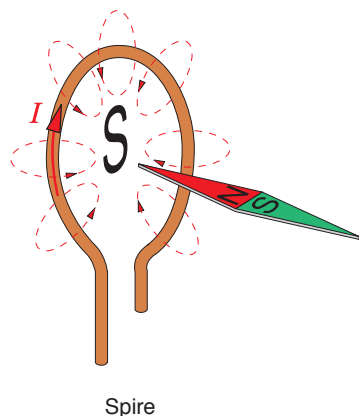
- elles ont la forme de circonférences concentriques ;
- elles sont plus denses près du conducteur ;
- leur sens dépend du sens du courant dans le conducteur.



### 7.5.1 Champ magnétique d'une spire

Vers le centre de la spire, les lignes de champ sont pratiquement des droites, alors qu'en se rapprochant du conducteur, les lignes se courbent de plus en plus et forment des cercles autour du conducteur.

Le sens des lignes de champ est déterminé de la même façon que pour un conducteur rectiligne si l'on regarde la coupe de la spire.

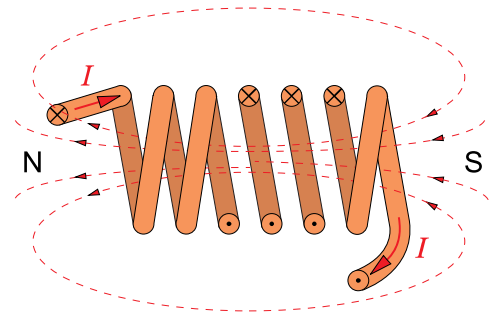


Coupe de la spire

### 7.5.2 Champ magnétique d'une bobine

#### a) Bobine sans noyau

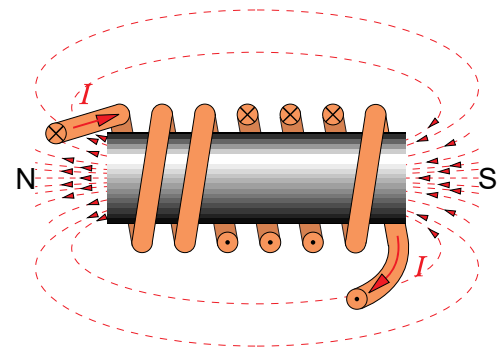
Le spectre magnétique d'une bobine ressemble à celui d'un aimant droit. Pour le sens des lignes de champ, la même règle que celle de la spire est applicable.



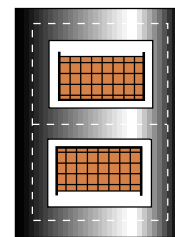
#### b) Bobine avec noyau (électroaimant)

En pratique, on munit souvent les bobines d'un noyau magnétique (fer doux).

Le champ magnétique de la bobine sans fer est ainsi multiplié par la présence des aimants élémentaires du noyau, orientés par le champ de la bobine.

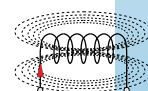


Les électroaimants sont souvent construits avec des circuits magnétiques fermés.



Electroaimant cuirassé





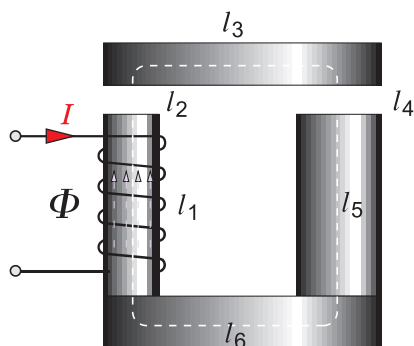
## 7.6 Circuit magnétique

### 7.6.1 Force magnétomotrice ou excitation

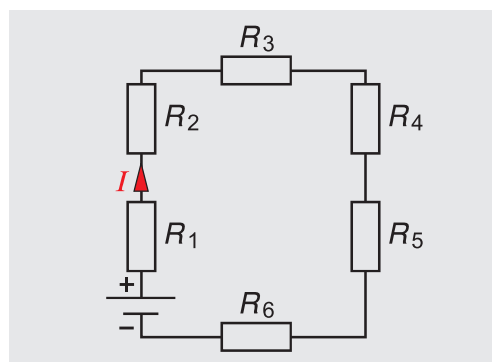
Un circuit magnétique est un ensemble de matériaux, magnétiques ou non, traversé par des lignes de champ. Une bobine magnétisante, parcourue par un courant d'excitation, est disposée sur le circuit.

Si la totalité du trajet des lignes de champ a lieu dans des matières ferromagnétiques, le circuit magnétique est dit «sans entrefer». Si une partie du trajet se fait dans l'air (ou une matière amagnétique), le circuit est dit «avec entrefer» ( $l_2$  et  $l_4$ ).

Grandeur	Magnétisme	Electricité
Qui provoque la circulation du flux	Excitation $\Theta$	Tension $U$
Flux circulant	Flux magnétique $\Phi$	Courant $I$
Détermine (freine) la circulation du flux	Réductance magnétique $R_m$	Résistance $R$



Circuit magnétique



Circuit électrique équivalent

La source du champ magnétique est appelée force magnétomotrice ou excitation.

#### Définition de la grandeur

L'excitation d'une bobine est le produit du nombre de spires par le courant.

On exprime parfois l'excitation en ampères-tours [Atr].

#### Formules

$\Theta$  excitation [A]

$N$  nombre de spires

$I$  intensité du courant [A]

L'excitation d'une bobine  $\Theta$  s'exprime en ampères [A]

$$\Theta = N \cdot I$$



### 7.6.2 Intensité du champ magnétique

#### Définition de la grandeur

L'intensité du champ magnétique représente la force magnétomotrice d'un circuit magnétique par mètre de longueur.

#### Formules

$H$  intensité du champ magnétique [ $\frac{A}{m}$ ]

$N$  nombre de spires

$I$  intensité du courant [A]

$l$  longueur des lignes de champ du circuit magnétique [m]

$d$  diamètre de la bobine

$\Theta$  excitation [A]

Les relations ci-dessus ne sont valables que pour une bobine torique. Pour une bobine (solénoïde) très longue ( $l > 8$  fois le diamètre), la longueur  $l$  correspond à la longueur de la bobine.

Pour une bobine quelconque.

L'intensité du champ magnétique  $H$  s'exprime en ampères par mètre [ $\frac{A}{m}$ ]

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

$$H = \frac{\Theta}{l}$$

$$H = \frac{N \cdot I}{\sqrt{d^2 + l^2}}$$

### 7.6.3 Induction d'une bobine sans noyau ferromagnétique

L'induction d'une bobine sans noyau dépend de l'intensité du champ magnétique et de la constante de perméabilité dans le vide  $\mu_0$ .

Cette constante est caractéristique du milieu dans lequel se développent les lignes de champ.

#### Formules

$B_0$  induction dans l'air [T]

$\mu_0$  perméabilité du vide [ $\frac{Tm}{A}$ ]

$$(\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \approx \frac{1}{800'000} \frac{Tm}{A})$$

$H$  intensité du champ magnétique [ $\frac{A}{m}$ ]

$\mu_r = 1$  pour une bobine sans noyau

#### Remarque

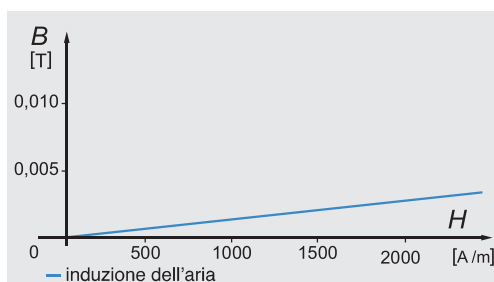
Cette valeur de perméabilité du vide  $\mu_0$  est admise aussi pour l'air et la plupart des matériaux amagnétiques.

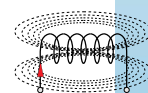


Symbole de la bobine

$$B_0 = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$$

$$[T] = [\frac{Tm}{A}] \cdot [\frac{A}{m}]$$





### 7.6.4 Induction d'une bobine avec noyau ferromagnétique (électroaimant)

L'électroaimant est la principale application de la bobine avec noyau.

L'induction d'un électroaimant dépend de la matière dans laquelle se trouve le champ magnétique. L'augmentation d'induction est caractérisée par un facteur d'amplification appelé perméabilité relative  $\mu_r$ .

Ce facteur n'a pas d'unité.

L'induction d'un électroaimant est de ce fait déterminée par la perméabilité du vide, la perméabilité relative et l'intensité du champ magnétique.

#### Formule

$B$  induction dans l'électroaimant [T]

$\mu_r$  perméabilité relative [-]

$\mu_0$  perméabilité du vide [ $\frac{Tm}{A}$ ]

$\mu$  perméabilité absolue [ $\frac{Tm}{A}$ ]

$H$  intensité du champ magnétique [ $\frac{A}{m}$ ]

Symbole de la bobine avec noyau

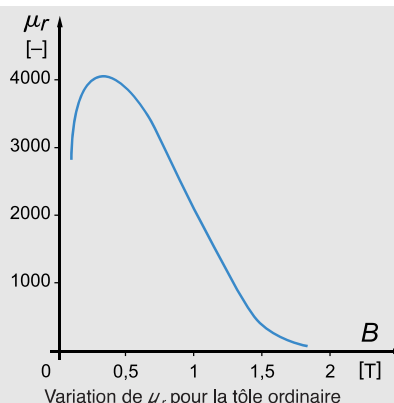
$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

#### Valeurs usuelles (indicatives)

Matières	Perméabilité relative $\mu_r$
Fer doux	10000
Fer-Silicium	20000
Fer-Nickel	90000

Ces valeurs maximales dépendent fortement de l'intensité du champ magnétique (saturation).



### 7.6.5 Courbe d'aimantation

Pour connaître l'aimantation des matières magnétiques, il faut déterminer sur des échantillons de chaque matière la correspondance entre l'induction  $B$  et l'intensité du champ  $H$  qui l'a produite.

Cette correspondance est appelée courbe d'aimantation. On constate que pour augmenter l'induction d'une bobine, il faut un noyau ayant une perméabilité relative élevée. Toutefois, selon la courbe d'aimantation, cette augmentation n'est pas infinie.

A partir d'une certaine excitation, l'induction croît moins rapidement bien que l'augmentation de l'intensité du champ magnétique soit toujours aussi importante. Cette partie de la courbe est appelée saturation.

La saturation n'apparaît pas avec une bobine sans noyau ; l'induction, beaucoup plus faible, est toujours proportionnelle à l'intensité du champ magnétique.

