

## **Partie I : Matériaux Magnétiques**

### **I.1 Généralités et définitions**

Le terme de magnétisme désigne l'ensemble des phénomènes qui ont lieu au cœur et autour de matériaux aimantés, que cette aimantation soit naturelle ou qu'elle soit le résultat d'un champ d'induction (électrique ou magnétique). Les applications du magnétisme sont nombreuses, de l'informatique à la médecine en passant par la physique des particules.

### **I.2 Découverte du magnétisme:**

Les premières observations remontent à l'Antiquité mais le phénomène n'a été étudié avec attention qu'à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle. Charles Augustin de Coulomb établit alors que les forces qui s'exercent entre deux charges magnétiques sont inversement proportionnelles au carré de la distance qui les sépare.

### **I.3 Le magnétisme, un phénomène quantique:**

Aujourd'hui, il est admis que le magnétisme est un phénomène quantique dont les effets s'observent à l'échelle macroscopique. Au niveau de l'atome, chaque électron possède un petit moment magnétique. Naturellement, les électrons de moments magnétiques opposés ont tendance à se regrouper par paires. à l'échelle macroscopique, l'aimantation est alors nulle. Mais, si des électrons se retrouvent sans partenaires, leurs moments magnétiques s'additionnent. Ils produisent alors une aimantation globale du matériau. Les métaux de transition (fer, nickel, etc.) et les terres rares, sont les seuls éléments à porter un tel moment magnétique.

## I.4 Différentes formes de magnétisme:

Il existe plusieurs formes de magnétisme qui rendent compte notamment des conséquences statistiques des comportements individuels des systèmes atomiques (contribution des moments magnétiques et du remplissage des sous-couches atomiques) :

**le diamagnétisme ;**

**le paramagnétisme ;**

**le ferromagnétisme ;**

**le ferrimagnétisme ;**

**l'antiferromagnétisme.**

## I.5 Aimantation de la matière:

En physique, l'**aimantation** est une grandeur vectorielle qui caractérise à l'échelle macroscopique le comportement magnétique d'un échantillon de matière. Elle a comme origine le moment magnétique orbital et le moment magnétique de spin des électrons. Elle se mesure en ampères par mètre ou, parfois, en teslas par  $\mu_0$ .

L'aimantation, habituellement désignée par le symbole **M** (en majuscule), est définie comme la densité volumique de moment magnétique. Autrement dit,

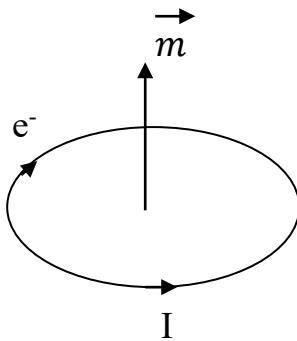
$$M = \frac{dm}{dV}$$

Où :dm est le moment magnétique contenu dans le volume élémentaire dV

## I.6 Moment magnétique

En physique, le **moment magnétique** est une grandeur vectorielle qui permet de caractériser l'intensité d'une source magnétique. Cette source peut être un courant électrique, ou bien un objet aimanté.

Le moment magnétique est souvent noté  $\vec{m}$ . Il s'exprime en ampères mètres carrés ( $A \cdot m^2$ ).



## I.7 Champ d'induction magnétique ( $\vec{B}$ )

En 1819 le savant Danois Oersted découvrit qu'un conducteur parcouru par un courant électrique produisait un champ magnétique capable de faire dévier l'aiguille d'une boussole. le champ magnétique et d'autant plus fort que l'intensité de courant est importante et le sens des lignes de champ dépend du sens de courant. Il s'exprime en **Tesla**.

selon la loi de **Biot et Savart** : l'induction magnétique créée en un point M par une portion  $dl$  d'un fil parcouru par un courant  $I$  est donnée par:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{l} \Lambda \vec{r}}{4\pi r^3}$$

$\mu_0$  : perméabilité du vide égale  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ S.I}$

$d\vec{B}$  : élément différentiel d'induction magnétique.

$d\vec{l}$  : élément différentiel du conducteur électrique.

$\vec{r}$  : vecteur position

## I.8 Champ d'excitation magnétique

Le champ d'excitation magnétique  $\vec{H}$  induit par les particules chargée en mouvement. Le champ  $\vec{H}$  ne peut mesurer directement, il déduit de la mesure de l'induction dans le vide. Il s'exprime en Ampères par mètre.

Dans le vide ou dans l'air : l'induction et l'excitation magnétique sont colinéaires.

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$$

au sein d'un matériau magnétique : il en est de même. Mais on fait intervenir la perméabilité relative du matériau  $\mu_r$ ,

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

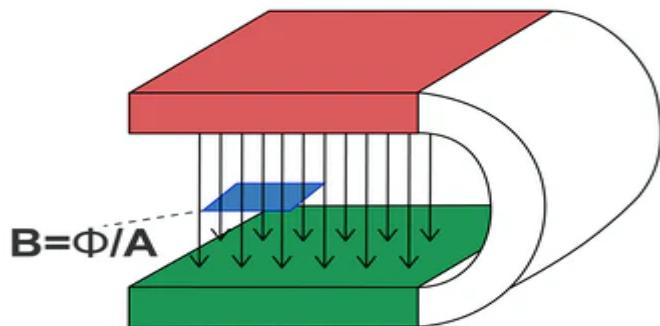
## I.8. Flux magnétique $\phi$ :

Le flux magnétique  $\phi$  est la densité du flux qui traverse une surface imaginaire.

Si les lignes du champ suivent un trajet rectiligne (par exemple entre les pôles d'un aimant fer à cheval), le flux magnétique  $\phi$  à travers une surface A, qui est perpendiculaire au flux, peut être calculé comme suit :

$$\phi = \vec{B} \cdot \iint d\vec{A}$$

Il s'exprime en Tm<sup>2</sup> où Weber



### Exercice 1 : Champ magnétique

Un solénoïde comportant  $N = 1000$  spires jointives a pour longueur  $L = 80$  cm. Il est parcouru par un courant d'intensité  $I$ . a) Faire un schéma sur lequel vous représenterez :

- le spectre magnétique du solénoïde
- les faces Nord et Sud
- le vecteur champ magnétique au centre du solénoïde

On suppose le solénoïde suffisamment long pour être assimilable à un solénoïde de longueur infinie. b) Quelle est l'expression de l'intensité du champ magnétique au centre du solénoïde ?

A.N. Calculer  $B$  si  $I = 20$  mA. L'axe du solénoïde est placé perpendiculairement au plan du méridien magnétique. Au centre du solénoïde on place une petite boussole mobile autour d'un axe vertical.

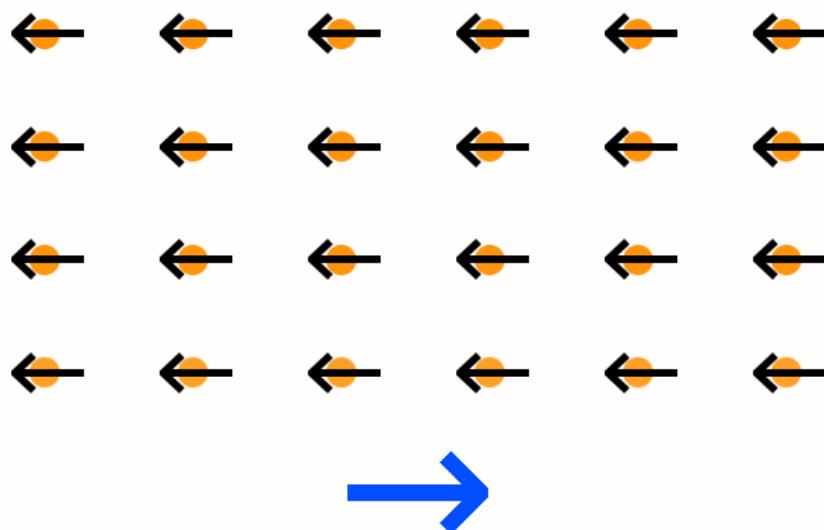
c) Quelle est l'orientation de la boussole pour  $I = 0$  ?

Quand le courant d'intensité  $I = 20$  mA parcourt le solénoïde, la boussole tourne d'un angle  $\alpha = 57,5^\circ$ . En déduire l'intensité  $B_h$  de la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

## II. Le diamagnétisme

### II.1. Généralité et définition:

Quand, dans un matériau soumis à un champ magnétique, tous les électrons s'orientent dans le sens opposé au champ magnétique (donc l'inverse que dans un matériau paramagnétique), alors l'aimant et le matériau se repoussent et on parle de diamagnétisme :



Cette répulsion intervient à de degrés plus ou moins forts dans tous les matériaux, bien qu'elle soit généralement écrasée par d'autres types de magnétisme. Aussi, la répulsion entre un matériau diamagnétique et un aimant n'existe pas de façon intrinsèque : elle naît de la présence de l'aimant, et elle disparaît quand l'aimant est retiré.

On observe ceci par exemple quand on place du carbone pyrolytique au dessus d'un aimant : la répulsion est alors supérieure au poids du morceau de carbone et les deux forces (répulsion diamagnétique et poids) s'équilibrivent.

Le diamagnétisme est dû à un ralentissement des électrons sur leur orbitales : Cette orbitale est comme une spire de courant, traversé par le flux magnétique de l'aimant. Ceci induit un courant de Lenz et un champ magnétique opposé à celui qui lui a donné naissance et ralentit les électrons. Cette diminution de vitesse des électrons produit réduit la susceptibilité magnétique du matériau et il devient moins magnétisable. Si la susceptibilité magnétique est nulle, elle devient négative : donc répulsive.

## II.2. Relation entre $B$ et $H$ dans le vide

Nous avons déjà vu que dans le vide, le champ d'induction  $B$  et le champ d'excitation  $H$ , étaient colinéaires et liés par la relation  $B = \mu_0 H$

Avec  $\mu_0$  la perméabilité magnétique du vide.

## II.3. Milieux magnétiques isotropes

Au sein d'un matériau, le champ d'excitation  $H$  est toujours donné par le théorème d'Ampère. Sous le champ d'excitation  $H$ , il va se produire une influence du milieu qui va se superposer au champ d'excitation pour produire le champ d'induction. On définit cette réaction à l'aide du vecteur d'aimantation  $M$ :

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (1.1)$$

Cette aimantation  $M$  est proportionnelle au champ d'excitation et peut se mettre sous la forme  $M = \chi H$

où:  $\chi$  est la susceptibilité magnétique relative du matériau. Ainsi le champ d'induction résultant peut s'écrire sous la forme définie par la relation (1.1), avec  $\mu_r$  la perméabilité relative du matériau et

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (1.2)$$

#### II.4. Milieux diamagnétiques ( $\chi < 0$ ):

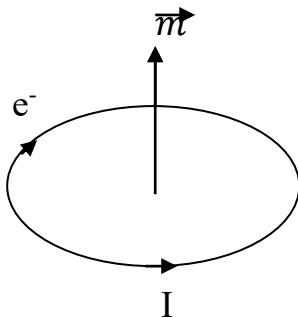
Le milieu diamagnétique est caractérisé par une susceptibilité magnétique relative  $\chi$  faible de valeur négative (de l'ordre de  $-10^{-9}$  à  $-10^{-5}$ ). Le champ d'aimantation  $\mathbf{M}$  est donc pratiquement nul.  $\mathbf{H}$  et  $\mathbf{M}$  sont de sens contraire. Ce type de matériau ne présente pas d'intérêt du point de vue magnétique.

Matière	Susceptibilité $\chi$
Hydrogène (1 atm.)	$-2.1.10^{-9}$
Azote (1 atm)	$-5.0.10^{-9}$
Sodium	$-2.4.10^{-6}$
Silicium (Si)	$-1.2.10^{-6}$
Cuivre (Cu)	$-1.08.10^{-6}$
Plomb (Pb)	$-1.4.10^{-6}$
Bismuth	$-1.7.10^{-5}$
Diamant	$-2.2.10^{-5}$

Tableau 1-1 : Substance diamagnétique

#### II.5. La théorie de Langevin:

Le principe de cette théorie est l'étude de l'effet du champ magnétique sur le mouvement de l'électron autour du noyau



à la suite de la rotation de l'électron, il a un moment magnétique  $\vec{\mu}$

$$m = I \cdot S$$

où :

S: la surface d'orbite circulaire;  $S = \pi r^2$

r: le rayon d'orbite de l'électron

### Exercice :

On considère un électron dans un atome. Dans la théorie de diamagnétisme de Langevin, le mouvement de l'électron autour du noyau de l'atome est équivalent du moment magnétique généré par un courant I qui passe dans le circuit fermé d'air A (surface S).

a/ Ecrire la relation entre I, m et A.

b/ Montrer que le moment magnétique de l'électron s'écrit  $m = e \cdot v \cdot r / 2$

e: la charge électronique;

v: sa vitesse;

r: le rayon de son orbite.

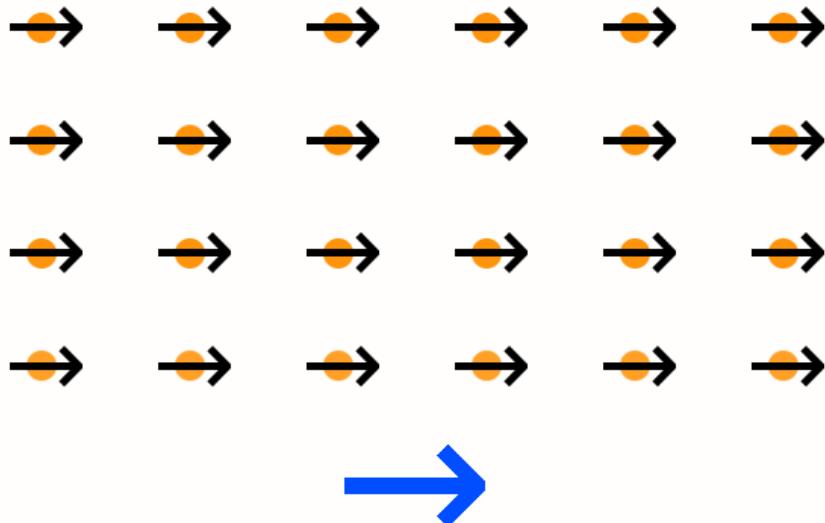
### **III. Paramagnétisme**

#### **III.1. Généralité et définition:**

Le magnétisme habituel, celui qui permet à un aimant de soulever des trombones, c'est le paramagnétisme : c'est le magnétisme du fer et de l'acier, mais aussi du nickel ou du cobalt.

Son fonctionnement est assez simple mais il faut quand même plonger au cœur de la matière. Dans les atomes comme ceux du fer, certains électrons, ceux situés en périphérie de l'atome et qui ne participent pas aux liaisons atomiques, sont comme « orientables » (on parle de moment magnétique de l'électron, qu'on pourrait décrire comme le sens de l'aimant représenté par l'électron).

Quand on soumet un échantillon de fer à un champ magnétique, ces électrons s'alignent tous dans le même sens que les lignes de champ du champ magnétique :



Les moments magnétiques de chaque atome s'alignent avec le champ magnétique extérieur (en bleu).

En résultat, le champ magnétique du matériau et celui de l'aimant s'ajoutent. Le matériau et l'aimant sont alors attirés l'un vers l'autre. C'est ce qui permet à un trombone de rester « collé » à un aimant.

De plus, vous avez peut-être remarqué que si on utilise un aimant relativement puissant, on peut créer un sorte de « serpent » avec les trombones : le premier trombone est collé à l'aimant, mais les autres trombones peuvent se coller au trombone précédent. On peut ainsi en faire coller deux ou trois à la suite, suivant la force de l'aimant.

Ceci est dû au fait que chaque trombone, en présence de l'aimant, devient un aimant également (à cause des électrons, tous alignés). Quand on retire l'aimant, les électrons reprennent une orientation aléatoire et l'aimantation disparaît.

### III.2.Milieux paramagnétiques ( $\chi > 0$ )

Le paramagnétisme est caractérisé par une susceptibilité relative  $\chi$  positive de faible valeur (de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-6}$ ). **H** et **M** sont de sens identique. La polarisation qui résulte d'un champ magnétique est négligeable.

<i>Matière</i>	<i>Susceptibilité <math>\chi</math></i>
Oxygène (1 atm.)	$2.1 \ 10^{-6}$
Magnésium	$1.2 \ 10^{-5}$
Aluminium (Al)	$2.3 \ 10^{-5}$
Tungstène (W)	$6.8 \ 10^{-6}$
Titane	$7.1 \ 10^{-5}$
Platine (Pt)	$3.0 \ 10^{-4}$

*Tableau III-1 : Substance paramagnétique*

### III.3.Applications : Métaux de terres rares et métaux de transition.

#### a. Métaux de terres rares

Les éléments de terres rares (ETR) regroupent 17 éléments chimiques relativement abondants dans la croûte terrestre : les lanthanides (15 éléments, numéros atomiques 57 à 71), en plus du scandium et de l'yttrium.

Scandium	Sc
Yttrium	Y
Lanthane	La
Cérium	Ce
Praséodyme	Pr
Néodyme	Nd
Prométhium	Pm
Samarium	Sm
Europium	Eu
Gadolinium	Gd
Terbium	Tb
Dysprosium	Dy
Holmium	Ho
Erbium	Er
Thulium	Tm
Ytterbium	Yb
Lutécium	Lu

FigureIII.1 Métaux de terres rares

## Usages

Les ETR ont commencé à être utilisés à grande échelle au cours des années 50, à la suite de la découverte de méthodes efficaces de séparation des différents éléments.

Les ETR sont utilisés dans une multitude d'applications, notamment dans le raffinage du pétrole, la fabrication de verres, de céramiques, de batteries rechargeables, d'éoliennes, de baladeurs numériques.

Ils sont utilisés également dans la fabrication d'écrans de téléviseurs et d'ordinateurs, d'ampoules lumineuses ultra-efficaces, de systèmes de radar, de

convertisseurs catalytiques, de superconducteurs et d'aimants permanents (notamment utilisés dans les moteurs électriques). En général, les usages sont très spécifiques.

En raison de leurs propriétés uniques, l'avenir des ETR est prometteur, particulièrement dans le domaine de la haute technologie.

### **b. les métaux de transition**

On appelle **élément de transition**, les éléments dont l'état atomique possèdent une couche «d» (**métaux de transition**) ou f (**lanthanides, actinides**) partiellement remplie.

*Série 1* Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn

*Série 2* Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd

*Série 3* Lu Hf Ta W Re Os Ir Pt Au Hg

Les métaux de transition possèdent des propriétés intéressantes pour l'industrie, la construction et la vie quotidienne :

- . Ils sont beaucoup plus rigides que les métaux du groupe 1 et 2
- . Ce sont de bons conducteurs thermiques et électriques

#### **.le meilleur est l'Argent**

- . Ils peuvent former des alliages entre eux
- . On utilise rarement ces métaux sous forme pure
- . Ils ont une vitesse d'oxydation modérée à l'air libre

On distingue deux familles parmi les métaux de transition :

- Les **métaux nobles**, dont l'énergie de première ionisation est inférieure à celle de l'hydrogène. Cela signifie qu'ils s'oxydent difficilement et se lient rarement à d'autres éléments. Ces éléments sont souvent rares, et donc chers (ex : or, argent, platine ...).

- Les **métaux non-nobles**, leur énergie de première ionisation est inférieure à celle de l'hydrogène. Ils s'oxydent à l'air libre plus facilement que les métaux nobles.

H												
Li	Be											
Na	Mg											
K	Ca	Sc	Tl	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pb	Ag	Cd	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	
Fr	Ra	Ac	Rf	Ha	106	107	108	109				

Figure III.2 La passerelle des métaux de transition (en violet)

## IV. Ferromagnétisme

### IV.1 Généralité et définition:

Les matériaux ferromagnétiques sont généralement de bons conducteurs et représentent les matériaux de base de l'électrotechnique industrielle (aimants, machines...).

On retrouve notamment des aimants permanents utilisés dans les machines à courant continu, des corps simples (Fer, Cobalt, Nickel), des corps composés (Ferrites ( $MOFe_2O_3$ ),  $CrO_2$ ) et des alliages (alnico (aluminium, nickel, cobalt)).

Les électrons dans la matière restent alors orientés dans le même sens que l'aimant les a mis, même quand on retire l'aimant. On parle alors **de ferromagnétisme**.

Ces matériaux possèdent des moments magnétiques permanents tous orientés dans le même sens ce qui leur confère une susceptibilité  $\chi$  très grande.

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \Rightarrow \chi = \mathbf{M} / \mathbf{H}$$

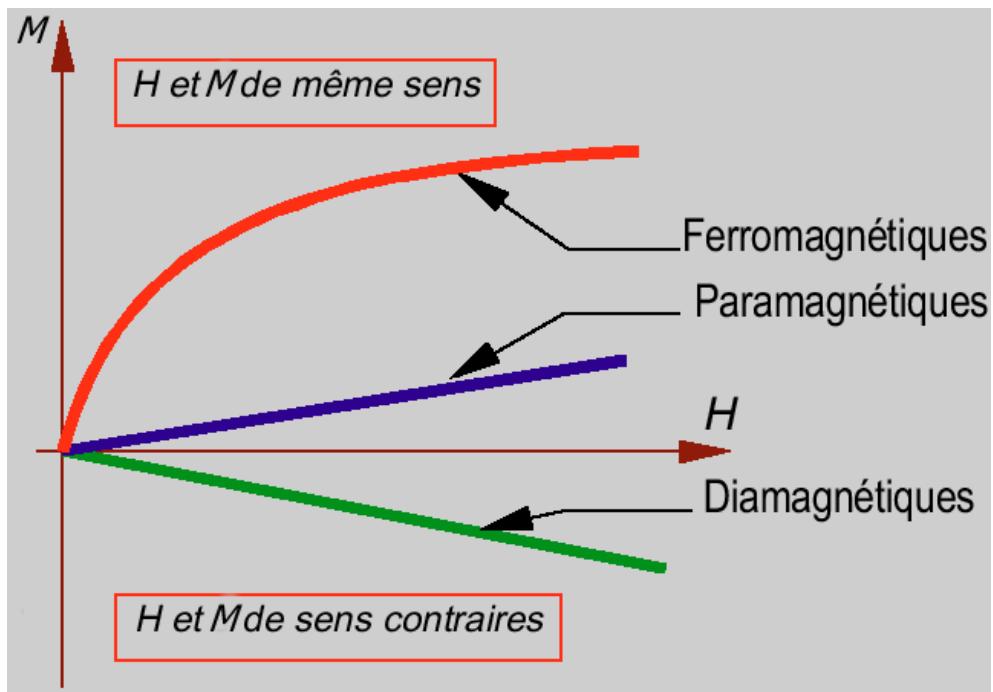


figure IV.1: Illustration des comportements magnétiques

## IV.2 Classification des matériaux ferromagnétiques

On sépare les matériaux magnétiques en deux familles qui se distinguent par leur courbe  $B=f(H)$ .

## IV.3 Matériaux durs

Les matériaux durs sont des matériaux qui présentent une forte aimantation rémanente et difficile à annuler ( $H_C$  est grand). Ils sont utilisés pour faire des aimants permanents (ex : acier). Ce sont des matériaux qui présentent un cycle d'hystérésis très large ( $104 \text{ A/m} < H_C < 106 \text{ A/m}$ ). Ils sont utilisés en général comme aimant.

**Excitation coercitive  $H_C$ :** Excitation  $H$  nécessaire pour annuler le champ rémanent  $B_r$ .

**Hystérésis:** C'est le dédoublement de la caractéristique  $B(H)$  du matériau magnétique. *Donc  $B$  dépend non seulement de  $H$ , mais aussi de l'aimantation antérieure.* Les substances ferromagnétiques sont donc douées de mémoire

### Exemples d'alliages utilisés pour les aimants.

#### **Ferrite (oxyde de fer)      Samarium-Cobalt (Sm-Co)**

Saturation à  $B_{sat} \square 0,6$  T      Saturation à  $B_{sat} \square 1$  T  
 $B \square 0,4$  T ;  $H \square 200$  kA/m       $B \square 0,8$  T ;  $H \square 500$  kA/m

## II.2 Matériaux doux

Les matériaux doux sont des matériaux qui possèdent une aimantation rémanente facile à annuler ( $H_C$  est petit). A l'opposé des matériaux durs, un matériau doux présente un cycle d'hystérésis très petit voir inexistant ( $1.10^{-2}$  A/m  $< H_C < 100$  A/m).

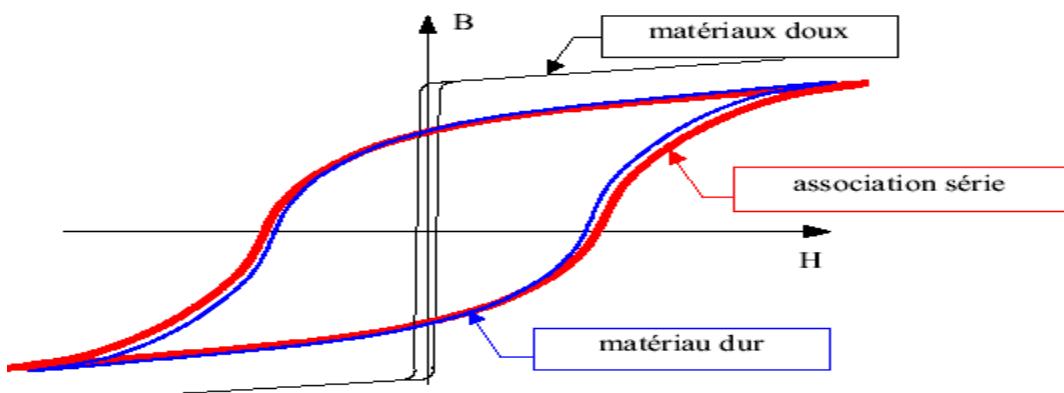
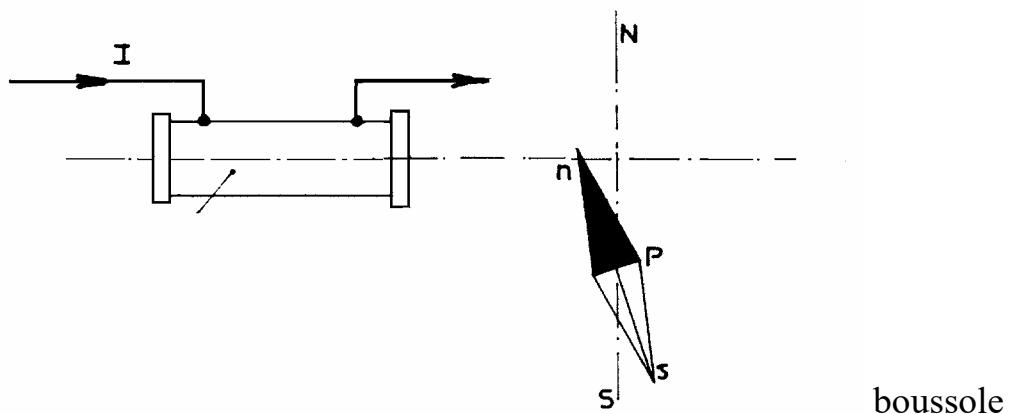


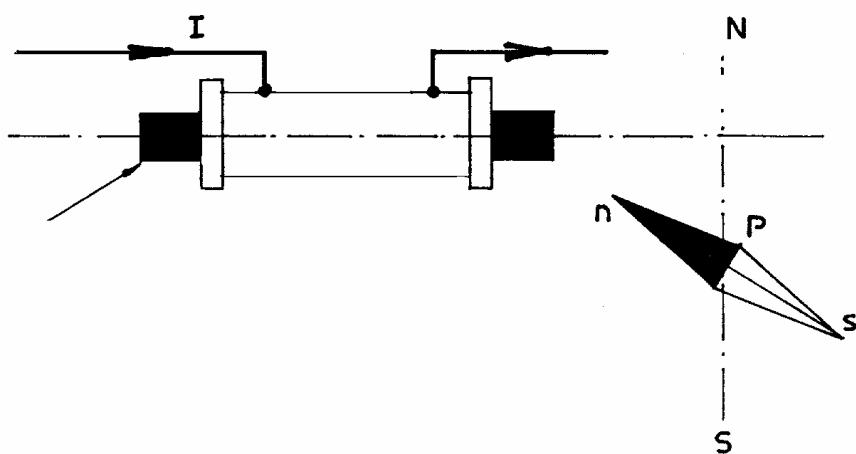
Figure IV : Deux types de matériaux ferromagnétiques

## Expérience

Si nous plaçons une boussole à proximité d'un solénoïde parcouru par un courant  $I$ , celle-ci dévie d'un certain angle.



Introduisons un noyau de fer dans la bobine. On constate que la déviation de l'aiguille est beaucoup plus grande.



La présence d'un morceau de fer dans le champ magnétique a **renforcé** considérablement l'induction.

Cette propriété du fer, appelée **ferromagnétisme**.

### **Exercice**

Au centre d'une bobine longue (solénoïde), une induction  $B_0 = 5 \text{ mT}$ . On y introduit un barreau de fer dont la perméabilité  $\mu_r = 5000$ .

Calculer la nouvelle induction  $B$  à l'intérieur de la bobine.

### **Exercice**

En observant la courbe d'aimantation de l'acier doux, calculer sa perméabilité relative  $\mu_r$  pour  $H < 500 \text{ A/m}$  et pour  $H = 5 \, 000 \text{ A/m}$ .

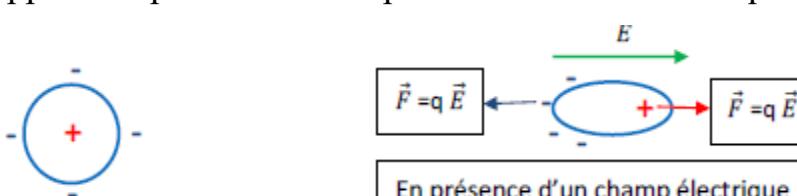
## Partie II: Matériaux diélectriques

### I.1 Définition:

Un diélectrique est un isolant, comme l'air, le mica, la céramique, la cellophane, le plastique, l'huile, etc. Un milieu est **diélectrique** s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Le milieu ne peut donc pas conduire le courant électrique, et est souvent un **isolant électrique**.

Dans un tel corps, les électrons sont très fortement liés aux atomes et il n'existe pratiquement pas d'électrons libres; c'est donc un très mauvais conducteur de l'électricité. Sa conductivité  $\sigma$  est faible, et sa résistivité  $\rho = 1/\sigma$  est comprise entre  $10^{17}$  et  $10^{19}$  Ohms-mètre.

L'apparition d'un champ électrique au sein du diélectrique provoque une déformation des molécules. Dans chacune d'elle, le barycentre des charges positives et celui des charges négatives s'écartent en même temps que la molécule s'oriente, car des forces de sens contraires s'exercent sur les charges (+) et (-). On appelle ce phénomène la "polarisation du diélectrique".



Pas de champ électrique externe :

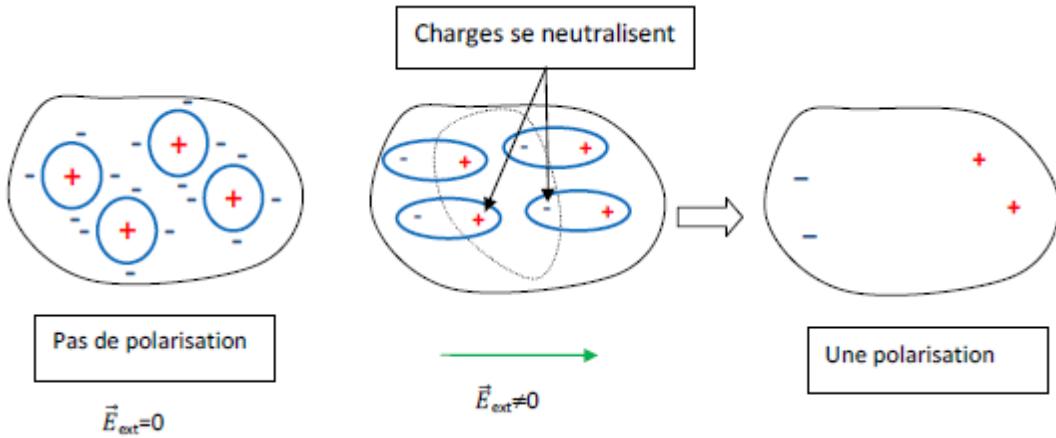
Les barycentres des charges + et - se coïncident  $\mathbf{G}_+ \equiv \mathbf{G}_-$

En présence d'un champ électrique externe les charges vont subir des forces électriques  $\vec{F} = q \vec{E}$  qui vont déplacer les barycentres des charges positives et négatives d'où  $\mathbf{G}_+ \neq \mathbf{G}_-$

Soit  $\vec{a}$  la distance entre  $\mathbf{G}_+$  et  $\mathbf{G}_-$

On a donc apparition d'un dipôle électrique caractérisé par un moment dipolaire :  $\vec{p} = q\vec{a}$

Examinons un ensemble d'atomes ou de molécules dans un diélectrique (électriquement neutre) en l'absence puis en présence d'un champ électrique  $\vec{E}$



La polarisation est proportionnelle au champ qui l'a créée. Elle est notée  $\vec{P}$  et est définie comme le moment dipolaire par unité de volume :

$$\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{dv}$$

## I.2 La constante diélectrique:

On désigne par  $\varepsilon_r$  une caractéristique de l'isolant appelée sa "permittivité relative" qui égale  $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ ,  $\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 C^2}$

$\varepsilon$ : Permittivité absolue (est une grandeur physique qui mesure la capacité d'un matériau à se polariser sous l'influence d'un champ électrique).

$\varepsilon_0$ : Permittivité du vide ( $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ )

$\varepsilon_r = 1$  pour l'air

Pour tous les autres isolants:  $\varepsilon_r > 1$ .

Compris entre 2.6 et 8 pour le mica.

Compris entre 3 et 10 pour le verre, et voisin de 10000 pour certaines céramiques à base d'oxyde de titane.

De plus après la suppression du champ électrique, la polarisation ne disparaît pas totalement à cause du phénomène d'hystérisis diélectrique; une partie de l'énergie créée par le champ électrique est ainsi perdue dans le diélectrique.

Cependant, un diélectrique ne peut pas subir des champs électriques d'intensité trop importante car, à partir d'une certaine valeur, des électrons, provenant des molécules composant le diélectrique, sont arrachés et sont libres de se déplacer.

### **I.3 Importance des matériaux diélectriques:**

Les matériaux diélectriques sont essentiels car ils servent d'isolants électriques pour empêcher le courant de fuir et protéger contre les chocs et les courts-circuits. Ils sont également cruciaux pour stocker l'énergie électrique, notamment dans les condensateurs, et pour optimiser la transmission des signaux dans les circuits électronique et les télécommunications. En résumé, leur importance réside dans leur capacité à isoler, stocker et réguler les champs électriques.

#### **\* Isolation et sécurité:**

- Ils empêchent les courants électriques de s'échapper des câbles, réduisant ainsi les risques de courts-circuits et d'incendies.
- Ils protègent les personnes des chocs électriques en isolant les conducteurs.

#### **\* Stockage d'énergie:**

- Ils sont un composant fondamental des condensateurs.
- L'ajout d'un diélectrique dans un condensateur augmente sa capacité de stockage de charge.

#### **\* Optimisation des circuits et des signaux:**

- Ils jouent un rôle clé dans la conception des circuits imprimés et des capteurs.

- Ils sont utilisés dans les télécommunications pour améliorer la transmission des données et miniaturiser les composants.
- Ils aident à réduire les interfaces dans les circuits électriques.

#### **I.4 Autres applications importantes:**

- Ils sont utilisés dans des dispositifs optiques et des équipements spécialisés.
- Certains diélectriques non linéaires, comme les ferroélectriques, sont utilisés pour des applications avancées comme les mémoires électroniques, l'optique non linéaire où la détection de vibrations.

#### **I.5 Les équation de Maxwell:**

Les équations de Maxwell sont quatre équations fondamentales qui unifient l'électricité, le magnétisme et la lumière, décrivant comment les champs électriques et magnétiques interagissent entre eux et avec les charges et les courants électriques.

##### **I.5.1 Loi de Gauss pour l'électricité:**

Ce qu'elle dit: les charges électriques sont les sources du champ électrique.

Explication: le flux du champ électrique à travers une surface fermée est directement proportionnel à la charge électrique totale contenue à l'intérieur de cette charge.

$$* \text{Formule: } \text{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

### I.5.2 Loi de Gauss pour le magnétisme:

Ce qu'elle dit: il n'existe pas de monopoles magnétiques.

Explication: les lignes de champ magnétique ne commencent pas et ne terminent pas, elles forment des boucles fermées, ce qui signifie que le flux magnétique à travers n'importe quelle surface fermée est toujours nul.

Formule:  $\text{div}(\vec{B}) = 0$

### I.5.3 Loi de Faraday-Maxwell:

Ce qu'elle dit: un champ magnétique variable au cours du temps induit un champ électrique.

Explication: c'est le principe de l'induction électromagnétique. C'est grâce à cette loi qu'un courant peut être généré dans une bobine (par exemple, dans une alternateur).

Formule:  $\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

### I.5.4 Loi de d'Ampère-Maxwell:

Ce qu'elle dit: un champ magnétique est généré par les courants électriques par un champ par un champ électrique variable.

Explication: Maxwell a ajouté le "courant de déplacement" à la loi d'Ampère. ce terme représente l'effet du champ électrique variable (comme dans un condensateur en charge) qui crée un champ magnétique, même en l'absence de courant de conduction.

Formule:  $\text{rot}(\vec{B}) = \mu_0(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t})$

## I.6 L'aspect microscopique et macroscopique d'un diélectrique:

Un diélectrique est un matériau isolant qui se polarise sous l'effet d'un champ électrique appliqué. À l'échelle macroscopique, il se manifeste par une réduction du champ électrique interne et l'apparition de charges de polarisation ; à l'échelle microscopique, cela résulte du déplacement ou de l'orientation des charges liées au sein des atomes ou molécules.

### a- Aspect macroscopique:

Le diélectrique développe une polarisation volumique, définie comme le moment dipolaire par unité de volume, qui est une grandeur moyenne lissée sur une échelle mésoscopique (quelques nanomètres). Cette polarisation génère des charges de polarisation surfaciques ( $\sigma_p = \vec{P} \cdot \vec{n}$ ) et volumiques ( $\rho_p = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P}$ ), équivalentes à une distribution de charges liées. Le champ macroscopique  $\vec{E}$  se rapporte au vecteur de déplacement  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \vec{E}$  où  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  est la permittivité et  $\epsilon_r = 1 + \chi_e$  la permittivité relative, avec  $\chi_e$  la susceptibilité électrique.

### b- Aspect microscopique:

À l'échelle atomique ou moléculaire, un champ électrique extérieur  $\vec{E}$  induit un moment dipolaire élémentaire  $\vec{P} = \alpha \vec{E}_{loc}$  sur chaque entité, où  $\alpha$  est la polarisabilité et  $\vec{E}_{loc}$  le champ local (différent de macroscopique en raison des champs dépolarisants des dipôles voisins). Le champ local s'obtient souvent par la méthode de la sphère imaginaire dans un diélectrique linéaire isotrope homogène (LHI):  $\vec{E}_{loc} = \vec{E} + \frac{\vec{P}}{3\epsilon_0}$  (modèle de Lorentz). La polarisation

macroscopique résulte de la moyenne spatiale de ces dipôles microscopiques :

$$\bar{P} = N\langle \vec{p} \rangle, \text{ où } N \text{ est la densité d'entités.}$$

### **Pour résumer:**

- Le diélectrique est un isolant avec des charges très liées (atomes, molécules) fixes.
- Sous champ électrique, ces charges subissent des déplacements microscopiques opposés, formant des dipôles.
- Cette polarisation microscopique crée la réponse diélectrique macroscopique du matériau.
- Le nuage électronique autour des noyaux atomiques peut se déformer localement ce qui donne naissance aux dipôles électriques élémentaires internes.

Ce modèle microscopique explique pourquoi un diélectrique peut augmenter la capacité d'un condensateur en atténuant le champ électrique interne par la polarisation induite.