

Leçon 2 : Champ magnétique

ANOUMOUYÉ Edmond Serge @ UVCi 2017

Table des matières



I - Objectifs	3
II - Les sources de champ magnétique	4
1. Les aimants	4
1.1. La boussole et les pôles (magnétiques) d'un aimant	4
1.2. Action magnétique entre deux aimants	4
2. Le courant électrique	5
3. Exercice	6
III - Les forces magnétiques	8
1. Le produit vectoriel	8
2. La force de Laplace	8
3. La force de Lorentz	9
4. Lien entre Force de Laplace et Force de Lorentz	10
5. Exercice	12
IV - Le vecteur champ magnétique	14
1. Direction et sens du vecteur champ magnétique	14
2. Mesure du champ magnétique : La balance de Cotton	14
3. Mesure du champ magnétique : L'effet Hall	16
4. Exercice	17
V - Solutions des exercices	20
VI - Glossaire	25



Objectifs

- *Connaître* les sources de champ magnétique
- *Connaître* les deux types de forces magnétiques : *force de Laplace* et *force de Lorentz*
- *Connaître* les méthodes de mesure de l'*intensité* du champ magnétique et *comprendre* ce qu'est l'*effet Hall*.

Les sources de champ magnétique



Objectifs

Connaître les sources de champ magnétique

1. Les aimants

Les premières observations concernant les phénomènes de magnétisme remontent à l'antiquité. Des corps naturels tel que la *magnétite* (ou oxyde de fer Fe_3O_4) ont la propriété d'*attirer* des morceaux de fer. Ce sont les aimants naturels.

Remarque

Les quelques substances attirées par l'*aimant* sont dites « magnétiques ». On trouve principalement le *fer*, le *cobalt*, le *nickel* et certains de leurs composés et alliages. Convenablement traités, ces corps magnétiques peuvent donner naissance à des aimants artificiels.

1.1. La boussole et les pôles (magnétiques) d'un aimant

Les Chinois ont été les premiers à constater qu'une fine aiguille aimantée suspendue par un fil, loin de tout aimant, prenait toujours une direction fixe : la direction Sud-Nord des pôles géographiques. Cette aiguille aimantée libre de s'orienter constitue la boussole.

Les deux extrémités de l'aiguille ne jouent pas un rôle identique puisque c'est toujours la même pointe qui se dirige soit vers le pôle Nord soit vers le pôle Sud. De là vient la définition des deux pôles d'un aimant. L'extrémité de l'aimant se dirigeant vers le nord est appelée le pôle nord de l'aimant, l'autre le pôle sud. Pour le différencier du sud il est très souvent peint en rouge.



Boussole : aiguille aimantée libre de s'orienter

Figure 1 : Illustration des pôles d'un aimant

1.2. Action magnétique entre deux aimants

Si on approche deux aiguilles aimantées libres de s'orienter on constate que :

- Deux pôles de même nature se repoussent
- Deux pôles de nature différente s'attirent

Cette propriété permet de déterminer les pôles d'un aimant quelconque : il suffit d'approcher une boussole vers une des extrémités de l'aimant et d'observer quel pôle est attiré. Le pôle inconnu de l'aimant sera alors de nature différente.

Il est possible aussi d'utiliser de la limaille de fer (petit grain léger de fer) qui va s'orienter avec le champ magnétique.

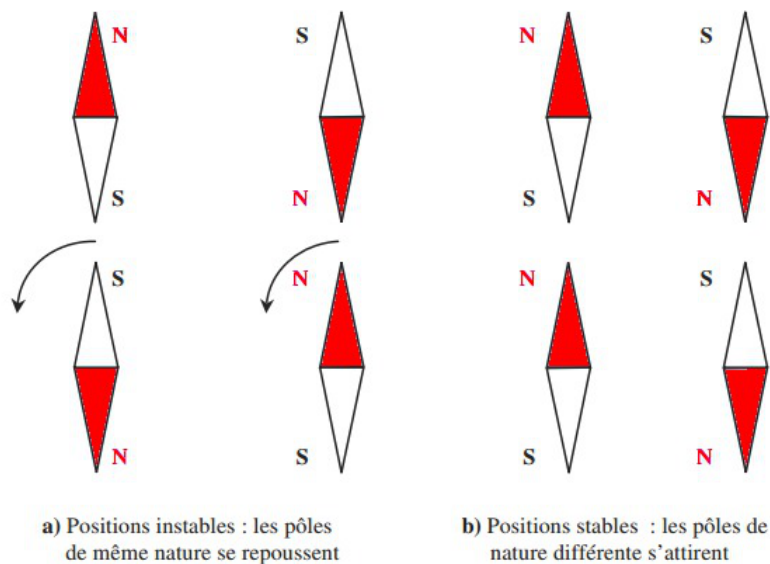


Figure 2 : Illustration des actions magnétiques entre deux aimants

Remarque

Les limailles sont attirées indifféremment par les pôles nord ou sud d'un aimant. Contrairement à l'aiguille aimantée de la boussole, elles s'orientent dans le champ magnétique sans préciser son sens.

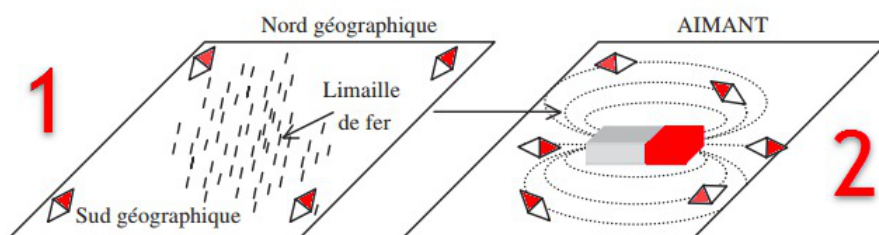


Figure 3 : Visualisation du champ magnétique avec de la limaille de fer et des petites boussoles

1. La limaille a une distribution aléatoire. Les boussoles indiquent le Nord géographique
2. La limaille prend une direction privilégiée : celle du champ magnétique créé par l'aimant. Les boussoles indiquent le sens du champ.

2. Le courant électrique

En 1819, au cours d'une expérience sur le courant électrique, le physicien *Ørsted* constate par hasard la déviation d'une boussole placée près d'un fil parcouru par un courant électrique. Cette découverte importante sera à l'origine de nombreux travaux sur le magnétisme.

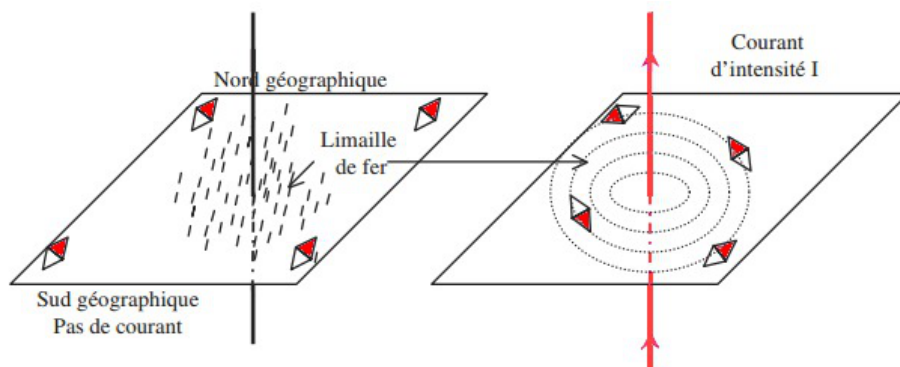


Figure 4 : Expérience d'Ørsted (1819) : le courant électrique est source de champ magnétique.

Fondamental

Des charges électriques en mouvement (ou courant électrique) sont sources d'un champ magnétique.

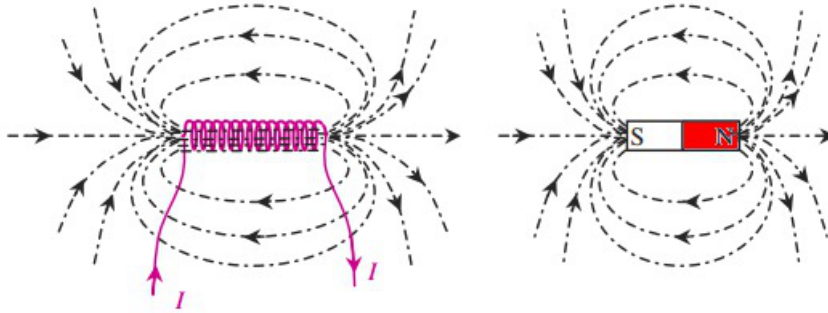


Figure 5 : Champ magnétique créé par une bobine parcourue par un courant I et par un aimant

Complément : Origine du champ magnétique créé par la matière

L'interprétation du champ magnétique créé par des aimants a pu se faire dès que la nature de la matière a été connue. En effet, la matière est formée d'un empilement d'atomes constitués d'un noyau autour duquel gravitent des électrons. Un modèle simple consiste à considérer alors chaque atome comme une petite boucle de courant créant un champ magnétique élémentaire. Le champ magnétique macroscopique est obtenu en faisant la somme de tous les champs magnétiques élémentaires.

Dans un aimant, les boucles élémentaires de courant donnent naissance à un champ magnétique macroscopique non nul. Dans une substance magnétique, les boucles de courant ont la possibilité de s'orienter dans le matériau sous l'action d'un champ magnétique extérieur et de donner à son tour un champ magnétique macroscopique non nul.

Remarque

Une charge électrique est source de champ électrique. Si elle est en mouvement elle sera aussi source de champ magnétique. La vitesse d'une charge étant relative à un référentiel, le champ magnétique dépendra du référentiel dans lequel s'effectue l'observation.

3. Exercice

[Solution n°1 p 20]

Exercice

Le champ magnétique est créé par

- ☐ des charges fixes
- ☐ des dipôles électrostatiques
- ☐ des charges en mouvement

Exercice

Quel est le corps naturel de formule moléculaire Fe_3O_4 qui possède la propriété d'attirer des morceaux de fer ?

Exercice

Les premières pierres d'aimant furent trouvées en

- ☐ Côte d'Ivoire
- ☐ Grèce
- ☐ Chine
- ☐ Turquie

Exercice

Qui utilisa en premier les aimants pour en faire des boussoles ?

- ☐ les grecques
- ☐ les turcs
- ☐ les chinois
- ☐ les ivoiriens
- ☐ Je ne sais pas

Exercice

Les premières expériences d'interaction entre un fil parcouru par un courant électrique et un aimant furent menées par :

- ☐ Biot et Savart
- ☐ Ampère
- ☐ Ørsted
- ☐ Isaac Newton

Exercice

Cocher les assertions qui sont vraies.

- ☐ La boussole est un instrument qui permet de mesurer la force du vent.
- ☐ L'aiguille aimantée des boussoles indiquent toujours l'Est
- ☐ Les aimants prennent toujours la direction Sud-Nord des pôles géographiques.
- ☐ Les pôles Nord de deux aimants mis face à face s'attirent

Exercice

Cocher les assertions qui sont vraies.

- ☐ Les lignes de champ d'une bobine parcourue par un courant sont semblables à celles d'un aimant.
- ☐ L'aiguille aimantée d'une boussole n'indique pas le sens du champ magnétique
- ☐ Le fer, le cobalt, le nickel et certains de leurs composés et alliages sont attirés par l'aimant
- ☐ Les diélectriques (plastique, paraffine, ...) ne sont pas attirés par un aimant.

Les forces magnétiques

Objectifs

Connaître les deux types de forces magnétiques : *force de Laplace* et *force de Lorentz*

La mesure d'un champ passe par la mesure des effets qu'il produit. Par exemple, on peut citer :

★ le *champ électrique* \vec{E} défini à partir de la force électrostatique exercée par le champ sur une charge électrique q (loi de Coulomb) : $\vec{F} = q\vec{E}$

★ le *champ de pesanteur* \vec{g} défini à partir de la force exercée par la Terre sur une masse m : $\vec{P} = m\vec{g}$.

Les études effectuées à la suite de l'expérience d'*Ersted* ont permis de définir à la fois les forces magnétiques et le champ magnétique.

L'unité du champ magnétique est le tesla (symbole T). Elle peut s'exprimer en fonctions d'autres unités du système international. Par exemple : $1T = 1V.m^{-2}.s$

1. Le produit vectoriel

Le produit vectoriel est une opération entre deux vecteurs et le résultat est aussi un vecteur.

★ Notation : $\vec{v}_1 \wedge \vec{v}_2 = \vec{v}_3$

$(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3)$ forme un trièdre direct comme $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$. Le sens de \vec{v}_3 est donné par la règle des *trois doigts de la main droite* ou du *tire bouchon* (on tourne \vec{v}_1 vers \vec{v}_2 et le tire bouchon va vers \vec{v}_3).

★ Norme du vecteur résultant :

$$\|\vec{v}_1 \wedge \vec{v}_2\| = \|\vec{v}_3\| = v_3 = v_1 v_2 \sin(\alpha) \text{ avec } \alpha = \widehat{(\vec{v}_1, \vec{v}_2)}$$

C'est l'aire du parallélogramme défini par \vec{v}_1 et \vec{v}_2

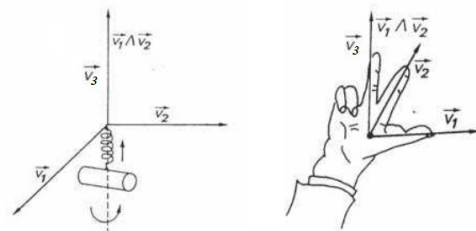


Figure 6 : Règle du tire bouchon ou des trois doigts de la main droite

Remarque

- Pour deux vecteurs perpendiculaires on a : $\mathbf{v}_3 = \mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2$
- Pour deux vecteurs colinéaires on a : $\vec{v}_1 \wedge \lambda \vec{v}_1 = \vec{0}$, $\lambda \vec{v}_1 \wedge \mu \vec{v}_2 = \lambda \mu (\vec{v}_1 \wedge \vec{v}_2) = \mu \vec{v}_1 \wedge \lambda \vec{v}_2$
- $(\vec{v}_1 \wedge \vec{v}_2) = -(\vec{v}_2 \wedge \vec{v}_1)$: les normes sont les mêmes mais les sens sont opposés
- $\vec{u}_x \wedge \vec{u}_y = \vec{u}_z$, $\vec{u}_y \wedge \vec{u}_z = \vec{u}_x$, $\vec{u}_z \wedge \vec{u}_x = \vec{u}_y$
- Le produit vectoriel de 2 vecteurs de base pris dans l'ordre $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z, \vec{u}_x, \vec{u}_y, \dots)$ donne le 3^e. Si l'ordre n'est pas respecté on obtient l'opposé du troisième vecteur. Ex : $\vec{u}_z \wedge \vec{u}_y = -\vec{u}_x$

2. La force de Laplace

Définition

C'est la force exercée par un champ magnétique sur un conducteur parcouru par un courant.

Fondamental : Force de Laplace élémentaire

La force de Laplace élémentaire $d\vec{F}_L$ qui agit sur une portion élémentaire d'un fil conducteur orienté $d\vec{l}$ parcouru par un courant d'intensité algébrique I et placé dans un champ magnétique \vec{B} , s'écrit :

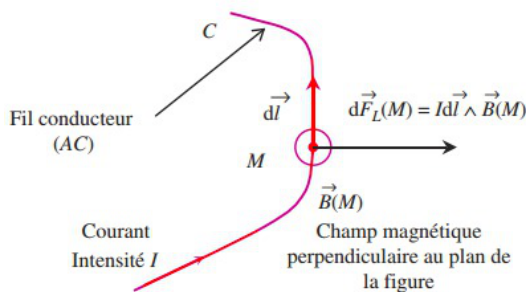
$$d\vec{F}_L = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$$


Figure 7 : Force de Laplace élémentaire

- L'intensité I est une grandeur algébrique : elle est positive si le courant circule dans le sens positif choisi pour le conducteur.
- Le changement du sens du courant ou du champ magnétique change le sens de la force.
- La force de Laplace est perpendiculaire au plan défini par le conducteur (élément de courant $I d\vec{l}$) et le champ magnétique \vec{B} .
- L'ensemble $(I d\vec{l}, \vec{B}, d\vec{F}_L)$ forme un trièdre direct comme $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$.
- La règle des trois doigts de la main droite permet de retrouver le sens et la direction de cette force.

Fondamental : Force de Laplace résultante

La force de Laplace résultante appliquée sur un conducteur (AC) s'obtient en additionnant toutes les forces élémentaires. Il s'agit d'intégrer la force élémentaire sur la longueur du conducteur (Figure 7) :

$$\vec{F}_L = \int_A^C d\vec{F}_L = \int_A^C (I d\vec{l} \wedge \vec{B})$$

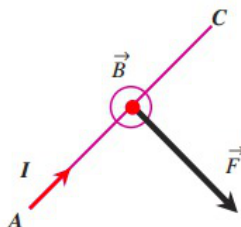


Figure 8 : Force de Laplace résultante

Remarque

Dans le cas où le champ magnétique est uniforme on obtient :

$$\vec{F}_L = \int_A^C (I d\vec{l} \wedge \vec{B}) = I \left(\int_A^C d\vec{l} \right) \wedge \vec{B} = I \vec{AC} \wedge \vec{B} \Rightarrow \|\vec{F}_L\| = I \times AC \times B \times \sin(\widehat{AC, B})$$

Si le champ \vec{B} est uniforme et perpendiculaire au fil rectiligne de longueur L (Figure 7) alors on a :

$$\vec{F}_L = I \vec{AC} \wedge \vec{B} \Rightarrow \|\vec{F}_L\| = F_L = I \times L \times B$$

Cette force est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique \vec{B} .

3. La force de Lorentz

Définition

La force de Lorentz, ou force électromagnétique, est la force subie par une particule chargée dans un champ électromagnétique.

Fondamental : Particule chargée sous l'influence d'un champ magnétique

Une particule de charge électrique q qui se déplace à la vitesse \vec{v} dans un référentiel dont le champ magnétique vaut \vec{B} subit une force magnétique appelée force de Lorentz \vec{f}_m donnée par :

$$\vec{f}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

- ★ \vec{f}_m est perpendiculaire au plan formé par les vecteurs vitesse \vec{v} et champ magnétique \vec{B} .
 - ★ Son sens et sa direction sont déterminés par la règle des trois doigts de la main droite.
 - ★ Changer le signe de la charge q , le sens de la vitesse \vec{v} ou de \vec{B} change le sens de la force \vec{f}_m .
 - ★ \vec{f}_m ne travaille pas car elle est toujours perpendiculaire à la vitesse \vec{v} donc au déplacement.
- $$\delta W = \vec{f}_m \cdot d\vec{l} = \vec{f}_m \cdot \vec{v} dt = q(\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v} dt = 0$$

Attention : Ne pas confondre force de Lorentz et force de Laplace

La force de Lorentz \vec{f}_m se manifeste à l'échelle microscopique car cette force agit sur des particules. La force de Laplace \vec{F}_L agit à l'échelle des conducteurs c'est-à-dire à notre échelle macroscopique.

Remarque : Particule chargée sous l'influence d'un champ électromagnétique

Si la particule de charge q et de vitesse \vec{v} est soumise à la fois aux champs magnétique \vec{B} et électrique \vec{E} alors la force de Lorentz s'écrit : $\vec{f} = \vec{f}_e + \vec{f}_m = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$

4. Lien entre Force de Laplace et Force de Lorentz

On veut déterminer l'action d'un champ magnétique $\vec{B}(M)$ sur un élément d'un conducteur filiforme en M , de longueur dl , de section droite ds et parcouru par un courant I . Les charges mobiles à l'origine du courant électrique dans l'élément de conducteur (les électrons de conduction), subissent :

- l'action du champ magnétique qui dévie leur trajectoire : $\sum \vec{f}_{m_i}$ correspond à la somme des forces de Lorentz exercées sur ces charges
- l'action des constituants fixes de la matière qui les retiennent dans le conducteur : $d\vec{F}'$ correspond à leur résultante.

En régime permanent les actions exercées sur les charges mobiles se compensent (voir effet Hall) :

$$\sum \vec{f}_{m_i} + d\vec{F}' = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \sum \vec{f}_{m_i} = -d\vec{F}'$$

D'après le principe des actions réciproques, la résultante $d\vec{F}$ des forces qu'exercent les charges mobiles sur les constituants fixes de la matière correspond à : $d\vec{F} = -d\vec{F}'$

La structure du conducteur subit donc une force de Laplace élémentaire égale à la somme des forces de Lorentz appliquées sur les charges mobiles se déplaçant avec la vitesse d'ensemble \vec{v}_e . On a :

$$\sum \vec{f}_{m_i} = \sum q_i \vec{v}_e \wedge \vec{B} = \delta Q \vec{v}_e \wedge \vec{B}$$

où δQ correspond à la charge totale des porteurs mobiles qui se trouvent dans l'élément de conducteur. Avec q la valeur de la charge mobile, n la densité volumique des charges mobiles et dV le volume de l'élément de conducteur, on a : $\delta Q = nq dV = nq ds dl$.

Le mouvement d'ensemble des charges mobiles se fait suivant la longueur dl du conducteur filiforme :

$$\vec{v}_e dl = v_e d\vec{l} \quad \Rightarrow \quad \delta Q \vec{v}_e = nq ds dl \vec{v}_e = nq ds d\vec{l} v_e = nq v_e ds d\vec{l}$$

L'intensité I du courant s'écrit $I = j ds = nq v_e ds$ (voir complément). Finalement, la résultante des forces de Lorentz a pour expression :

$$\sum \vec{f}_{m_i} = \delta Q \vec{v}_e \wedge \vec{B} = nq v_e ds d\vec{l} \wedge \vec{B} = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

Remarque

La force élémentaire de Laplace $d\vec{F}_L$ agissant sur un élément de conducteur filiforme dl parcouru par un courant I et placé dans un champ magnétique $\vec{B}(M)$ a pour expression :

$$d\vec{F}_L(M) = Id\vec{l}(M) \wedge \vec{B}(M)$$

Complément : Densité de courant et intensité

Un courant électrique correspond à un déplacement de charges électriques élémentaires : dans un conducteur métallique ces charges sont les électrons de conduction. L'intensité d'un courant est liée au débit ou flux des charges mobiles. Dans un conducteur, les charges mobiles q , de densité volumique n , se déplacent à la vitesse \vec{v} .

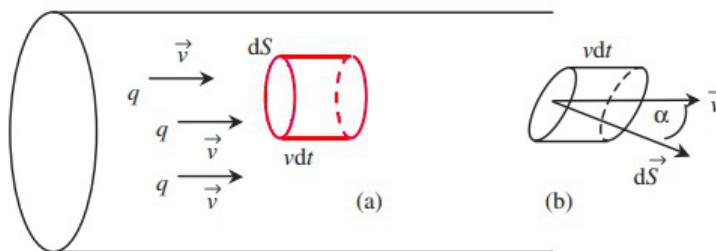


Figure 12 : Flux de charges mobile à travers une surface

Fondamental : Densité de courant

La densité de courant j correspond à la quantité de charges qui traversent par unité de temps une section droite de surface unité (flux de charges par unité de temps et de surface).

Si dQ est la charge élémentaire qui traverse pendant la durée dt une section élémentaire de surface dS perpendiculaire au déplacement des charges mobiles (Figure 11 (a)) on a par définition :

$$j = \frac{dQ}{dS dt}$$

dQ est aussi la charge d'un volume élémentaire dV de section dS et de longueur vdt . On a donc : $dQ = nq dV = nq dS v dt \Rightarrow j = nqv$

Le vecteur densité de courant dont le sens dépend du signe de la charge q se définit par : $\vec{j} = nq\vec{v}$

Dans le cas général (Figure 11 (b)) où la surface dS n'est pas perpendiculaire au déplacement des charges, le volume dV peut s'écrire : $dV = \cos(\alpha)dS v dt = d\vec{S} \cdot \vec{v} dt$

La charges $\frac{dQ}{dt}$ qui traverse par unité de temps la surface dS s'écrit alors :

$$\frac{dQ}{dt} = nq \frac{dV}{dt} = nq \vec{v} \cdot d\vec{S} = \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

Fondamental : Intensité I

L'intensité I du courant parcourant un conducteur est égale à la charge électrique qui traverse sa section S par unité de temps ou au flux du vecteur densité de courant à travers cette surface :

$$I = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

Si le vecteur densité de courant est uniforme sur toute la section droite du conducteur alors on aura :

$$I = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \iint_S j dS = jS$$

L'intensité I s'exprime en ampère (A) et la densité de courant en ampère par mètre carré ($A.m^{-2}$)

5. Exercice

[Solution n°2 p 21]

Exercice

Le produit vectoriel

- ☐ est une opération entre valeurs réelles et le résultat est aussi un réel.
- ☐ est une opération entre deux vecteurs et le résultat est aussi un vecteur.
- ☐ de deux vecteurs colinéaires est égale à 0
- ☐ de deux vecteurs \vec{v}_1 et \vec{v}_2 colinéaires vérifie ces égalités vectorielles

$$\vec{v}_1 \wedge \lambda \vec{v}_1 = \vec{0}, \quad \lambda \vec{v}_1 \wedge \mu \vec{v}_2 = \lambda \mu (\vec{v}_1 \wedge \vec{v}_2) = \mu \vec{v}_1 \wedge \lambda \vec{v}_2$$

Exercice

Cocher les forces qui sont dues à un champ magnétique

- ☐ Le poids $\vec{P} = m\vec{g}$
- ☐ La force de Laplace \vec{F}_L
- ☐ La force électrostatique $\vec{f}_E = q\vec{E} = -e\vec{E}$ applique à une charge $q = -e$ immobile
- ☐ La force de Lorentz $\vec{f}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$

Exercice

Une charge électrique au repos dans un champ magnétique

- ☐ se déplace vers les sources du champ magnétique
- ☐ s'éloigne des sources du champ magnétique
- ☐ reste au repos
- ☐ Aucune des réponses

Exercice

Une charge électrique se déplaçant dans un champ magnétique

- ☐ conserve la norme de sa vitesse
- ☐ accélère
- ☐ ralentit
- ☐ Aucune des réponses

Exercice

L'unité du champ magnétique est le

- ☐ Newton (N)
- ☐ Tesla (T)
- ☐ Coulomb (C)
- ☐ Tesla (V.s.m^{-2})

Exercice

La direction des forces magnétiques est

- ☐ perpendiculaire au plan contenant le vecteur champ magnétique
- ☐ parallèle au plan contenant le vecteur champ magnétique
- ☐ quelconque
- ☐ je ne sais pas

Exercise

Le sens des forces magnétiques est donné par la règle

- ☐ des *trois doigts de la main gauche* ou du *tire-bouchon*
- ☐ des *trois doigts de la main droite*
- ☐ du *tire-bouchon*
- ☐ des *deux doigts du pied droit* ou du *tire-bouchon*

Exercice

Une tige conductrice de longueur $L = 10 \text{ cm}$, parcourue par un courant d'intensité $I = 2\text{A}$, fait un angle de $= 30^\circ$ avec la direction d'un champ magnétique uniforme de valeur $B = 150\text{mT}$. La valeur de la force de Laplace qui s'applique sur la tige est :

- ☐ 15 N
- ☐ 0,015 N
- ☐ 1.5 N
- ☐ Aucune des réponses proposées

Exercice

Un ion He^{2+} , de vitesse de 10^7 m.s^{-1} pénètre dans une région où règne un champ magnétique uniforme d'intensité $B=1,3\text{T}$ de direction perpendiculaire à sa vitesse. L'intensité de la force de Lorentz s'exerçant sur cet ion est :

- ☐ $1,4 \cdot 10^{-12} \text{ N}$
☐ $4,4 \cdot 10^{-10} \text{ N}$
☐ $4,16 \cdot 10^{-12} \text{ N}$
☐ Aucune des réponses proposées

Le vecteur champ magnétique



Objectifs

Connaître les méthodes de mesure de l'intensité du champ magnétique et comprendre ce qu'est l'effet Hall.

La détermination des forces magnétiques va permettre de déterminer le vecteur champ magnétique.

1. Direction et sens du vecteur champ magnétique

Fondamental

La direction et le sens du champ magnétique $\vec{B}(M)$ en un point M de l'espace sont ceux de l'orientation (Sud-Nord) qu'indique une petite boussole placée en ce point.

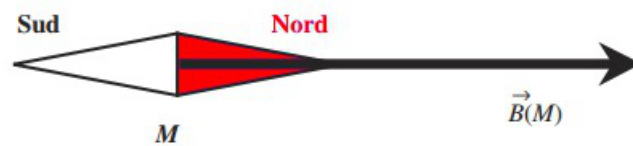


Figure 9 : Boussole indiquant le sens et la direction du champ magnétique en un point M

Quant aux lignes de champ magnétique, elles partent du pôle nord d'un aimant vers son pôle sud.

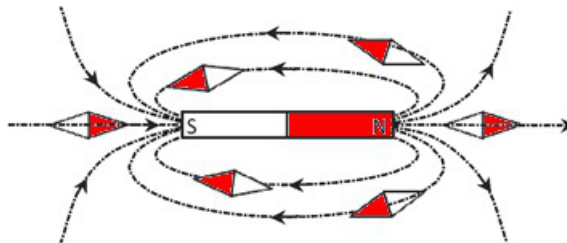


Figure 10 : Direction et sens des lignes de champ magnétique

2. Mesure du champ magnétique : La balance de Cotton

La mesure de l'intensité d'un champ magnétique peut se faire à partir de la force de Laplace exercée par ce champ sur une portion de fil conducteur parcourue par un courant d'intensité I . La balance de Cotton fonctionne sur ce principe.

L'un des bras de la balance qui a la forme d'un fléau, est entouré d'un fil conducteur dans lequel on fait circuler un courant électrique I (Figure 11). Les portions de conducteur (ab) et (cd) sont des arcs de cercles centrés sur l'axe O de la balance et la partie (bc) est un segment de longueur L qui est horizontal quand la balance est équilibrée.

Le champ magnétique B à mesurer, considéré localement uniforme et perpendiculaire au fléau, exerce alors des forces de Laplace ($\vec{F}_L, \vec{f}_{cc'}, \vec{f}_{bb'}$) sur les différentes parties du conducteur.

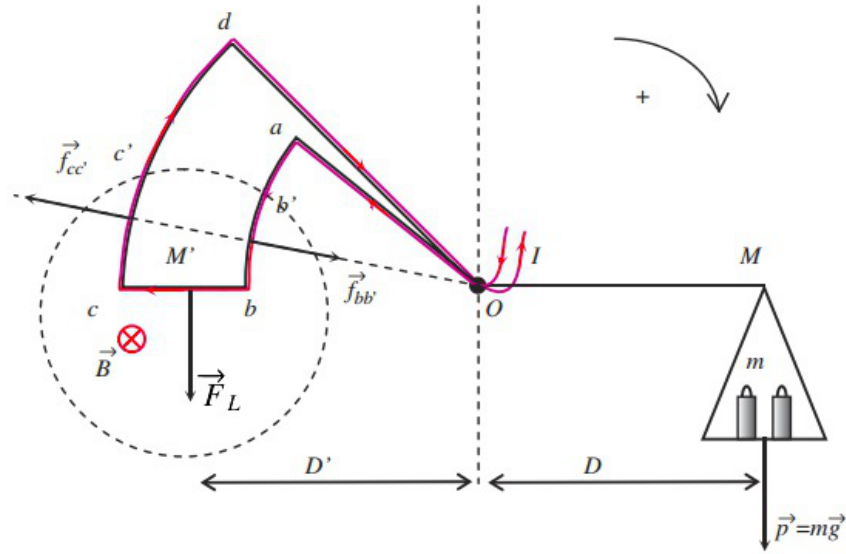


Figure 11 : Schéma de principe de la balance de Cotton

Les forces de Laplace élémentaires s'exerçant sur les arcs de cercles sont toutes perpendiculaires au fil. Ainsi leur ligne d'action coupe en O l'axe de la balance : les forces résultantes $\vec{f}_{cc'}$ et $\vec{f}_{bb'}$ ont donc un moment nul par rapport à l'axe et ne participent pas à la rotation des bras.

Sur le segment (bc) la force de Laplace résultante s'écrit :

$$\vec{F}_L = I \vec{bc} \wedge \vec{B} \Rightarrow \|\vec{F}_L\| = F_L = I.L.B$$

Cette force perpendiculaire au champ B et au conducteur (cb) est verticale à l'équilibre et appliquée au point M' milieu du segment. Le sens du courant est choisit en fonction du sens du champ magnétique pour que la force \vec{F}_L soit dirigée vers le bas. Son moment par rapport à l'axe s'écrit :

$$M_O(\vec{F}_L) = -F_L.OM' = -F_L.D'$$

Pour équilibrer la balance une masse totale m est placée sur le plateau de l'autre bras. Ainsi à l'équilibre, le moment du poids de cette masse s'écrit :

$$M_O(\vec{P}) = P.OM = mg.D$$

Ces deux forces sont les seules à avoir un moment non nul et à l'équilibre de la balance on a :

$$M_O(\vec{F}_L) + M_O(\vec{P}) = 0 \Rightarrow mg.D - F_L.D' = 0 \Rightarrow mg.D = I.L.B.D'$$

On en déduit la valeur du champ magnétique B :

$$B = \frac{m}{I} \times \frac{D}{LD'}$$

Le coefficient $\frac{D}{LD'}$ est fixé par construction et l'intensité I du courant est mesurée en plaçant un ampèremètre dans le circuit d'alimentation. On réalise ainsi une « pesée » du champ magnétique.

Remarque

Il est possible d'affiner l'équilibre de la balance en variant les masses marquées mais aussi en ajustant l'intensité I du courant à l'aide d'un rhéostat par exemple.

Attention

Cette méthode de mesure, pas très pratique et longue à mettre en place, n'est plus utilisée de nos jours et est présentée surtout pour son côté pédagogique.

3. Mesure du champ magnétique : L'effet Hall

Les appareils de mesure de champ magnétique couramment utilisés fonctionnent sur le principe de l'*effet Hall*. Ils permettent d'obtenir rapidement la valeur d'un champ magnétique en un point quelconque de l'espace sans manipulations compliquées.

L'effet Hall apparaît dans les métaux et les semi-conducteurs. Pour la suite, on considère un matériau conducteur métallique dans lequel il n'existe qu'un seul type de porteurs de charge mobiles sont les électrons. La densité volumique de porteurs est n et leur charge $q = -e$.

On considère une petite plaquette, ayant la forme d'un parallélépipède rectangle, de longueur a , grande devant la largeur b et dont l'épaisseur c est très faible devant b . Elle est traversée par un courant d'intensité I constante dont le vecteur densité de courant \vec{j} est dirigé selon la longueur a et est uniforme sur sa section $S = b.c$ (Figure 13). Le vecteur densité de courant s'écrit : $\vec{j} = nq\vec{v} = -ne\vec{v}$ avec e la valeur absolue de la charge d'un électron.

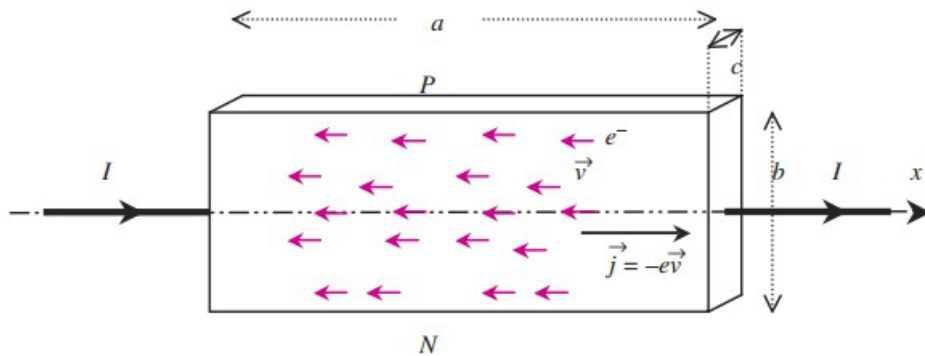


Figure 13 : Plaquette conductrice parcourue par un courant I utilisée comme sonde à effet Hall

Cette plaquette est placée dans un champ magnétique perpendiculairement à ses grandes faces (Figure 14). Les charges mobiles (les électrons dans ce cas) sont alors soumises à la force de Lorentz : $\vec{f} = q\vec{v} \wedge \vec{B} = -e\vec{v} \wedge \vec{B}$

Cette force fait dévier les électrons vers la face N (Figure 14 (a)) qui se charge progressivement grâce à un excès d'électrons pendant que la face P se retrouve avec un déficit en électrons.

Il apparaît alors un champ électrique E à l'intérieur du matériau (dirigé dans ce cas de P vers N) qui va exercer une force $\vec{f}_E = q\vec{E} = -e\vec{E}$ de sens opposé à la force de Lorentz (Figure 14 (a)). Au fur et à mesure que les électrons s'accumulent sur la face N , le champ électrique augmente ainsi que la force électrique. Ce régime transitoire s'estompe lorsque la force électrique compense la force de Lorentz : les électrons retrouvent alors leur trajectoire rectiligne, c'est le régime permanent.

Le champ électrique est appelé champ de Hall et est noté \vec{E}_H .

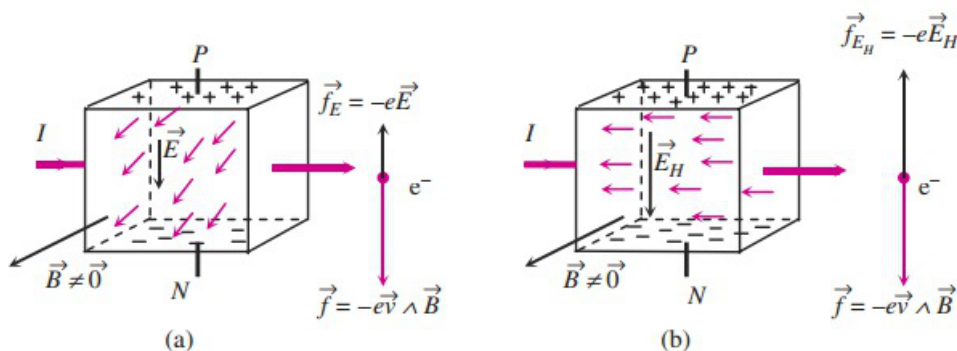


Figure 14 : L'effet Hall

- (a) Régime transitoire : la force de Lorentz dévie les électrons vers la face N
- (b) Régime permanent : la force électrique qui prend naissance dans le matériau s'oppose à la force de Lorentz ; les électrons ne sont plus déviés.

Pour le régime permanent on peut écrire :

$$\vec{f} + \vec{f}_H = \vec{0} \Rightarrow -e\vec{v} \wedge \vec{B} - e\vec{E}_H = \vec{0} \Rightarrow \vec{E}_H = -\vec{v} \wedge \vec{B}$$

L'intensité du champ de Hall correspond à : $E_H = vB$

Entre les faces P et N il y a une différence de potentiel appelée tension de Hall et qui s'exprime en fonction du champ par la relation intégrale :

$$U_H = V_P - V_N = \int_P^N \vec{E}_H \cdot d\vec{l} = \int_P^N E_H \cdot dl = E_H b = vBb$$

Le champ magnétique est donc relié à la tension de Hall qui apparaît entre les deux faces P et N et à la vitesse v des charges mobiles. Cette vitesse peut s'exprimer en fonction de l'intensité I du courant obtenue en exprimant le flux du vecteur densité de courant à travers une section $S = bc$ du conducteur. Le vecteur densité de courant étant uniforme, on a :

$$I = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \iint_S j dS = j \iint_S dS = jS = nevS$$

$$\text{La vitesse } v \text{ s'écrit alors : } v = \frac{I}{neS} = \frac{I}{ne \cdot bc} \Rightarrow \mathbf{U}_H = v\mathbf{B}b = \frac{\mathbf{I}}{ne \cdot bc} \times \mathbf{B}b = \frac{\mathbf{I}}{nec} \times \mathbf{B}$$

La tension de Hall est proportionnelle à l'intensité du courant traversant le matériau ainsi qu'au champ magnétique B dans lequel est plongée la plaquette. La constante de proportionnalité $K=1/nec$ dépend de la géométrie et de la nature du matériau.

La valeur du champ magnétique est donnée par la relation :

$$\mathbf{B} = nec \times \frac{\mathbf{U}_H}{\mathbf{I}}$$

Il suffit d'étalonner le système pour ensuite pouvoir déterminer le champ magnétique en fonction de la valeur de l'intensité I et de la tension de Hall mesurée. Les appareils de mesure de champ magnétique sont donc constitués d'une sonde (la plaquette) et d'un circuit électronique qui alimente la sonde et mesure la tension. Sur certains appareils, l'affichage indique directement la valeur du champ magnétique.

Remarque

La plaquette étant de petite dimension on peut mesurer pratiquement le champ magnétique en tout point de l'espace.

4. Exercice

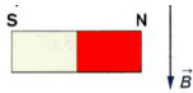
[Solution n°3 p 23]

Exercice

Les lignes de champ magnétique d'un aimant partent

- ☐ du pôle Sud vers son pôle Nord
- ☐ du pôle Nord vers son pôle Sud
- ☐ dans toutes les directions de l'espace
- ☐ je ne sais pas

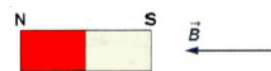
Exercice



Cocher les bonnes réponses

- ☐ Correct
- ☐ incorrect
- ☐ Le bon sens du champs est du pôle N vers le pôle S
- ☐ Le bon sens du champs est du pôle S vers le pôle N

Exercice



Cocher les bonnes réponses

- ☐ Correct
- ☐ incorrect
- ☐ Le bon sens du champs est du pôle N vers le pôle S
- ☐ Le bon sens du champs est du pôle S vers le pôle N

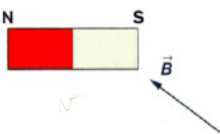
Exercice



Cocher les bonnes réponses

- ☐ Correct
- ☐ incorrect
- ☐ Le bon sens du champs est du pôle N vers le pôle S
- ☐ Le bon sens du champs est du pôle S vers le pôle N

Exercice



Cocher les bonnes réponses

- ☐ Correct
- ☐ incorrect
- ☐ Le bon sens du champs est du pôle N vers le pôle S
- ☐ Le bon sens du champs est du pôle S vers le pôle N

Exercice

La mesure du champ magnétique se fait en utilisant

- ☐ la balance de Cotton
- ☐ le manomètre
- ☐ le testementaire
- ☐ l'effet Hall

Exercice

La mesure du champ magnétique par la balance de Cotton

- ☐ est l'équivalent d'une « pesée » du champ magnétique.
- ☐ est très pratique et rapide à mettre en place
- ☐ n'est plus utilisée de nos jours
- ☐ est présentée surtout pour son côté pédagogique

Solutions des exercices



> Solution n°1

Exercice p. 6

Exercice

- ☐ des charges fixes
- ☐ des dipôles électrostatiques
- ☒ des charges en mouvement

Exercice

magnétite

Des corps naturels tel que la *magnétite* (ou oxyde de fer Fe_3O_4) ont la propriété d'*attirer* des morceaux de fer.

Exercice

- ☐ Côte d'Ivoire
- ☒ Grèce
- ☐ Chine
- ☐ Turquie

Exercice

- ☐ les grecques
- ☐ les turcs
- ☒ les chinois
- ☐ les ivoiriens
- ☐ Je ne sais pas

Exercice

- ☐ Biot et Savart
- ☐ Ampère
- ☒ Ørsted
- ☐ Isaac Newton



Exercice

- ☐ La boussole est un instrument qui permet de mesurer la force du vent.
- ☐ L'aiguille aimantée des boussoles indiquent toujours l'Est
- ☒ Les aimants prennent toujours la direction Sud-Nord des pôles géographiques.
- ☐ Les pôles Nord de deux aimants mis face à face s'attirent

Exercice

- ☒ Les lignes de champ d'une bobine parcourue par un courant sont semblables à celles d'un aimant.
- ☐ L'aiguille aimantée d'une boussole n'indique pas le sens du champ magnétique
- ☒ Le fer, le cobalt, le nickel et certains de leurs composés et alliages sont attirés par l'aimant
- ☒ Les diélectriques (plastique, paraffine, ...) ne sont pas attirés par un aimant.

> Solution n°2*Exercice p. 12***Exercice**

- ☐ est une opération entre valeurs réelles et le résultat est aussi un réel.
- ☒ est une opération entre deux vecteurs et le résultat est aussi un vecteur.
- ☒ de deux vecteurs colinéaires est égale à 0
- ☒ de deux vecteurs \vec{v}_1 et \vec{v}_2 colinéaires vérifie ces égalités vectorielles

$$\vec{v}_1 \wedge \lambda \vec{v}_1 = \vec{0}, \quad \lambda \vec{v}_1 \wedge \mu \vec{v}_2 = \lambda \mu (\vec{v}_1 \wedge \vec{v}_2) = \mu \vec{v}_1 \wedge \lambda \vec{v}_2$$

Exercice

- ☐ Le poids $\vec{P} = m\vec{g}$
- ☒ La force de Laplace \vec{F}_L
- ☐ La force électrostatique $\vec{f}_E = q\vec{E} = -e\vec{E}$ applique à une charge $q = -e$ immobile
- ☒ La force de Lorentz $\vec{f}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$

Exercice

- ☐ se déplace vers les sources du champ magnétique
- ☐ s'éloigne des sources du champ magnétique
- ☒ reste au repos
- ☐ Aucune des réponses

Exercice

- ☒ conserve la norme de sa vitesse

- ☐ accélère
- ☐ ralenti
- ☐ Aucune des réponses

Exercice

- ☐ Newton (N)
 - ☒ Tesla (T)
 - ☐ Coulomb (C)
 - ☒ Tesla ($V.s.m^{-2}$)
- $1\ T = 1\ V.s.m^{-2}$

Exercice

- ☒ perpendiculaire au plan contenant le vecteur champ magnétique
- ☐ parallèle au plan contenant le vecteur champ magnétique
- ☐ quelconque
- ☐ je ne sais pas

Exercice

- ☐ des *trois doigts de la main gauche* ou du *tire-bouchon*
- ☒ des *trois doigts de la main droite*
- ☒ du *tire-bouchon*
- ☐ des *deux doigts du pied droit* ou du *tire-bouchon*

Exercice

- ☐ 15 N
 - ☒ 0,015 N
- $$\vec{F}_L = I\vec{L} \wedge \vec{B} \Rightarrow \|\vec{F}_L\| = F_L = I.L.B \sin(\alpha) \Rightarrow F_L = 2 \times 0,1 \times 0,15 \times \sin(30) = 0,015N$$
- ☐ 1.5 N
 - ☐ Aucune des réponses proposées

Exercice

- ☐ $1,4.10^{-12}$ N
- ☐ $4,4.10^{-10}$ N



$$4,16.10^{-12} \text{ N}$$

$\vec{f}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ or $q = +2e$ et de plus \vec{v} et \vec{B} sont perpendiculaires

donc $\vec{f}_m = +2e\vec{v} \wedge \vec{B} \Rightarrow f_m = 2.e.v.B$

$$AN : f_m = 2 \times 1,6.10^{-19} \times 10^7 \times 1,3 = 4,16.10^{-12} \text{ N}$$



Aucune des réponses proposées

> Solution n°3

Exercice p. 17

Exercice



du pôle Sud vers son pôle Nord



du pôle Nord vers son pôle Sud



dans toutes les directions de l'espace



je ne sais pas

Exercice



Correct



incorrect



Le bon sens du champs est du pôle N vers le pôle S



Le bon sens du champs est du pôle S vers le pôle N

Exercice



Correct



incorrect



Le bon sens du champs est du pôle N vers le pôle S



Le bon sens du champs est du pôle S vers le pôle N

Exercice



Correct



incorrect



Le bon sens du champs est du pôle N vers le pôle S



Le bon sens du champs est du pôle S vers le pôle N

Exercice



Correct



incorrect



Le bon sens du champs est du pôle N vers le pôle S

- ☒ Le bon sens du champs est du pôle S vers le pôle N

Exercice

- ☒ la balance de Cotton
- ☐ le manomètre
- ☒ le testamentaire
- ☒ l'effet Hall

Exercice

- ☒ est l'équivalent d'une « *pesée* » du champ magnétique.
- ☐ est très pratique et rapide à mettre en place
- ☒ n'est plus utilisée de nos jours
- ☒ est présentée surtout pour son côté pédagogique

Glossaire



Boussole

La boussole est l'instrument qui permet de vérifier s'il existe un champ magnétique dans une région de l'espace.

Magnétite

La magnétite était une pierre provenant de la région de Magnésie en Grèce d'où l'origine des mots magnétique et magnétisme.