

CHAP II : ELECTROMAGNETISME

I-	La loi de gravitation de Newton (1642-1727).....	3
II-	Le champ de gravitation ou gravitationnel.....	3
III-	La loi de coulomb.....	4
IV-	Le champ électrique.....	5
1)	Définition.....	5
2)	Intensité du champ électrique.....	5
3)	Le champ électrique : une grandeur vectorielle.....	6
4)	Le champ électrique créé par une charge Q.....	6
a)	Cas d'une charge positive, Q+.....	6
b)	Cas d'une charge négative, Q-.....	6
5)	Le champ électrique créé par plusieurs charges Q.....	6
6)	Les lignes de champ électrique.....	7
a)	Définition :.....	7
b)	Lignes de champ pour deux charges opposées Q+ et Q-: dipôle.....	7
c)	Lignes de champ pour deux charges positives Q+.....	7
d)	Le principe du condensateur.....	8
V-	Exercices.....	8
VI-	Notion de potentiel électrique - Différence de potentiel.....	10
1)	Notion de potentiel.....	10
2)	Notion de potentiel électrique.....	11
3)	Champ électrique uniforme et travail de la force électrique.....	12
4)	Les surfaces équipotentielles.....	13
VII-	Exercices.....	14
VIII-	Le champ magnétique.....	14
1)	Aimants et pôles.....	14
2)	Les pôles.....	15
3)	Le champ magnétique et sa représentation.....	15
a)	Définition.....	15
b)	Expériences.....	16
c)	Le vecteur induction magnétique.....	17
d)	Exemples de spectres magnétiques (topographie d'un champ magnétique).....	17
IX-	Champ magnétique créé par un courant.....	18
1)	Cas d'un courant passant dans un fil rectiligne.....	18
a)	Expérience d'Oersted.....	18
b)	Intensité du vecteur induction magnétique \vec{B}	18
2)	Cas d'un courant passant dans un conducteur circulaire (une spire).....	19
a)	Détermination des pôles.....	19
b)	Intensité du vecteur induction magnétique \vec{B} au centre de la spire.....	19

3) Spectre magnétique au voisinage d'un solénoïde	20
a) Définition	20
b) Spectre magnétique	20
c) Intensité du vecteur induction magnétique au centre de la bobine	21
4) La perméabilité magnétique	22
5) Les équations de Maxwell (1831-1879)	22
6) Hypothèse d'Ampère (1775 - 1836).....	23
7) Applications.....	23
a) Introduction d'un noyau de fer dans une bobine	23
b) L'utilisation des électroaimants.....	24
c) La Navigation Magnétique des Animaux	24
X- Exercices.....	25

CHAP II : ELECTROMAGNETISME

I- La loi de gravitation de Newton (1642-1727)

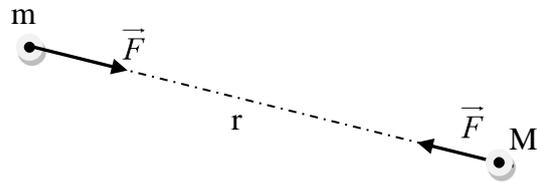
On rappelle que :

Deux corps ponctuels, c'est-à-dire de dimension petite par rapport à la distance qui les sépare, s'attirent l'un vers l'autre avec :

- des forces directement opposées
- des forces dirigées selon la droite qui les joint dont l'intensité commune est proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.

$$F = G \frac{M.m}{r^2}$$

($G = 6,67.10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$)



Pour tout corps à la surface de la terre : $F = G \frac{M.m}{r^2} \Rightarrow F = g.m$

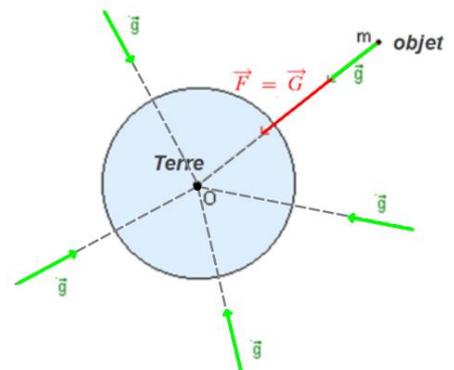
II- Le champ de gravitation ou gravitationnel

C'est un champ qui résulte de la présence de forces gravitationnelles, si une masse m est soumise à une force gravitationnelle F alors cette masse se situe en un point où règne un champ de gravitation noté g :

- Il a la même direction que la force de gravitation (orienté vers la masse qui le crée)
- Il a même sens que la force de gravitation
- Il est radial

$$\vec{g} = \frac{\vec{G}}{m} \quad \text{où:}$$

- g : est l'intensité du champ gravitationnel en newton par kilogramme (N.kg^{-1})
- G : est l'intensité de la force d'attraction en newton (N)
- m : est la masse de l'objet en kilogramme (kg)



Un champ gravitationnel est une région de l'espace dans laquelle la masse d'un objet est soumise à la force de gravitation.

Sur la terre, ce champ gravitationnel est aussi appelé **champ de pesanteur terrestre**.

III- La loi de coulomb

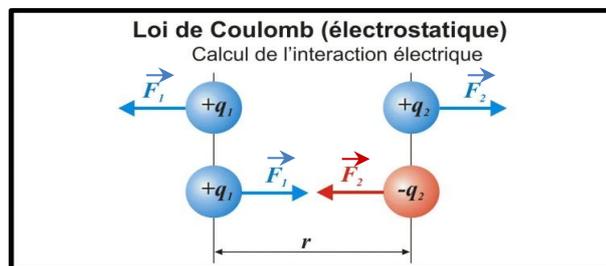
On sait déjà que deux charges de même signe se repoussent et deux charges de signes contraires s'attirent.

Il existe donc une force d'attraction ou de répulsion entre deux corps électrisés.

Les expériences réalisées par Coulomb vers 1785 montre que :

Deux charges électriques ponctuelles q_1 et q_2 exercent l'une sur l'autre une force \vec{F} dirigée suivant la droite qui les joint. Cette force est proportionnelle au produit des deux charges électriques en présence et inversement proportionnelle au carré de la distance r qui les sépare.

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$



- q_1 et q_2 sont appelées **quantités de charge électrique** et l'unité est le **Coulomb (C)**
- F est en Newton et r en mètres
- k dépend des unités utilisées. Dans le vide (ou dans l'air), lorsque $q_1 = q_2 = 1 \text{ C}$ et $r = 1 \text{ m}$, on trouve que : $F = k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \text{ (SI)}$

Remarques :

- On compare souvent la force électrique de Coulomb à la force d'attraction de Newton
- Lorsque $F = k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ cette force est équivalente au poids (= force) exercé par un 1 million de tonnes. Les forces gravitationnelles sont donc beaucoup plus faibles que les forces électriques entre deux particules.
- On appelle **e** la charge élémentaire portée par un électron (ou un proton)
 $e = \pm 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

La constante k :

- $k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$ ϵ : permittivité du milieu

- Dans le vide: $F = k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ (SI)}$

ϵ_0 : permittivité du vide

- Les tables donnent souvent la permittivité relative (ou constante diélectrique) ϵ_r d'un milieu.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des constantes diélectriques des milieux usuels.

Air sec	: 1,0006	¹	Naphtaline	: 2,5
Ambre	: 2,7		Nylon	: 3,5
Caoutchouc	: 2 à 3,5		Papier	: 1,6 à 2,5
Eau à 0° C	: 88		Paraffine	: 2,3
Eau à 20° C	: 80		Porcelaine	: 6 à 10
Ébonite	: 3		Pyrex	: 6,7
Glycérine	: 43		Quartz	: 4,3
Mica	: 2,5 à 7		Verre	: 7 à 8

$$\mathcal{E} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \frac{q_1q_2}{r^2}$$

IV- Le champ électrique

1) Définition

On vient de rappeler que toute masse placée au voisinage de la terre est soumise à l'action de la pesanteur terrestre. Cette masse se trouve dans le champ de pesanteur terrestre.

On peut définir par analogie un champ électrique puisqu'une charge électrique au voisinage d'une autre est soumise à une force (la force de coulomb).

Un champ électrique est une région de l'espace dans laquelle une charge électrique est soumise à une force électrique.

2) Intensité du champ électrique

On sait que l'intensité du champ gravitationnel, pour une masse m en présence d'une masse M est :

$$g = \frac{G}{m}$$

Par analogie on peut écrire que l'intensité du champ électrique \vec{E} pour une charge q en présence d'une charge Q est :

$$E = \frac{F}{q}$$

q : quantité de charge (positive ou négative) placée à une distance r d'une charge Q
 F : intensité de la force répulsive (ou attractive) qui s'applique sur la charge test q en présence de Q
 E : intensité du champ électrique unité N/C ou V/m

or $F = k \frac{q \cdot Q}{r^2} \Leftrightarrow E = \frac{F}{q} = k \frac{\cancel{q} \cdot Q}{r^2 \cancel{q}} = k \frac{Q}{r^2}$

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

E : intensité du champ électrique créé par une charge Q sur une charge test q_t située à une distance r de Q .

3) Le champ électrique : une grandeur vectorielle

- Tout comme \vec{F} (force) \vec{E} est une grandeur vectorielle puisque

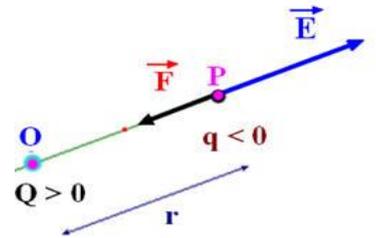
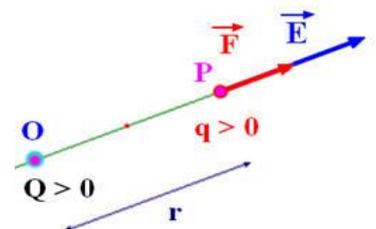
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Point d'application : la charge test placée en un point

Direction : la même que \vec{F}

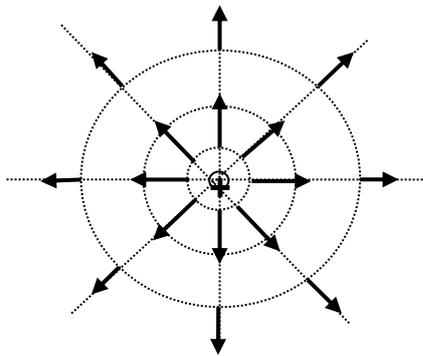
- \vec{E} { Sens: le même que \vec{F} si $q_t > 0$, de sens opposé à \vec{F} si $q_t < 0$

Intensité : $E = \frac{F}{q} = k \frac{Q}{r^2}$

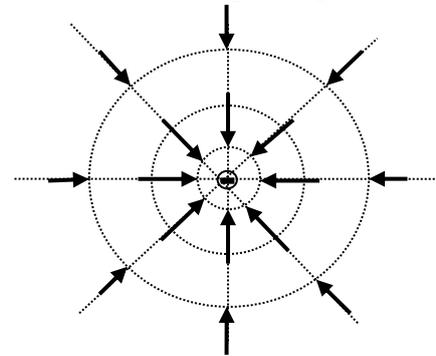


4) Le champ électrique créé par une charge Q

a) Cas d'une charge positive, Q+



b) Cas d'une charge négative, Q-



L'orientation du champ électrique créé par une charge Q est radiale, converge vers la charge lorsqu'elle est négative et diverge lorsqu'elle est positive.

Le champ \vec{E} aura même intensité pour chaque point situé à équidistance de la charge Q

5) Le champ électrique créé par plusieurs charges Q

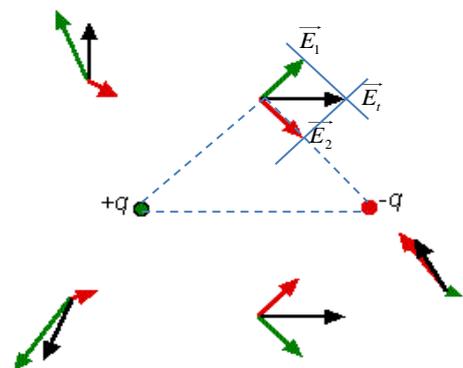
Le champ électrique créé en tout point de l'espace par plusieurs charges électriques ponctuelles occupant des positions fixes, est égal à la somme vectorielle des champs électriques créés en ce point par chacune des charges ponctuelles.

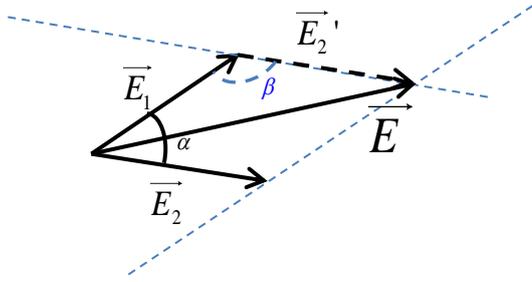
Rappel :

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 E_1 E_2 \cos \alpha$$

Attention: α : angle entre \vec{E}_1 et \vec{E}_2

Il s'agit de la formulation (Pythagore généralisé) pour calculer la norme (intensité) d'un vecteur qui serait la somme vectorielle de deux autres vecteurs.





En mathématique, on utilise souvent la formule:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 - 2 E_1 E_2 \cos \beta$$

avec β l'angle supplémentaire à α (voir schéma ci-contre)

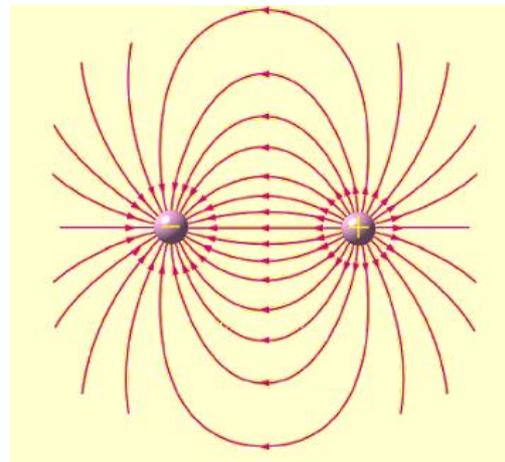
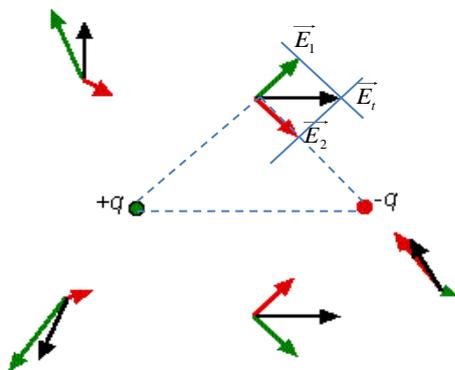
6) Les lignes de champ électrique

a) **Définition :**

Le vecteur champ électrique défini en un point est toujours tangent à la ligne de champ (en ce point). L'ensemble des lignes de champ est appelé spectre électrique.

- Par convention, le sens d'une ligne de champ est celui du vecteur champ électrique en chacun de ses points. Les lignes de champ partent donc toujours des corps chargés positivement pour aboutir vers les corps chargés négativement.
- Elles ne se croisent jamais

b) **Lignes de champ pour deux charges opposées $Q+$ et $Q-$: dipôle**

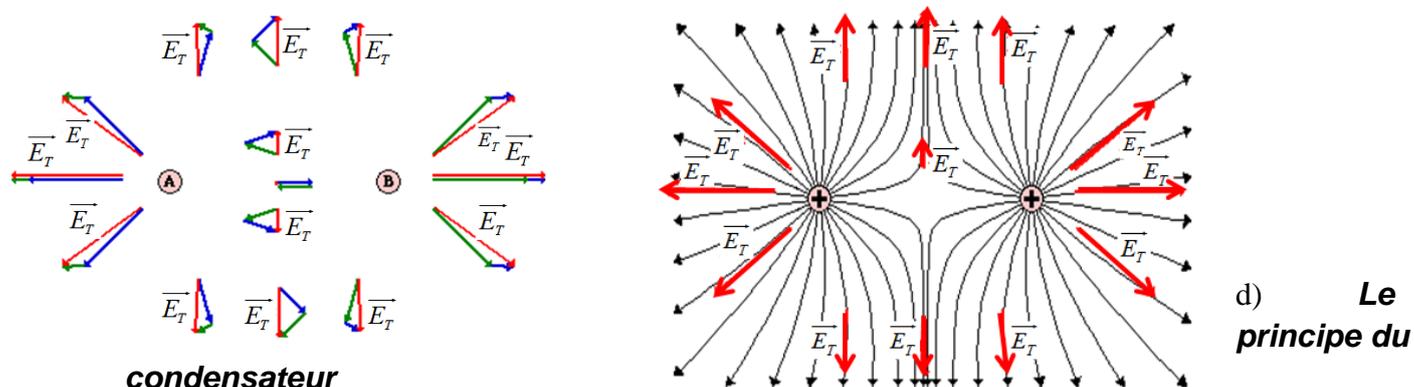


Le champ n'est jamais nul en un point proche des deux charges.

A des distances plus éloignées, les lignes de champ deviennent de plus en plus écartées et le champ diminue rapidement en intensité.

c) **Lignes de champ pour deux charges positives $Q+$**

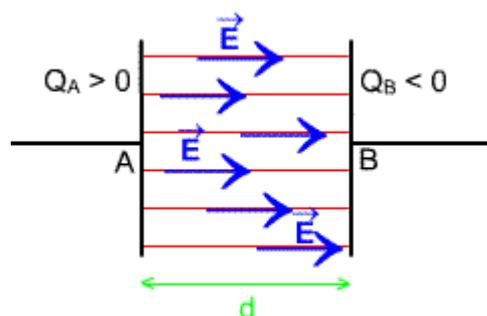
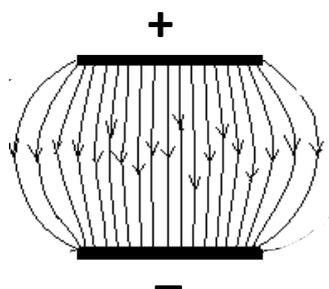
Le champ est nul au centre. Très loin des charges, il devient égal en intensité à celui d'une charge $+2Q$



Le condensateur est notamment composé de deux plaques conductrices parallèles portant des charges électriques de signes contraires. On remarque que:

- le champ électrique est uniforme entre les deux plaques; c'est-à-dire que l'intensité du champ est constante quelque soit l'endroit.
- La direction du champ est perpendiculaire aux plaques.
- Le sens du champ va de la plaque positive vers la plaque négative.

Les lignes de champ sont des droites parallèles entre elles et perpendiculaires aux plaques du condensateur.



V- Exercices

- 1) Deux sphères, l'une A est chargée positivement ($6 \cdot 10^{-7}$ C), l'autre B chargée négativement ($-4 \cdot 10^{-7}$ C) sont fixées sur un pied isolant. Sachant que ces deux sphères sont distantes de 20 cm, en quel endroit sur la ligne des centres des sphères doit-on placer une sphère C chargée positivement (10^{-7} C) pour que la sphère A reste immobile. ($R=10$ cm)
- 2) Deux sphères métalliques sont placées dans l'air à une distance de 5 cm ; elles se repoussent avec une force de 0,288 gf ($= 288 \cdot 10^{-5}$ N). Après avoir été amenées en contact, elles sont replacées à la même distance l'une de l'autre ; elles se repoussent alors avec une force de $3,24 \cdot 10^{-3}$ N. Calculer les charges des sphères métalliques avant le contact.
($R = (-4C, -2C) ; (4C, 2C) ; (-2C, -4C) ; (2C, 4C)$)

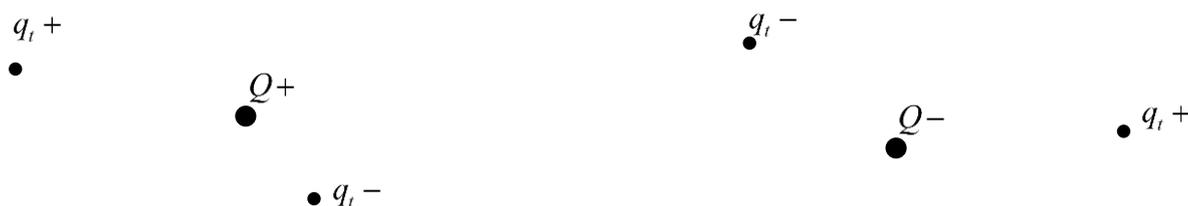
- 3) Deux charges de 10^{-9} C sont distantes de 8 cm. Trouver la grandeur et la direction de la force exercée par ces deux charges sur une troisième de $5 \cdot 10^{-11}$ C située à 5 cm de chacune des deux autres. (R= $2,16 \cdot 10^{-7}$ N)
- 4) Aux sommets A, B et C d'un triangle équilatéral de 10 cm de côté, on place respectivement des charges électriques ponctuelles de valeur 10^{-7} C, 10^{-7} C et -10^{-7} C.
 a) On demande de déterminer les forces résultantes sur chacune des charges.
 b) Calculer la valeur du champ électrique ressenti par la charge de -10^{-7} C.
- 5) Deux charges ponctuelles identiques, placées à 10 cm l'une de l'autre se repoussent avec des forces de $5 \cdot 10^{-5}$ N. De combien faut-il les rapprocher pour que les forces de répulsion soient de 10^{-4} N ? (R=3cm)
- 6) La petite sphère d'un pendule électrisé ayant une masse de 0,1 g, on demande l'intensité de la force électrique horizontale s'exerçant sur la sphère chargée quand le pendule dévie d'un angle de 17° . (R= $3 \cdot 10^{-4}$ N)
- 7) On approche progressivement un bâton d'ébonite électrisé de la petite sphère d'un pendule électrique de longueur 1 m. On immobilise le bâton quand le déplacement de la sphère atteint 10 cm, à partir de la position initiale pour laquelle le fil est vertical. On demande de calculer l'intensité de la force d'attraction s'exerçant sur la sphère. On admettra que cette force est horizontale. On donne la masse de la sphère : 0,5 g. (R= $5 \cdot 10^{-4}$ N)
- 8) Deux petites sphères identiques métallisées, ayant chacune une masse de 50 mg, sont suspendues au même point de support par des fils de soie de même longueur ($l = 50$ cm). Après électrisation par contact sur le même pôle d'une machine électrostatique, les deux sphères portant des charges égales s'écartent alors de 5 cm. On demande de calculer la valeur de ces charges en Coulomb. (R= $2,63 \cdot 10^{-9}$ N)
- 9) Comparer les forces d'interaction électrique et de gravitation entre un proton et un électron distant de 1 angström. Expliquer l'intérêt de cette comparaison. (R= $2,3 \cdot 10^{-8}$ N et $1,05 \cdot 10^{-47}$ N))

$$q \text{ (proton)} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad q \text{ (électron)} = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

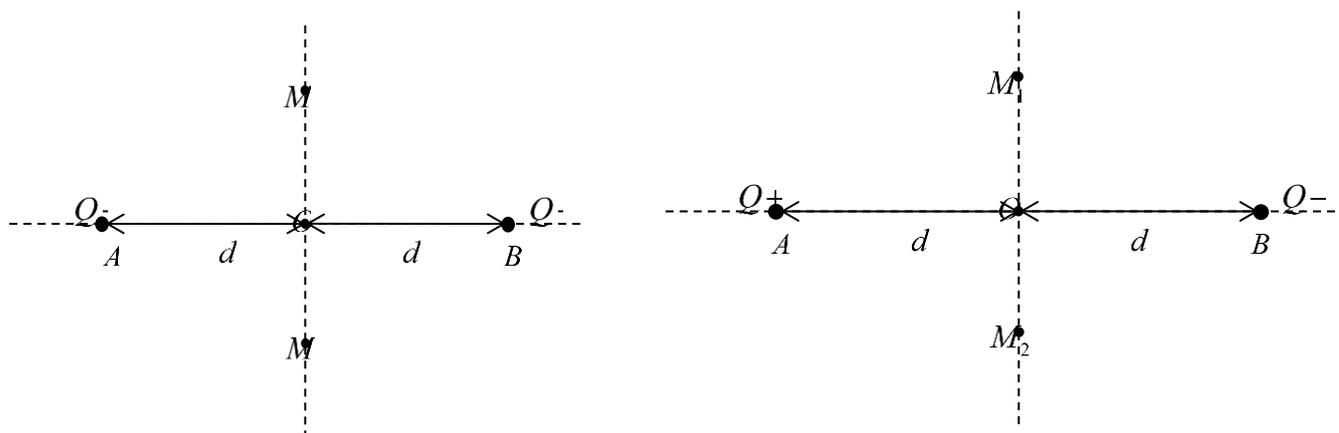
$$m \text{ (proton)} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad m \text{ (électron)} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Le champ électrique

- 10) a) Tracer le vecteur champ électrique créé par une charge Q (positive puis négative) sur une charge test $q_t +$ et $q_t -$
 b) Tracer le champ électrique total que subit la charge Q^+ ou Q^-



11) Tracer le vecteur champ électrique aux points O , M_1 , M_2 sur la médiatrice de AB dans les deux cas de figure. Trouver l'expression du champ total dans chaque cas.



12) Une charge q_1 de $16 \cdot 10^{-9}$ C est fixée à l'origine des coordonnées, une seconde q_2 est placée au point de coordonnée $(3,0)$ et une troisième q_3 de $12 \cdot 10^{-9}$ C est au point $(6,0)$. Quelle est la grandeur de la charge q_2 si le champ résultant au point $(8,0)$ est de $20,25$ N/C et dirigé vers la droite ?

13) Deux charges q_1 et q_2 de $12 \cdot 10^{-9}$ C et de $-12 \cdot 10^{-9}$ C sont placées respectivement à 10 cm l'une de l'autre.

a) Déterminer le champ électrique dû à la présence de ces charges aux points a et b , ceux-ci étant situés sur la ligne q_1q_2 respectivement à 4 cm de q_1 et de q_2 .

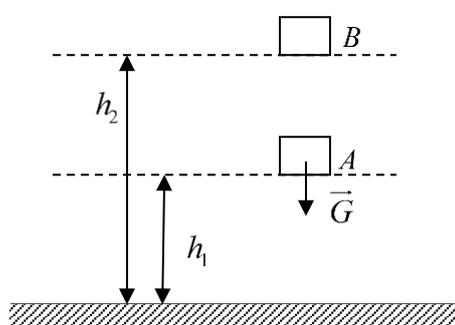
b) Calculer l'intensité en un point c distant de q_1 et de q_2 de 10 cm.

14) Si un électron est lancé avec une vitesse \vec{V}_0 dans un champ électrique constant \vec{E} de façon que \vec{E} soit perpendiculaire à \vec{V}_0 , trouver l'équation de la trajectoire.

VI- Notion de potentiel électrique - Différence de potentiel

1) Notion de potentiel

Lorsque l'on déplace un corps de poids $P = m \cdot g$ situé en A , à la hauteur h_1 au-dessus du sol, jusqu'en un point B situé à la hauteur h_2 , on a effectué un travail :



$$W = mg(h_2 - h_1) = m(g h_2 - g h_1)$$

Posons : $V_A = g h_1$ et $V_B = g h_2$

alors : $W = m(V_B - V_A)$

Les grandeurs V_A et V_B sont appelées **potentiel du champ de gravité respectivement au point A et B**.

$V_A - V_B$ est la **différence de potentiel (d.d.p.)** existant entre les points A et B.

Le corps possède un certain potentiel selon la hauteur à laquelle il se trouve.

Pour déplacer un corps d'un niveau A à un niveau B (différent de A), on doit effectuer un travail dont la valeur est égale au produit de la masse et de la *d.d.p.* entre A et B.

Ce travail est emmagasiné sous forme d'énergie potentielle et donc B possède un plus grand potentiel que A.

Dans le cas d'un champ gravifique, un corps passe **spontanément** d'un potentiel élevé à un potentiel plus faible.

- **Cas où le corps est au niveau du sol :** $h_1 = 0 \text{ m}$

Quelle est l'énergie potentielle que possède ce corps en un point P quelconque du champ de gravité ?

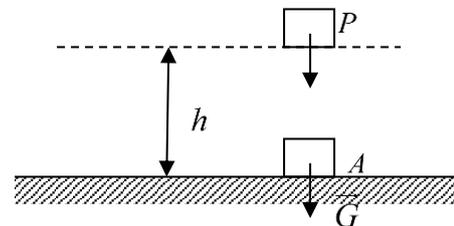
$h_1 = 0$ $V_A = g h_1 = 0$ et V_P : potentiel de P à une hauteur h

Pour soulever ce corps jusqu'au point P, à une hauteur h au-dessus du sol, il faut effectuer un

travail : $W = m.(V_P - \underbrace{V_A}_0) = m.V_P$

Au point P, ce corps possède l'énergie potentielle

suivante : $E_{pot} = m V_P$



2) Notion de potentiel électrique

Par analogie avec les lois de la gravitation, Poisson (1781-1840) a introduit l'existence de la notion de potentiel électrique dans un champ électrique.

En tout point d'un champ électrique, on peut définir un potentiel V tel que, pour déplacer une charge q d'un point A en un point B du champ, le travail à fournir soit :

$$W = q(V_B - V_A)$$

Le travail qui est nécessaire pour déplacer dans un champ électrique une charge q d'un point A en un point B du champ est donc égal au produit de la quantité de charge et de la d.d.p. entre les points considérés.

Cette différence de potentiel (**d.d.p.**) porte aussi le nom de **tension**.

$$\boxed{U_{AB} = (V_B - V_A) = \frac{W}{q}} \quad \text{d.d.p.} = \text{travail / quantité de charge } q$$

Par convention le potentiel du sol est considéré comme potentiel zéro. Lorsqu'une charge électrique q est portée d'un point où le potentiel est zéro en un point où le potentiel est V , le travail à fournir est donné par :

$$\boxed{E_{pot} = W = q \cdot V} \quad \text{ou} \quad \boxed{U = \frac{W}{q} (=V)}$$

Lorsque $q = +1$ $U = V = W$

Le potentiel en un point d'un champ électrique se mesure par l'énergie potentielle que possède une charge unitaire en ce point.

Unité du potentiel V : J / C ou le volt (V)

Remarques :

- On utilise le symbole V pour définir le potentiel d'un point dans un champ électrique et U pour une différence de potentiel entre deux points.

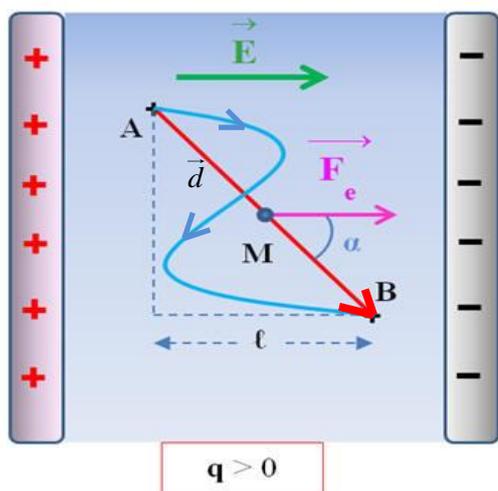
Lorsque le potentiel de départ est nul : $V_A = 0$ $U = V_B - \overbrace{V_A}^0 = V_B$

La différence de potentiel entre le point d'arrivée et celui de départ correspond au potentiel du point d'arrivée. Certains écrivent dès lors $W = qV$

- La variation d'énergie potentielle (ΔE_{pot}) et la variation de potentiel ($\Delta V = \text{d.d.p.}$) ne dépendent pas de la position du niveau de référence à partir duquel on mesure les énergies potentielles et les potentiels.
- L'électron-volt* est une unité d'énergie couramment utilisée en physique nucléaire et en physique des particules ; il s'agit de l'énergie acquise par un électron qui, partant du repos, a été accéléré sous une d.d.p. de 1 volt. $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

3) Champ électrique uniforme et travail de la force électrique

Quel est le travail de la force électrique au cours du déplacement d'une charge ponctuelle dans un champ électrique uniforme ?



Calculons le travail effectué par la force \vec{F}_e s'exerçant sur la charge $+q$, lorsqu'on déplace la charge d'un point A vers un point B en suivant un chemin quelconque.

$$W = \vec{F}_e \cdot \vec{d} = F_e \cdot d \cdot \cos \alpha \quad (\text{produit scalaire})$$

$$\text{or } F_e = q \cdot E \quad l = d \cos \alpha$$

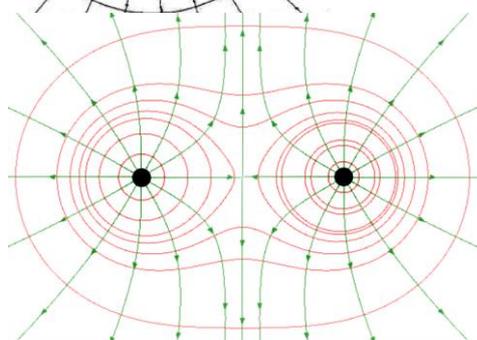
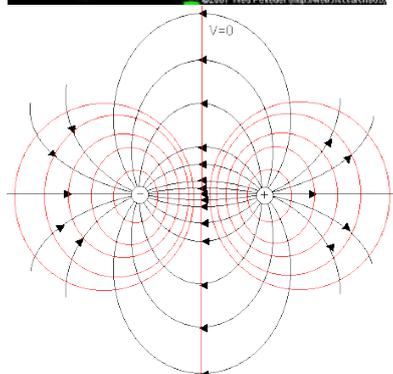
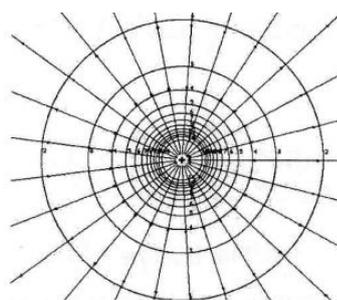
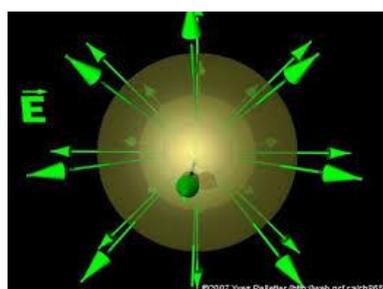
$$\text{donc } \boxed{W = q \cdot E \cdot l}$$

- Le travail ne dépend pas du chemin suivi entre les points A et B. Il ne dépend que de la distance l des plans passant par A et B.
- D'un point de vue général, lorsqu'une charge ponctuelle q passe d'un point A à un point B dans un champ électrique quelconque, le travail effectué par la force électrique ne dépend pas du chemin suivi entre A et B.

La d.d.p. entre A et B devient alors égale à: $\boxed{U = \frac{W_{AB}}{q}}$ (travail/charge)

4) Les surfaces équipotentielles

Les lignes qui relient les points de même champ électrique en intensité sont appelées **équipotentielles** et sont **orthogonales aux lignes de champ**.



Tous les points d'un champ ayant le même potentiel appartiennent à une surface appelée **surface équipotentielle**.

Les surfaces équipotentielles d'un conducteur sphérique chargé (par exemple une charge) sont des sphères concentriques.

Les lignes de champ sont toujours perpendiculaires à une surface équipotentielle.

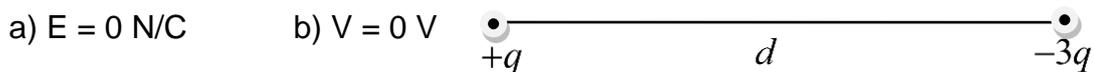
Les déplacements d'une charge q sur une surface équipotentielle ne nécessitent aucun travail. Dès lors, un électron qui tourne autour du noyau ne consomme pas d'énergie. S'il en était autrement, il finirait par tomber sur le noyau.

Exemple similaire pour le mouvement d'un satellite autour de la terre ; il ne consomme pas d'énergie.

VII- Exercices

- 1) Montrer que le V/m et le N/C sont des unités équivalentes.
- 2) Quelle est la vitesse d'un électron dont l'énergie cinétique est de 100 eV ? ($R=5,96 \cdot 10^6 \text{ m/s}$)
- 3) Entre deux plaques conductrices distantes de 0,2 cm, on établit une d.d.p. de 5000V. Calculer le travail et la force mis en jeu par le monde extérieur pour transporter de la plaque négative à la plaque positive une charge de 0,05 μC . ($R=1,25 \cdot 10^{-1} \text{ N}$)
- 4) Entre deux plaques parallèles, il y a une différence de potentielle de 4000 V. Le travail effectué par le champ pour déplacer un électron de 5 cm vers la plaque positive est de $3,2 \cdot 10^{-17} \text{ J}$. Exprimer cette énergie en électronvolt et en déduire la distance séparant les deux plaques, ainsi que la valeur du champ électrique. ($R=1 \text{ m}$; 4000 N/C)
- 5) Sous l'action d'un champ électrique E constant, un électron initialement au repos a acquis après 10 cm de déplacement une vitesse de $4/3 \cdot 10^7 \text{ m/s}$.
Déterminer la d.d.p., le champ électrique et l'accélération auxquels l'électron est soumis. ($R=500 \text{ V}$; 5000 N/C ; $8,89 \cdot 10^{14} \text{ m/s}^2$)

- 6) Déterminer dans la configuration ci-dessous, les points de l'axe où :



Masse de l'électron : $9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

VIII- Le champ magnétique

1) Aimants et pôles

Un aimant est un corps capable d'exercer une force attractive à distance sur le fer et ses dérivés, les corps **ferromagnétiques**. (Ex : Co, Ni, acier,)

Cette propriété attractive se trouve à l'état naturel dans la magnétite, un oxyde de fer (Fe_3O_4).

Ce minerai était connu dans l'Antiquité se trouvait notamment aux environs de la ville de Magnésie dans l'Asie Mineure (en Lydie, Turquie).

Les Grecs l'ont appelé *Pierre d'Héraklea* (Thalès de Milet) ou encore *Pierre lydienne* (Sophocle) avant de la désigner par *magnes* (Euripide-Platon).

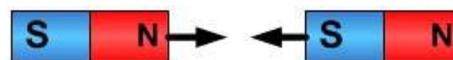
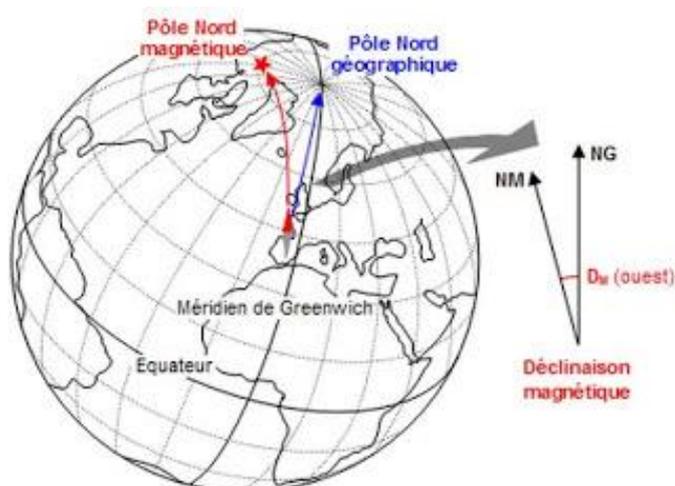
2) Les pôles

Si l'on veut ramasser de la limaille de fer avec un aimant, on s'aperçoit **que l'attraction se manifeste principalement au voisinage des extrémités appelées pôles de l'aimant.**



Un aimant usuel a deux pôles.

Lorsqu'on laisse une aiguille aimantée (boussole) se diriger librement, on remarque qu'elle se stabilise toujours suivant la même direction qui est approximativement la direction Sud-Nord géographique.



On



appellera par convention **Pôle Nord** de l'aiguille aimantée son extrémité pointant vers le nord, et **pôle Sud** l'autre extrémité

Deux pôles de même nom se repoussent et deux pôles de noms différents s'attirent.

Il est impossible d'isoler le pôle nord du pôle sud d'un aimant. Si on brise un aimant, on obtient 2 petits aimants comportant chacun un pôle sud et un pôle nord.

3) Le champ magnétique et sa représentation

On sait qu'une charge électrique modifie les propriétés de l'espace qui l'entoure en créant des forces électriques. On dit alors qu'il règne un champ électrique dans l'espace.

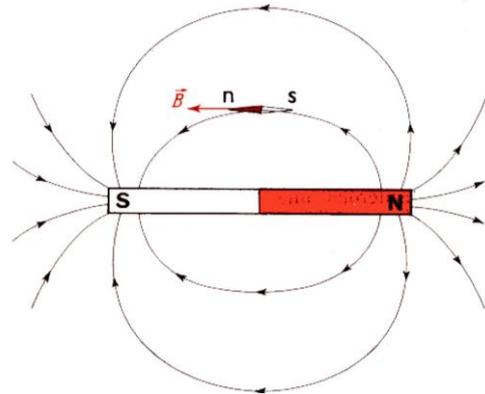
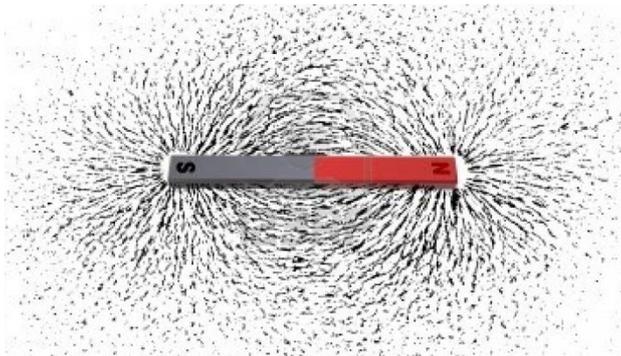
Un aimant modifie les propriétés de l'espace qui l'entoure en créant **des forces magnétiques**. Par analogie avec le champ électrique, on dit alors qu'il existe un **champ magnétique** dans l'espace qui entoure un aimant.

a) Définition

Un champ magnétique est une région de l'espace dans laquelle une petite aiguille aimantée est soumise à l'action d'un couple de force.

b) *Expériences*

En saupoudrant de la limaille de fer sur un aimant droit, on s'aperçoit que les grains de limaille se disposent suivant des courbes:

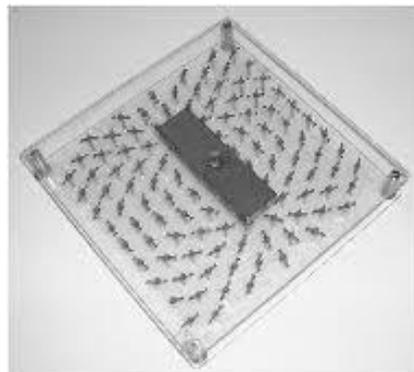


Ces courbes sont appelées **lignes de champ magnétique** et l'ensemble de ces lignes constituent le **spectre magnétique** de l'aimant.

Si l'on positionne une petite aiguille aimantée mobile autour d'un axe en différents points de la plaque : celle-ci se stabilise à chaque position

- Dans une direction privilégiée tangente à la ligne de champ passant par le point
- Avec un sens qui est conventionnellement celui qui va du pôle sud au pôle nord de l'aiguille aimantée.

Il suffit donc de placer toute une série d'aiguilles aimantées autour d'un aimant et de voir les directions qu'elles prennent pour étudier la forme d'un champ magnétique autour de l'aimant.

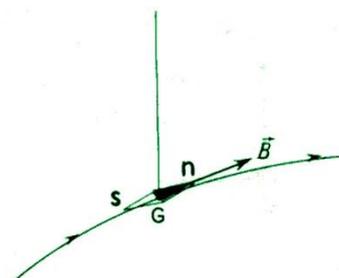


c) Le vecteur induction magnétique

Pour caractériser un champ magnétique, on va donc utiliser un vecteur appelé **vecteur induction magnétique** \vec{B} qui sera défini en chacun des points du champ.

\vec{B} :

- **Point d'application** : un point de l'espace
- **Ligne d'action** : droite tangente à la ligne de champ au point considéré
- **Sens** : par convention qui part du pôle Sud de l'aiguille et se dirige vers le pôle Nord de l'aiguille aimantée.
- **Intensité** du champ magnétique : unité **Tesla T** (voir ultérieurement comment la calculer).

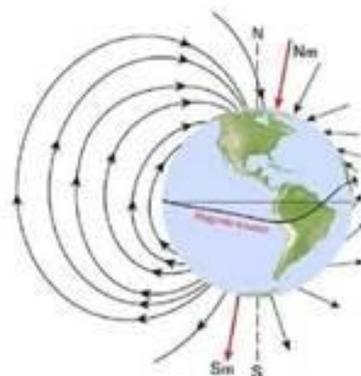
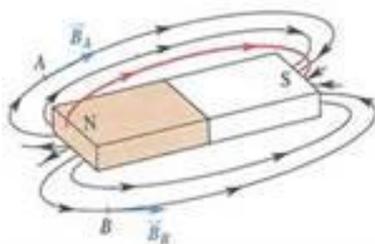
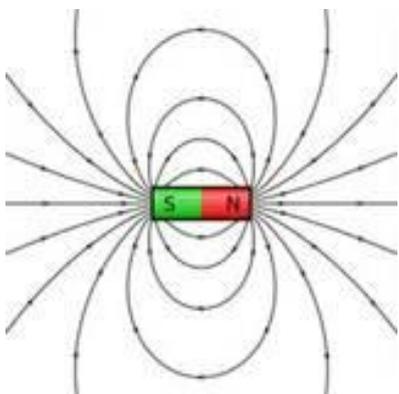


Remarques :

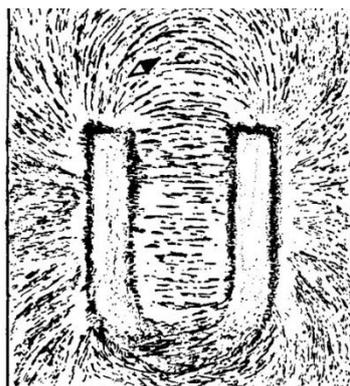
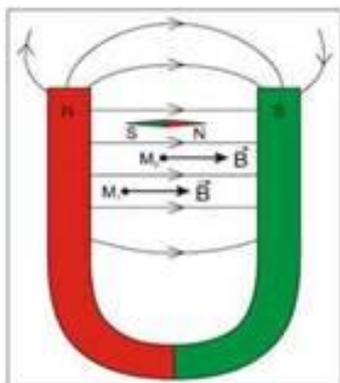
- L'ordre de grandeur du champ magnétique d'un aimant droit est de l'ordre de quelques millièmes de tesla
- La valeur du champ magnétique terrestre est de l'ordre de quelques 10^{-5} tesla.

d) Exemples de spectres magnétiques (topographie d'un champ magnétique)

Il existe une infinité de lignes d'induction magnétique.



Dans l'entrefer du fer à cheval (aimant en U) le champ magnétique est **homogène et uniforme** (vecteur \vec{B} identique en tout point)



Modification de la topographie d'un spectre magnétique par un milieu ferromagnétique.

Déposons horizontalement une plaque de verre sur un aimant ou un électro-aimant en fer à cheval et réalisons son spectre (fig. 90.)

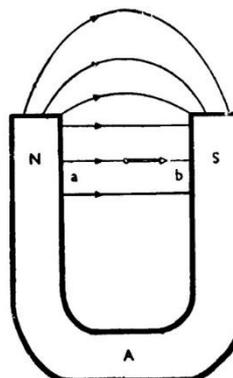


Fig. 90.

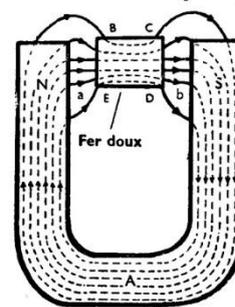


Fig. 91.

Au voisinage des pôles, disposons ensuite un petit barreau de fer doux (fig. 91). Nous savons qu'il s'aimante par influence (108) et nous observons une modification du spectre.

IX- Champ magnétique créé par un courant

1) Cas d'un courant passant dans un fil rectiligne

a) *Expérience d'Oersted*



En 1819, Oersted (Copenhague) était occupé à montrer à ses élèves les effets thermiques du courant électrique dans un conducteur, lorsque son attention fut attirée par un phénomène inattendu.

Il remarqua qu'une aiguille aimantée, qui se trouvait par hasard dans le voisinage du conducteur, déviait chaque fois que celui-ci était traversé par un courant électrique.

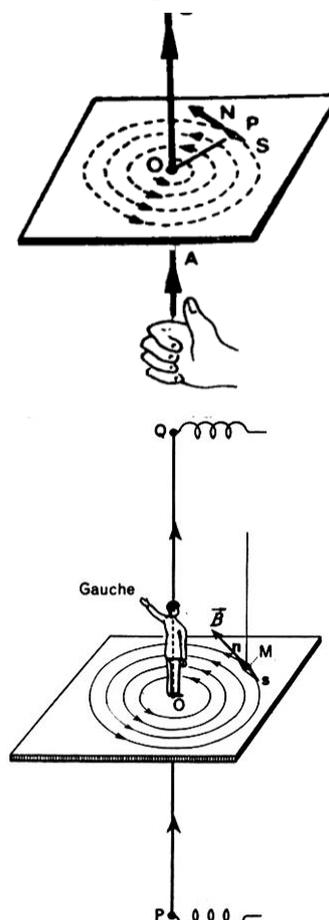
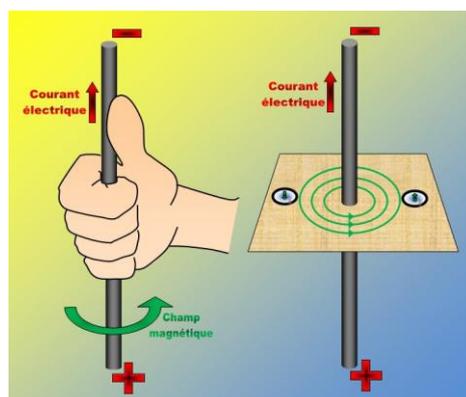
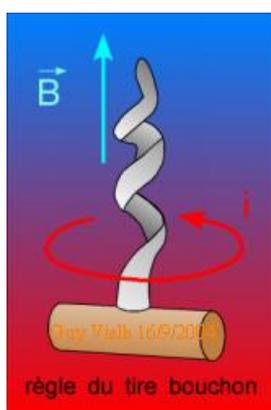
Il put alors constater que l'aiguille aimantée tentait chaque fois de prendre la direction normale au conducteur et que lorsqu'on inversait le courant, l'aiguille inversait la direction de son pôle nord.

(*Éléments de physique T.3, Delaruelle et Claes*)

De par son expérience, Oersted mettait en évidence un lien entre le courant électrique et l'existence d'un champ magnétique.

Lorsqu'on examine le spectre magnétique obtenu, on s'aperçoit que les lignes de champ sont des circonférences concentriques se trouvant dans un plan perpendiculaire au courant électrique.

Le **sens** des lignes de champ est conforme à la règle du tire-bouchon ou règle de la main droite ou règle du petit bonhomme d'ampère :



Le bonhomme a le courant qui lui passe par les pieds et voit champ magnétique circuler de sa droite vers sa gauche

b) *Intensité du vecteur induction magnétique \vec{B}*

On remarque que l'intensité de \vec{B} est :

Fig. 2. Le champ magnétique d'un courant rectiligne.

- Proportionnelle à l'intensité du courant : i
- Et inversement proportionnel à la distance d définie du point d'application du vecteur induction au fil
(d très petit par rapport à la longueur du fil)

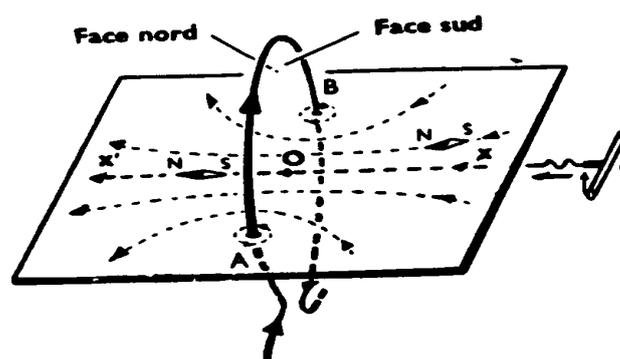
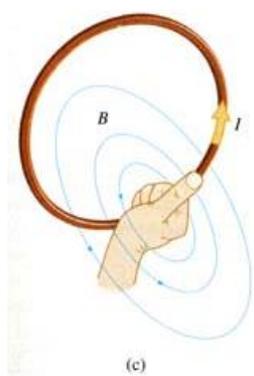
$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi d}$$

μ_0 : La perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{T.m/A}$

2) Cas d'un courant passant dans un conducteur circulaire (une spire)

Les lignes d'induction magnétique sont des cercles au voisinage des conducteurs. Elles se déforment pour tendre à devenir rectilignes à mesure qu'elles se rapprochent de l'axe de la spire.

Les lignes d'induction sortent par une face, appelée **face nord** et rentre par l'autre face appelée **face sud**.



a) Détermination des pôles

Le sens de \vec{B} est inversé lorsque l'on inverse le sens du courant

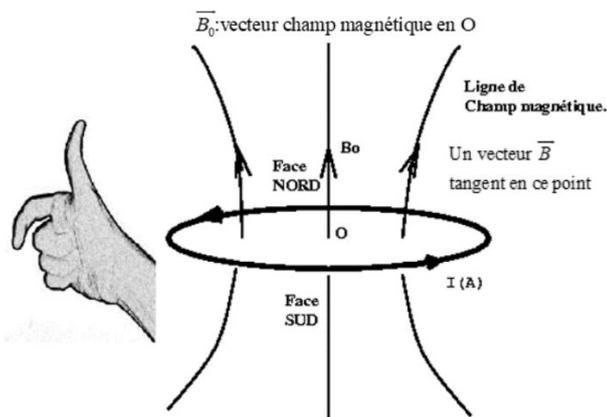
b) Intensité du vecteur induction magnétique \vec{B} au centre de la spire

D'après ce qui a été vu précédent, on en déduit la valeur de B au centre de la spire :

$$B_{\text{centre}} = \frac{\mu_0 i}{2\pi R}$$

R : Rayon de la spire

μ_0 : La perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{T.m/A}$



Remarque : L'intensité de \vec{B} est d'autant plus grande que l'intensité du courant est importante et que le rayon de la spire est petit.

3) Spectre magnétique au voisinage d'un solénoïde

a) Définition

Une bobine ou solénoïde s'obtient en enroulant un fil conducteur sur un cylindre isolant de grande longueur, par rapport à son diamètre



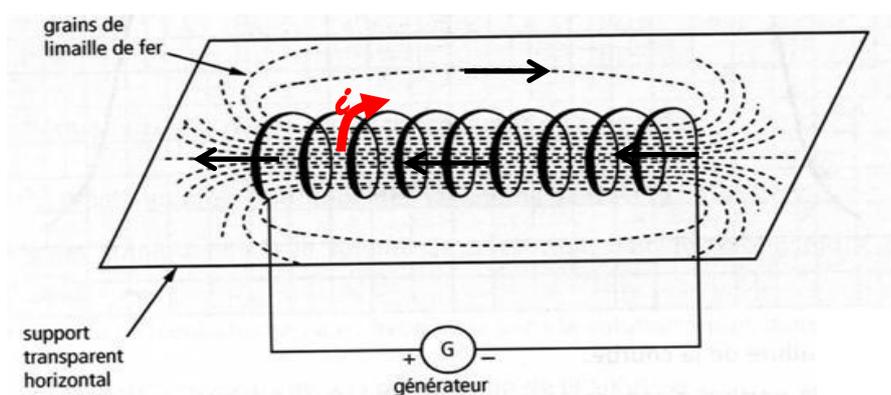
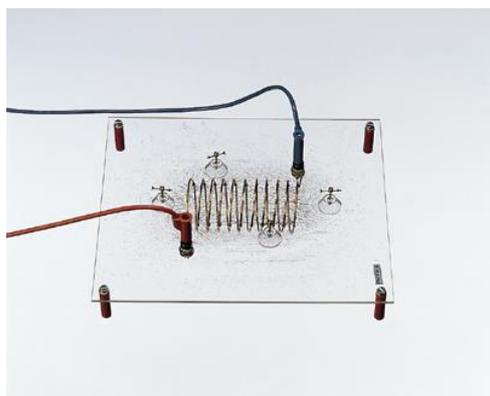
b) Spectre magnétique

On place des aiguilles aimantées ou on saupoudre de limaille de fer.

On fait passer un courant continu dans la bobine

Chacune des aiguilles aimantées se stabilise

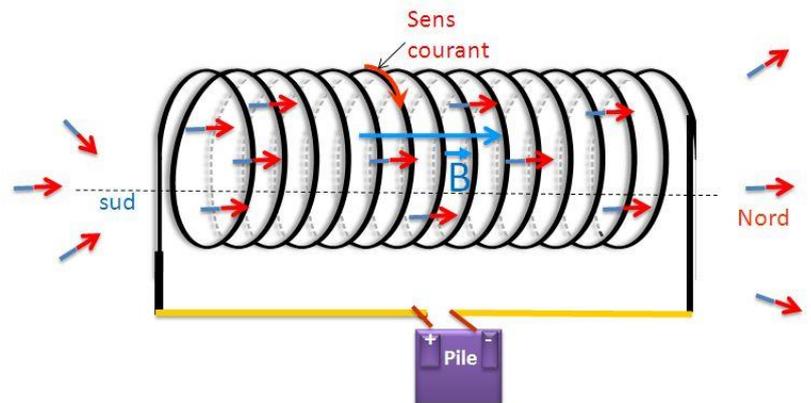
Les grains de limaille de fer se placent selon des lignes permettant de distinguer un **spectre intérieur** et un **spectre extérieur**



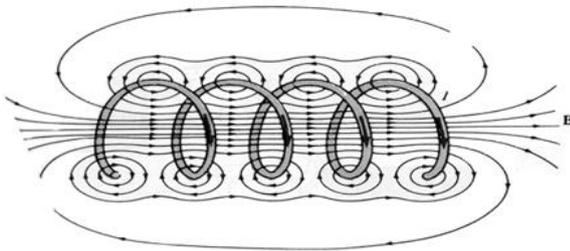
Le spectre magnétique du solénoïde, parcouru par un courant, est semblable à celui d'un barreau aimanté, et ses propriétés sont les mêmes que celle d'un aimant rectiligne.

A l'**intérieur** de la bobine, les lignes d'induction magnétique sont des droites sensiblement parallèles et le **champ magnétique** (ou induction magnétique) est considéré comme **uniforme**.

Au voisinage immédiat des spires, les lignes de champ tendent à entourer la spire.

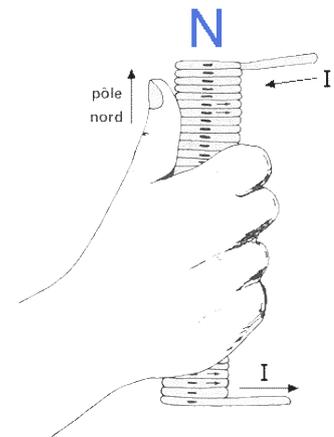


Le **spectre extérieur** d'une bobine est semblable à celui d'un barreau aimanté.



Remarques :

- Selon le sens du champ magnétique on définit le pôle Nord et le pôle Sud de la bobine qui devient un électroaimant.
- A l'intérieur, elles vont du pôle S au pôle N (par convention).
- A l'extérieur de la bobine les lignes vont du pôle nord au pôle sud.
- Si on inverse le courant les aiguilles aimantées se stabilisent dans le sens inverse
- Le sens du champ magnétique peut être retrouvé par **la règle de la main droite**.



c) **Intensité du vecteur induction magnétique au centre de la bobine**

Lorsqu'on fait passer un courant dans un solénoïde, l'induction magnétique obtenue est proportionnelle :

- À l'intensité du courant qui circule dans les spires
- Au nombre «n'» de spires par unité de longueur.

$$B_{\text{centre}} = \mu \cdot n' \cdot i$$

La valeur de l'induction magnétique au centre de la bobine :

$$\boxed{B_{\text{centre}} = \mu \frac{N}{l} i}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N : \text{nombre de spires de la bobine} \\ l : \text{longueur de la bobine (m)} \\ i : \text{intensité du courant (A)} \\ \mu : \text{perméabilité magnétique du milieu (Tm/A)} \end{array} \right.$$

Remarque :

- μ : **Perméabilité magnétique du milieu** dépend du milieu remplissant l'intérieur de la bobine. Dans le vide on le note μ_0 et $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{Tm/A} \approx 12,57 \cdot 10^{-7} \text{Tm/A}$ ou N/A^2 et dans l'air $\mu_{\text{air}} = 12,50 \cdot 10^{-7} \text{Tm/A}$
- On peut obtenir une même valeur pour l'induction magnétique, B, en jouant soit sur l'intensité i, soit sur le nombre totale de spires, N. (5 spires avec 100A ou 2000 spires avec 0,25A)

4) La perméabilité magnétique

- **Dans un fil rectiligne :** $\boxed{B = \frac{\mu_0 i}{2\pi d}}$ d : distance entre le point d'application de \vec{B} et le fil

- **Pour la spire :** $\boxed{B_{\text{centre}} = \frac{\mu_0 i}{2\pi R}}$ R : rayon de la spire

- **Pour la bobine**

$$\boxed{B_{\text{centre}} = \mu \frac{N}{l} i}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N : \text{nombre de spires de la bobine} \\ l : \text{longueur de la bobine (m)} \\ i : \text{intensité du courant (A)} \\ \mu : \text{perméabilité magnétique du milieu (T.m/A)} \end{array} \right.$$

- **La perméabilité magnétique du vide :** $\boxed{\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{m.T / A}}$

- **La perméabilité magnétique d'une substance quelconque :**

$$\boxed{\mu = \mu_r \mu_0} \quad \mu_r : \text{Perméabilité relative du milieu.}$$

$$\text{Remarque : } \mu_{r_{\text{air}}} \approx 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{\text{air}} \approx \mu_0$$

5) Caractère ondulatoire du champ électrique et magnétique - Maxwell (1831-1879)

- Permittivité du vide (V. loi de Coulomb) : $\boxed{\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}}$

- Perméabilité magnétique du vide : $\boxed{\mu_0 = 2\pi k'}$

Maxwelle montre que le champ magnétique ainsi que le champ électrique suivent également l'équation d'ondes. La vitesse de propagation c de l'onde électro-magnétique (la lumière) est donnée par :

$$\mu_0 \cdot \epsilon_0 = \frac{1}{c^2} \quad c : \text{vitesse de la lumière dans le vide}$$



6) Hypothèse d'Ampère (1775 - 1836)

N'est-il pas paradoxal en effet que les causes du champ magnétiques soient des courants (c'est à dire des charges en mouvement) alors que les sources les plus usuelles de champ magnétique soient les aimants, où il est difficile de voir où se trouverait un éventuel courant ?

La similitude entre les champs magnétiques produits par des courants et par des aimants permanents a conduit André Marie Ampère à comprendre que ce sont des courants microscopiques au niveau des atomes ou des molécules qui sont la source du champ dans ces aimants permanents.

Tous les corps possèdent des propriétés magnétiques, car il y a des électrons en mouvement dans tous les corps.

Ampère avait donc dès 1821 émit l'hypothèse que les milieux magnétiques étaient constitués d'une infinité de dipôles élémentaires créés par des boucles de courant microscopiques.

En volume, les courants circulent par paires en sens opposés, de sorte que leurs champs se compensent exactement.

Le champ résultant est alors dû aux courants le long de la surface de l'aimant et est identique à celui produit par un courant électrique dans un de même forme.

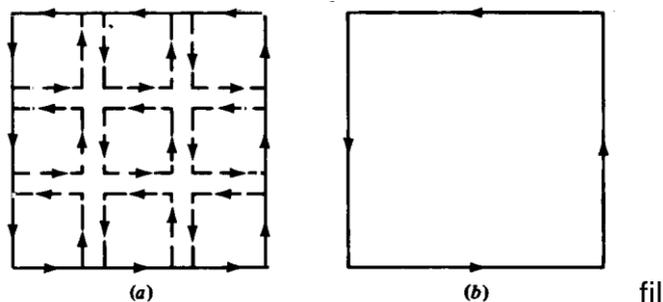


Figure 19.8. (a) Les courants microscopiques dans un aimant permanent. (b) Comme les effets des paires de courants opposés se compensent en volume, le champ résultant est le même que celui d'un courant circulant sur le pourtour de l'aimant.

Un aimant cylindrique est donc totalement analogue à un solénoïde à n spires par unité de longueur parcouru par un courant surfacique.

7) Applications

a) Introduction d'un noyau de fer dans une bobine

Le fer est un matériau magnétique. Des dipôles magnétiques (voir hypothèse d'Ampère) sont présents à l'intérieur du fer. Dans le fer doux, ces dipôles s'alignent sur un champ magnétique externe. De cette façon, le noyau de fer doux agit comme un aimant à part entière.



Imaginons maintenant que nous insérons une pièce en fer doux au centre d'une bobine de fils de cuivre. Lors de la mise sous tension, la bobine devient un électroaimant. La perméabilité relative du fer est proche de 20 000 T.m/A. l'électroaimant possédant un noyau en fer voit donc son induction magnétique multipliée par un facteur 20 000 (qui peut varier en fonction de la température).

b) *L'utilisation des électroaimants*

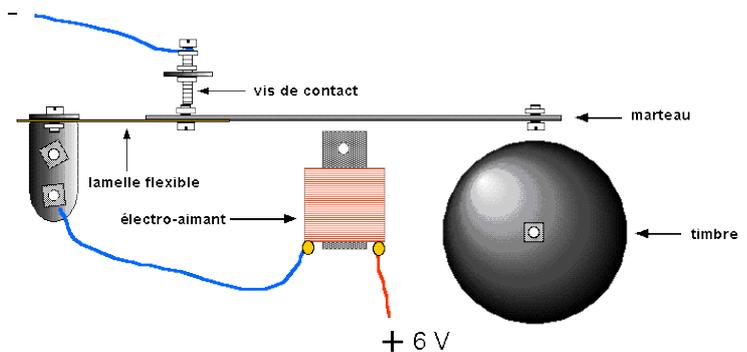
Une bobine devient un électroaimant dès qu'un courant le traverse.

Un électroaimant est un aimant qui fonctionne à l'électricité. Il peut être activé et désactivé.

Les électroaimants permettent de nombreux usages. En voici quelques exemples.

- Une sonnette électrique – Les électroaimants font vibrer le marteau selon un mouvement de va-et-vient qui déclenche la sonnerie du carillon.

La sonnerie est constituée d'un timbre, d'une bande à trous en acier montée sur une lamelle flexible et d'un électro-aimant. Celui-ci attire la bande à trous qui s'abaisse et vient heurter le timbre. A ce moment, la bande ne touche plus la vis de contact qui transmettait le courant vers le bobinage de l'électro-aimant. Le courant ne passe plus, l'aimantation cesse, la bande remonte. Puis le cycle recommence.



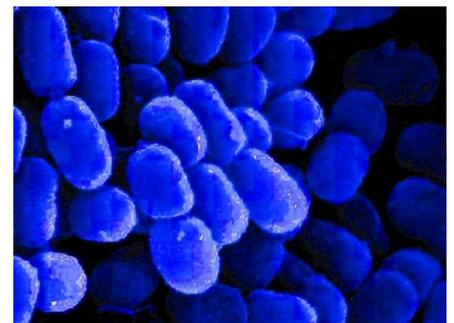
- Une serrure électrique – Après avoir répondu à l'interphone, vous pouvez déverrouiller la porte depuis l'étage. Un électroaimant ouvre le verrou de la serrure. En désactivant l'électroaimant, le verrou se remet en place
- Une grue – Une grue de ferrailleur peut soulever une voiture entière. Après l'avoir amenée en position, on coupe l'électroaimant pour déposer la carcasse.
- Un instrument chirurgical – Un chirurgien ophtalmologue peut enlever des éclats d'acier de l'œil de son patient à l'aide d'un électroaimant. Il augmente l'intensité jusqu'à ce que l'électroaimant exerce une attraction tout juste suffisante pour enlever délicatement le métal.

c) *La Navigation Magnétique des Animaux*

Une grande variété d'animaux utilise le champ magnétique terrestre pour s'orienter.

1. Par temps couvert, quand ils ne peuvent pas utiliser le soleil pour se diriger, les pigeons sont désorientés si on leur attache de petits aimants à la tête.
2. Les rouges-gorges européens que l'on garde en cage durant la période de migration se tournent d'après l'orientation du champ magnétique dans la cage.
3. Les abeilles exécutent des figures liées à la direction du champ magnétique local.

4. Les bactéries vivant dans la vase nagent normalement vers le bas, recherchant la boue molle qui est leur habitat. Si, au moyen d'aimants, on crée un champ magnétique inverse du champ magnétique terrestre, elles se mettent à nager vers le haut. De plus, des bactéries de l'hémisphère austral où la composante verticale du champ magnétique est dans le sens opposé par rapport à l'hémisphère nord nagent vers le haut quand on les transporte aux Etats-Unis, tandis que les bactéries de vase du Brésil où le champ est horizontal nagent indifféremment dans toute direction par rapport au champ magnétique.



Des études ont détecté des grains de magnétite aimantée chez les pigeons voyageurs, les rouges-gorges, les abeilles et les bactéries de vase. Ces espèces possèdent de petits aimants permanents qui se comportent apparemment comme des aiguilles de boussole et sont soumis à des couples de forces quand ils se trouvent dans un champ magnétique (Fig. 19.10).

Un chercheur a même montré que les êtres humains ont une certaine capacité à retrouver leur chemin sans voir; des personnes transportées, les yeux bandés, à plusieurs kilomètres de chez elles, purent faire des estimations relativement précises de la direction de retour. Cette capacité était diminuée quand les sujets portaient des aimants sur eux.

Cependant, d'autres chercheurs ont été incapables d'observer ces effets.

De quelle façon précise cette information est perçue et traitée est une question complexe que de nombreux chercheurs étudient à l'heure actuelle.

(physique, J. Kane et M. Morton)

Les saumons guidés par l'intensité des champs magnétiques

Les saumons auraient la capacité de mémoriser l'intensité du champ de leur lieu d'éclosion. Des années plus tard, ils sont capables de s'orienter en recherchant le trajet le plus proche de cette signature.



X- Exercices

- Calculer l'induction magnétique produite à 4 cm d'un fil conducteur rectiligne très long parcouru par un courant de 2A.
- Deux conducteurs rectilignes parallèles, de longueur infinie, sont maintenus à une distance constante de 10 cm. Nous supposons qu'ils sont perpendiculaires au plan de la feuille et qu'ils le traversent en A et en B. Le courant en B vaut 6A.
 - Quelle doit être l'intensité du courant dans le conducteur A pour que l'induction résultante s'annule au point C ? La distance BAC étant de 15 cm.
 - Quelle est alors l'induction résultante au point D si ABD est de 15 cm ?
- Soit un trièdre rectangle oxyz. On suppose que l'axe oz sort du plan de la feuille. Un courant i_1 10 A est maintenu dans la direction et le sens de l'axe oz. Sachant qu'une induction magnétique de 10^{-6} T est exercée dans la direction et dans le sens de ox, déterminer l'induction résultante aux points :
 - (0, 2m, 0)
 - (2m, 0, 0)
 - (0, 1/2m, 0)
- Un solénoïde de 3 cm de longueur comporte 150 spires. Il est parcouru par un courant de 2A . Calculer l'intensité de l'induction magnétique à l'intérieur du solénoïde.
- Une bobine cylindrique de 3 m de long, dont l'axe principal est horizontal, a une section de 50 cm². Sur la bobine est enroulée régulièrement une seule couche de fil de cuivre de 1mm de diamètre et d'une longueur totale de 650m.
 - On fait passer un courant de 0,75 A dans le fil ; trouver la valeur de l'induction magnétique créée par la bobine en son centre.
 - Le champ magnétique terrestre ($2 \cdot 10^{-5}$ T) fait un angle de 30° avec l'axe principal de la bobine. Calculer la valeur de l'induction magnétique totale dans la bobine.
 - Calculer la résistance électrique du solénoïde considéré.
 - Quelle est la tension aux bornes de la pile reliée à la bobine ?

La magnétisation des corps et le champ magnétique H.