Trois champs: de gravité, électrique, magnétique.

1. Réutilisons nos connaissances sur la gravité.

1.1. Définissons un mot nouveau: **corps d'épreuve.**

C'est le genre d'objet qu'il faut placer dans un champ, pour que la force qui en résultera, trahisse quel est ce champ, ses caractéristiques, sa grandeur, son orientation. Pour le champ de gravitation, n'importe quel objet est un corps d'épreuve: une pomme, un ballon; ils tombent...

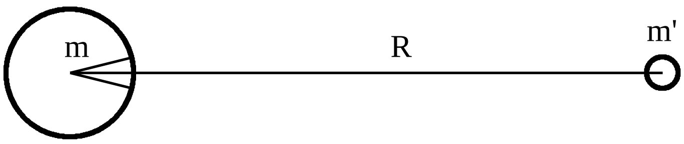
1.2. Quelle est la cause du champ de gravité?

Tout objet ayant une masse, produit un champ de gravité autour de lui: il attire toutes les autres masses. Simplement, seuls les objets ayant une grosse masse produisent un champ dont il nous est facile de nous apercevoir: des astres lourds, comme la Terre, la Lune, ou d'autres planètes, le Soleil, ou d'autres étoiles.

Grossièrement dit: "*champ de gravité*" signifie " *Il y a de grosses masses de ce côté-ci, pas bien loin!* "

1.3. Direction et sens.

La gravité est toujours attractive. Il n'existe ni antigravité, ni antimasse.



Si l'on définit un rayon $\vec{R}$ comme ayant son point de départ au corps d'épreuve (là où l'on éprouve le champ), et son point d'arrivée au centre de la masse qui produit le champ de gravité, la force sur le corps d'épreuve est toujours dans le sens de $\vec{R}$.

1.4. Loi mathématique.

1.4.1. On a besoin de définir par R la longueur du vecteur $\vec{R}$.

1.4.2. On définit l'**inverse** de $\vec{R}$: $(\vec{R})^{-1} = \dfrac{1}{\vec{R}}$, le vecteur qui a la direction et le sens de $\vec{R}$, et dont la norme est l'inverse de celle de $\vec{R}$. Autrement dit: $\vec{R} \,.\, (\vec{R})^{-1} = 1$.

1.4.3. **Constante de gravité universelle**: $\eta = 66{,}726 \,.\, 10^{-12}\ m^3 /(kg.\ s^2)$.

1.4.4. **Loi de Newton**. Le champ est créé par la masse **m**, résumée par son centre de gravité. Le corps d'épreuve a pour masse **m'**. La force éprouvée par le corps d'épreuve est toujours dirigée comme le rayon $\vec{R}$. D'où :

Force d'attraction éprouvée par le corps d'épreuve: $\vec{F} = \dfrac{\eta.m.m'}{R.\vec{R}}$,

η est une constante très petite; la force de gravité est la plus faible de toutes les forces existantes. C'est pourquoi c'est sur elle qu'il est le plus difficile d'intervenir en laboratoire pour faire des mesures. La gravité est la plus anciennement connue des forces. Elle reste de fait la moins bien connue de toutes.

<u>Application</u>: Calculer l'attraction de gravité entre deux masses de 50 kg, quand un mètre sépare leurs centres de gravités respectifs.

$F = 66{,}726 \,.\, 10^{-12}\ m /(kg.\ s^2) \times 2500\ kg^2 = 0{,}1668\ \mu N$. Le poids de 17 nanogrammes !

Retenez bien ce résultat. Nous le comparerons avec un cas facile à obtenir en électrostatique.

On définit le champ comme le **quotient de cette force par la masse du corps d'épreuve**, d'où l'expression du champ de gravité :

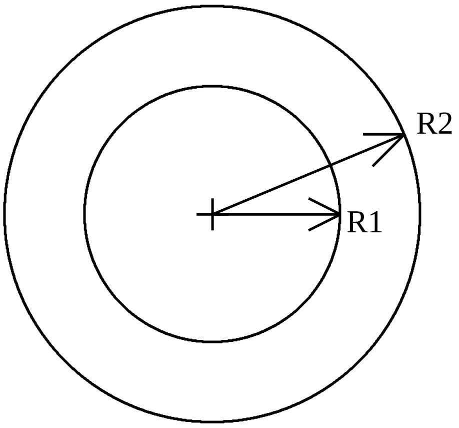
$\vec{\gamma} = \frac{\eta.m}{R.\vec{R}}$. Dimension physique: $\vec{\gamma}$ est une accélération; son unité est le m/s^2.

Application: calculer l'accélération de la pesanteur au pôle Nord (les pôles sont les deux seuls endroits où il n'y a pas à tenir compte de la rotation terrestre). Masse de la Terre: 5 979 . 10^{21} kg. Rayon de la Terre au pôle Nord: 6 356 912 m.

5979 .10^{21} kg $\times$ 66,726 . 10^{-12} m^3 /kg.s^2 / (6 356 912)^2 m^2 = 9,8726 m /s^2

Dans la plupart des calculs, il est plus économique d'utiliser le **potentiel de gravité**:

G $= - \frac{\eta.m}{R}$. **G** n'est défini qu'à une origine près, arbitraire (ici zéro à distance infinie). Mais la différence de potentiel est toujours définie sans ambiguïté. La différence d'énergie potentielle entre deux positions du corps d'épreuve m', est toujours le produit de m' par la différence de potentiel.



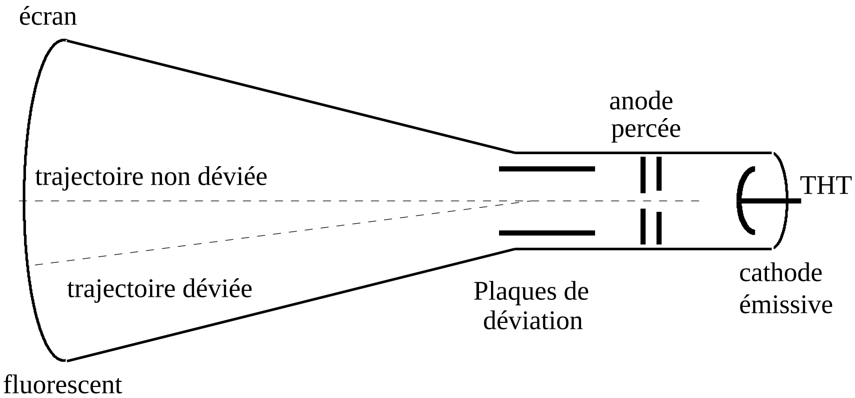
$$E_1 - E_2 = m'\,(G_1 - G_2) = \eta.m.m'\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) = \eta.m.m'\frac{R_1 - R_2}{R_1.R_2}.$$

Application: calculer l'énergie potentielle qu'il a fallu communiquer à un satellite de 1 tonne, pour le hisser de l'altitude (comptée depuis le centre de la Terre) de 6 378 550 m (6 378 533 m + l'altitude du pas de tir de Kourou au dessus de la mer) à 42 145 530 m (altitude géosynchrone, toujours comptée depuis le centre de la Terre), soit 35 767 km plus haut. Masse de la Terre: 5 979 . 10^{21} kg. **62 546 kJ - 9 466 kJ = 53 080 kJ.**

2. Champ électrique

2.1. Effets sur les charges électriques.

Les **champs électriques**, nous nous en servons tous les jours dans nos oscilloscopes. Nous nous en servons aussi dans les électrolyses, dans les tubes fluorescents qui éclairent nos salles. Etc. Nous en avons manipulés lorsqu'on a fait une électrolyse: la cathode a attiré des cations Na^+, et l'anode a attiré des anions Cl^-. Le champ électrique a trié les ions, selon leur signe.



Dans nos oscilloscopes: une anode percée accélère des électrons e^-, et les laisse continuer leur course vers l'écran fluorescent. Les plaques de déviation créent un champ électrique qui dévie ces électrons, et leur donnent une déviation proportionnelle à la différence de potentiel entre ces plaques, respectivement horizontales et verticales.

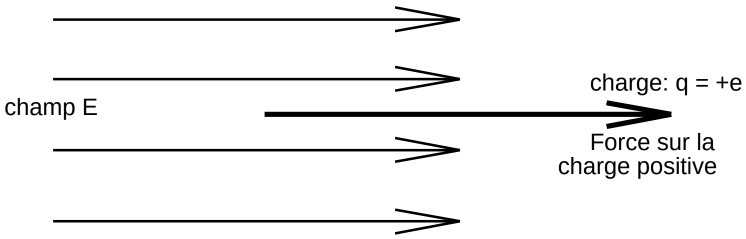
La force exercée sur une charge électrique q, est le produit de cette charge, par le champ électrique:

F = q E. **Et cette loi est vectorielle:** $\vec{F} = q.\vec{E}$

L'unité de champ électrique est le volt par mètre. D'après la loi ci-dessus, on pourrait aussi dire le: . . **Newton par coulomb.**

Remarque: tous les corps tombent dans le même sens: vers le centre de la Terre, pour notre voisinage. Alors qu'il y a deux sortes de corps d'épreuve en électromagnétisme; les charges - et les charges +.

Cette loi se dessine plus facilement si le **corps d'épreuve** du champ électrique est une charge positive:

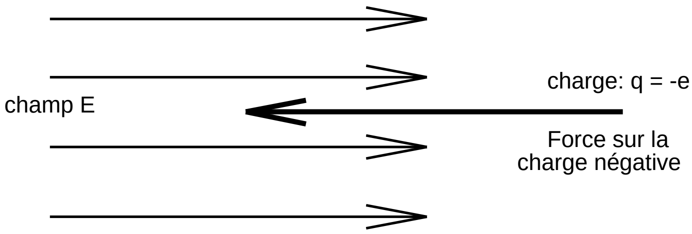


+ e représente la charge d'un proton.

Finissez de légender ce dessin: les potentiels les plus positifs, sont-ils à gauche, ou à droite de la figure?

On dessine donc le champ électrique comme un champ de flèches, qui couleraient des charges +, vers les charges -. Est-ce le même sens que le sens du courant conventionnel?

Si ce **corps d'épreuve** est un électron, de charge négative, voici:



- e représente la charge d'un électron.

Autrement dit, l'électron négatif, fuit les autres électrons.

2.2. Production du champ par les charges électriques.

2.2.1. Expression du champ produit dans le vide par une charge "ponctuelle": $\vec{E} = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0 . R . \vec{R}}$

La permittivité électrique du vide, ε_0, vaut 8,85412 . 10^{-12} F / m. Et le coefficient sommant cette permittivité sur toutes les directions de l'espace: $4\pi\varepsilon_0$, vaut 111,265 . 10^{-12} F / m.

Son inverse $\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ vaut 8,9876 . 10^9 m / F. Presque neuf milliards de mètres par farad.

2.2.2. Pour tous milieux autres que le vide, on remplace la permittivité du vide $\boldsymbol{\varepsilon_0}$, par la permittivité du milieu $\boldsymbol{\varepsilon}$. Le quotient $\boldsymbol{\varepsilon_r} = \varepsilon / \boldsymbol{\varepsilon_0}$ est la permittivité relative. ε_r dépend de la température, du champ, de la fréquence, etc...

Quelques permittivités relatives, ou *constantes diélectriques* (pourtant, ε_r n'est jamais une constante!):

milieu	ε_r	milieu	ε_r
air à la pression normale	1,0005	eau	80,5
pétrole, huiles.	2,1 à 2,2	éthanol	26
polypropylène	2,2	mica muscovite	6,8 à 7,5
polytétrafluoréthylène	2,1	verre à condensateurs	4
polyester téréphtalique	3,2	alumine Al_2O_3	8,4

papier de cellulose	3,4 à 5,5	oxyde de tantale Ta_2O_5	26

2.2.3. Application: Calculer l'attraction électrostatique entre deux charges opposées, respectivement + et - un dixième de microcoulomb (624 milliards d'électrons) séparées d'un mètre, dans l'air.

$F = 8{,}9876 \,.\, 10^9$ m / F / $1{,}0005 \times 10^{-14}$ F^2 = 89,83 µN.

Soit déjà 539 fois plus grande que l'attraction gravitationnelle pour deux masses de 50 kg. Or ces 624 milliards d'électrons, ne font qu'un en trop (ou en moins) par 1,3 millions de milliards (d'électrons). Ceci montre combien il a fallu de précautions pour obtenir une mesure valide de η...

Applications numériques.

Un condensateur a une épaisseur d'isolant de 0,1 µm. Il est chargé sous 70 V, et a une capacité de 0,01 F. L'isolant (alumine) a une permittivité relative ε_r de 8,4. En comparaison avec le problème dans le vide, à charge et distances égales, l'énergie, la d.d.p., le champ, et la force sont divisés par ε_r.

Quelle est la charge électrique accumulée sur l'électrode + ? **70 V × 0,01 F = 0,7 C.**

Quelle est la charge électrique accumulée sur l'électrode - ? **- 70 V × 0,01 F = - 0,7 C.**

Quel est le champ électrique moyen dans l'intervalle isolant ? **70 V / (8,4 × 10^{-7}m) = 83 kV/m**

Force totale d'attraction entre électrodes, qui comprime le diélectrique ? **83 kV/m × 0,7 C = 58 MN.**

2.3. Potentiel électrique

2.3.1. Dans la plupart des calculs, il est plus économique d'utiliser le **potentiel électrique**, en volts. Par exemple, $\mathbf{U} = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0 . R}$ à la distance **R** d'une seule charge ponctuelle **q**.

Remarque: si la charge était vraiment "*ponctuelle*", potentiel et champ seraient infinis en ce point-là.

U n'est défini qu'à une origine près, arbitraire (ici avec le zéro volt à distance infinie). Mais la différence de potentiel est toujours définie sans ambiguïté. La différence d'énergie potentielle entre deux positions du corps d'épreuve m', est toujours le produit de q' par la différence de potentiel.

$$E_1 - E_2 = q'\,(U_1 - U_2) = \frac{q.q'}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) = \frac{q.q'}{4\pi\varepsilon_0} \times \frac{R_2 - R_1}{R_1.R_2} \; .$$

Dans une région où le champ électrique $\vec{E}$ est constant, orientons l'axe des x parallèlement au vecteur $\vec{E}$. Soit E sa norme. Alors le potentiel électrique dans cette région vaut: U(x) = - E.x + U(0).

Pourquoi le signe moins ? **le champ électrique coule comme les ruisseaux, depuis le potentiel élevé vers le potentiel bas**

2.3.2. Applications numériques.

Reprenons l'exemple des petites sphères de 1 cm de rayon, à 1 m de distance, ayant l'une 10^{-7} coulomb de déséquilibre en trop, l'autre en moins. Quelle est leur différence de potentiel?

Il suffit, puisque les rayons sont petits devant la distance, de superposer chaque potentiel dû à chaque spère chargée. $U_1 - U_2 = \dfrac{2q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\dfrac{1}{0{,}01\text{m}} - \dfrac{1}{1\text{m}}\right) = \dfrac{2.10^{-7}\text{C}}{4\pi\varepsilon_0} \times \dfrac{1 - 0{,}01}{0{,}01\text{m}}$ = **178 kV.**

2.4. Résumons par un tableau nos connaissances sur ces deux champs, et leur corps d'épreuve:

Type de champ	corps d'épreuve du champ?	quoi produit le champ?	géométrie	Potentiel associé
champ de gravité	tout corps matériel.	Tous les corps matériels.	Vecteur: m / s²	Scalaire: m² / s²

champ électrique	toute charge électrique	des charges électriques.	Vecteur. Unité: V / m.	Scalaire: volt, ou J / C.

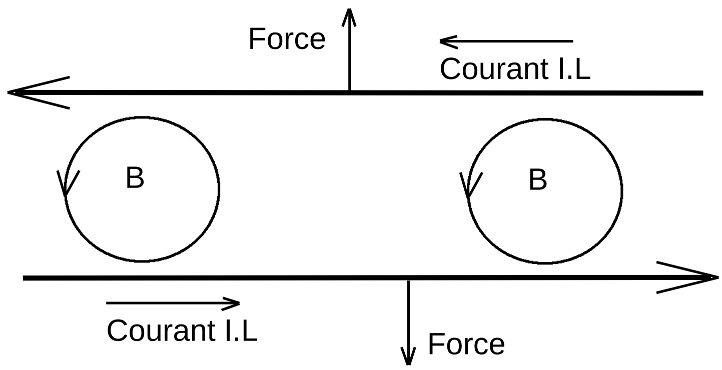
Calculer le champ de gravité de la Terre, là où est la Lune, soit à la distance moyenne de 384 403 km (variant en réalité entre 363 299 km et 405 506 km). **$2{,}70 \cdot 10^{-3}$ m/s^2.**

Sachant que la masse de la Lune est de $73{,}54 \cdot 10^{21}$ kg, en déduire la force avec laquelle la Terre attire la Lune. **$198{,}55\ 10^{18}$ N**

3. Champ magnétique

3.1. Définition légale de l'ampère:

Un courant de 1 ampère, parcourant deux conducteurs rectilignes, filiformes, distants de 1 mètre sur une grande longueur, produit entre eux, dans le vide, une force de 2×10^{-7} newton par mètre. Cette force est attractive si les deux courants vont dans le même sens, répulsive s'ils vont en sens contraire.



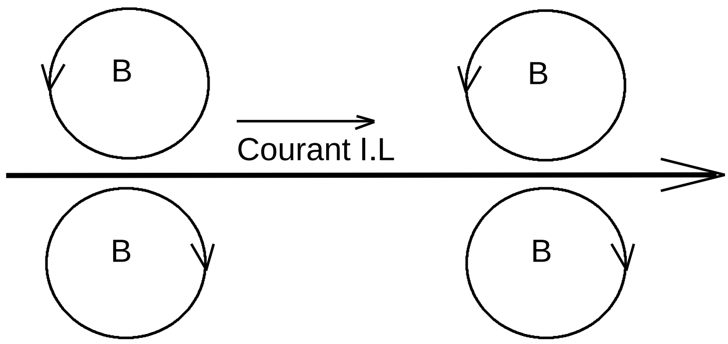
3.2. Production du champ magnétique:

Un **champ magnétique**, n'est rien d'autre qu'une petite variation d'un champ électrique, mais vue à travers un mirage (un mirage de l'espace-temps): il traduit qu'une charge électrique a une vitesse de déplacement, et il le traduit à la façon d'un chemin à rouleaux, ou d'un roulement à rouleaux.

On n'étudiera pour commencer que les champs dans l'air ou le vide. Nous verrons plus tard le cas beaucoup plus difficile des aimants: aimants permanents et matériaux aimantables.

Ce champ magnétique B, traduit le fait: **je vois tourner un courant devant moi.** Le produit i.l, intensité du courant, par la longueur d'un élément de circuit, est un vecteur: $\overrightarrow{i.l}$.

Un champ magnétique, est un être **qui tourne et fait tourner une vitesse.** Cet être-là est dans un plan: le plan de la rotation. Unité: le **tesla**.

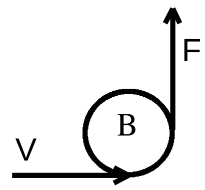


3.3. Aucun effet sur une charge électrique immobile.

3.4. Effet sur les charges électriques <u>en mouvement</u>.

La force qui dévie un courant, ou un électron lancé, sous l'effet du champ magnétique, est aussi un vecteur. Et le champ magnétique est le quotient de deux vecteurs perpendiculaires. Il ne peut donc en aucun cas être lui-même un vecteur. On peut l'appeler un « **bivecteur** ». Nous l'appellerons ici un « **tourneur** ».

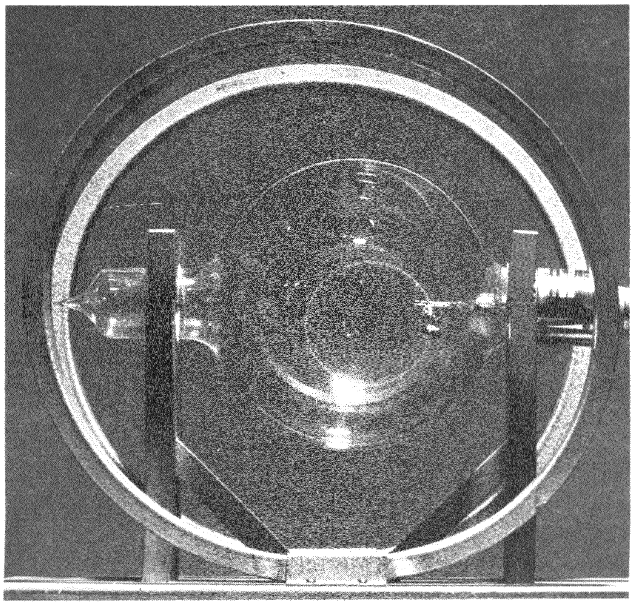
Relation entre le vecteur vitesse de l'électron, le tourneur champ magnétique, et la force résultante sur l'électron:



L'effet du champ magnétique est de faire tourner - dévier de sa trajectoire - une charge électrique **déjà en mouvement**, ou autrement dit, d'exercer une **force de déviation latérale sur un courant**.

Effet d'un champ magnétique sur un électron lancé: **il incurve sa trajectoire selon un arc de cercle**. Prenons le cas d'un électron lancé, dans un champ uniforme.

On étudiera le cas simple, où la vitesse initiale est déjà dans le plan qui contient le champ magnétique :

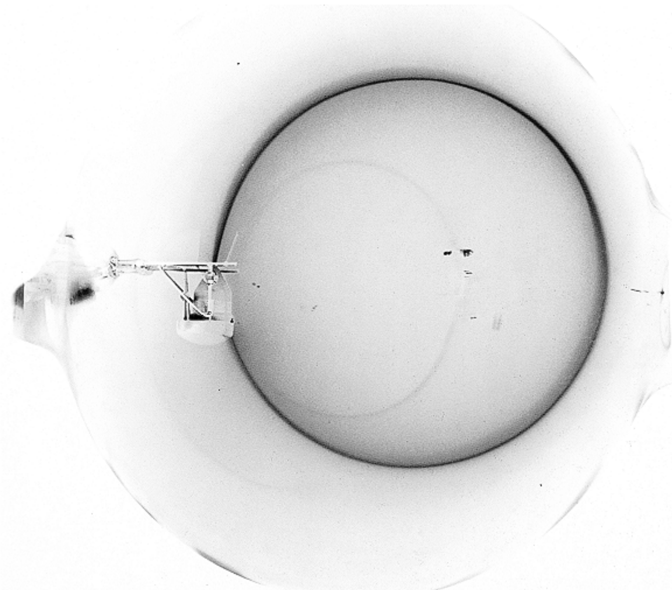


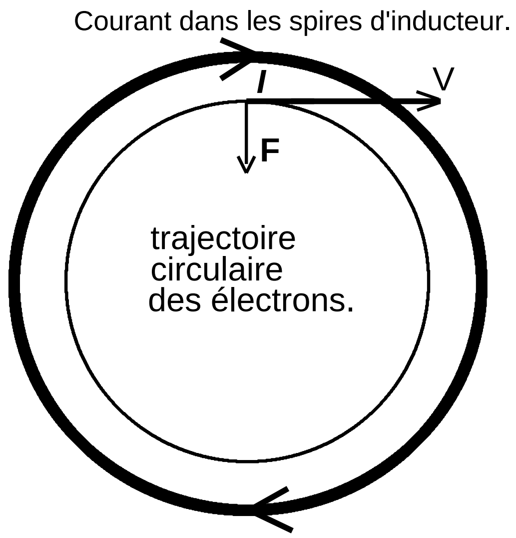
Dispositif expérimental:

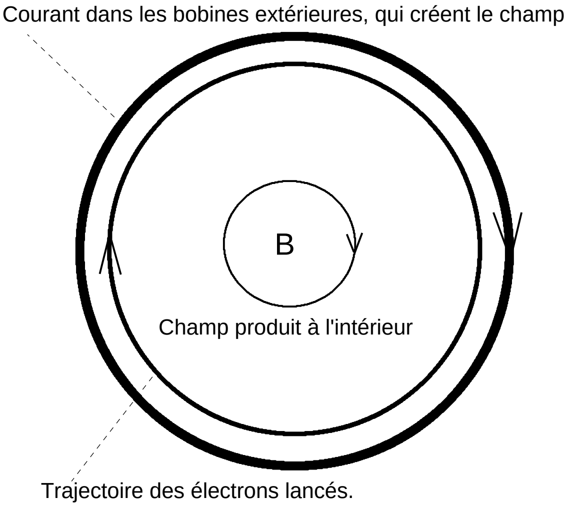
Une ampoule d'hydrogène raréfié, dans lequel on injecte un faisceau d'électrons, que l'on peut dévier, avec un champ magnétique.

Vous constatez dans quel sens tourne le faisceau d'électrons: dans le sens où tourne le courant dans la bobine.

• Ici, le plan du champ magnétique est bien parallèle au vecteur vitesse de l'électron. Le champ dévie alors l'électron dans une trajectoire circulaire. L'impulsion communiquée à l'électron par le champ magnétique reste alors toujours perpendiculaire à la vitesse, et la norme de la vitesse ne change pas.







On observe un rond dans un rond, et qui tournent pareil!

Bien sûr, il y a un truc! J'ai pris des **électrons**, dont la charge est négative. Si j'avais pris un courant, son « rond » aurait tourné en sens contraire.

• Et dans le cas général ? La trajectoire est hélicoïdale, avec la section circulaire de l'hélice dans la direction de plan du champ magnétique. **Le champ B n'agit que sur la projection intérieure de la vitesse sur le plan stable de B**. La projection extérieure de la vitesse est inchangée, et donne l'axe de la trajectoire hélicoïdale.

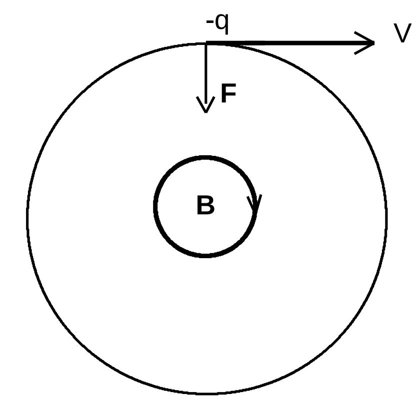
3.5. Expression mathématique de la loi: effet du champ sur l'électron lancé .

• Pour une charge mobile, une particule: $\vec{\mathbf{F}} = -\, q\, \overset{\lrcorner}{\mathbf{B}}.\vec{\mathbf{v}}$

Dans le cas général, seule n'intervient que la **projection intérieure** de $\vec{\mathbf{v}}$ sur le plan stable de $\overset{\lrcorner}{\mathbf{B}}$.

$\overset{\lrcorner}{\mathbf{B}}.\vec{\mathbf{v}}$ est donc qualifiable de **produit intérieur**.

L'expression analytique de $\overset{\lrcorner}{\mathbf{B}}$, opérateur antisymétrique de rang 2, reflète qu'il est la composition d'une projection sur le plan "propre" stable, et d'une rotation d'un quart de tour dans ce plan stable.



Trajectoire d'un électron dans un champ magnétique B, coplanaire à sa vitesse V

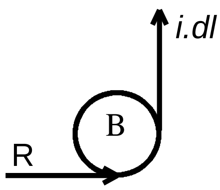
• Pour un conducteur parcouru par l'intensité i:

$\mathrm{d}\vec{\mathbf{F}} = -\, \overset{\lrcorner}{\mathbf{B}}.(\mathbf{I}\, \mathrm{d}\vec{\mathbf{l}})$ **(Loi d'Ampère-Laplace)**.

Signification physique du signe moins : deux courants de sens contraire se repoussent, de même sens s'attirent. Le champ $\overset{\lrcorner}{\mathbf{B}}$ est celui produit par les autres éléments de courant.

3.6. Expression mathématique de la loi: production du champ par un courant.

Orientation et symétrie:

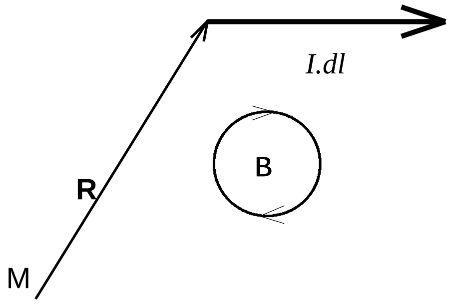


La forme complète exige un **produit extérieur** de deux vecteurs:

Contribution de chaque élément de courant $i.\vec{dl}$ (ou $q.\vec{v}$):

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}.\frac{(\vec{R})^{-1} \wedge (I\,\vec{dl})}{|R|}.$$

L'élément de courant $q.\vec{v}$, et le vecteur $\vec{R}$ reliant le point M à l'élément de courant déterminent le plan de $d\vec{B}$.



Champ produit par une spire, ou plusieurs, par exemple à l'intérieur d'un solénoïde,

Un rond dans un rond, et qui tournent pareil !

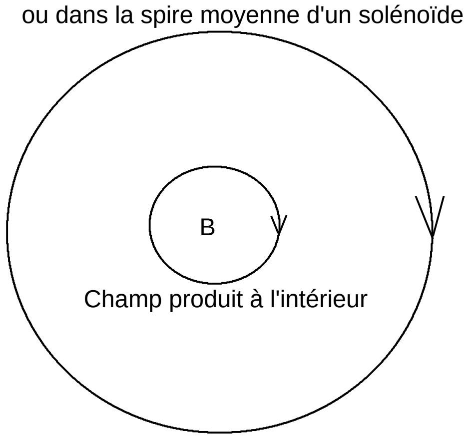
Dans un solénoïde long, sans fer: $B = \mu_0\, n_l\, I$

Avec: I : intensité du courant, par spire,
n_l: nombre de spires par mètre de longueur,
μ_0: perméabilité magnétique du vide.

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m = $12{,}56637 \times 10^{-7}$ H/m.

Remarque: $\boldsymbol{\mu_0 \times \varepsilon_0 \times c^2 = 1}$.
Où **c** est la vitesse de la lumière dans le vide.

Courant dans une spire,
ou dans la spire moyenne d'un solénoïde



3.7. Les phénomènes magnétiques dans la matière.

3.7.1. L'électron.

Chaque électron est à lui tout seul comme une spire de courant. En quelque sorte, **il tourne sur lui-même**. Il a donc un moment magnétique, et ce moment magnétique est de grandeur invariable.

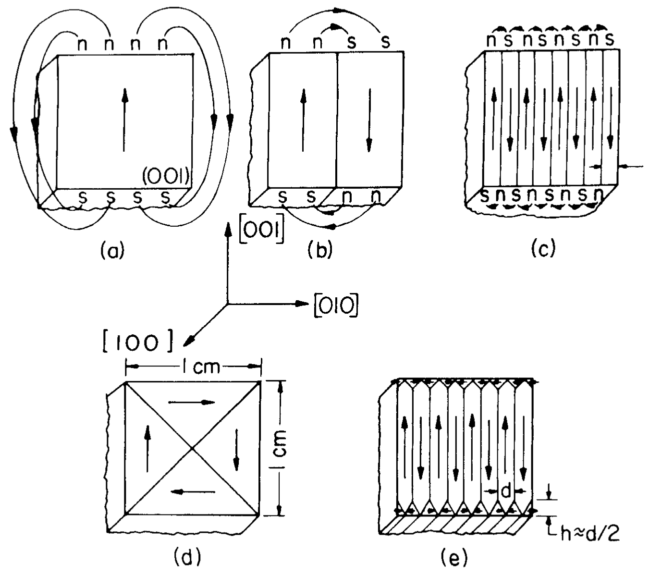
Ceci explique la liaison covalente en chimie: les électrons se groupent dans chaque atome et dans chaque molécule par paires. Chaque paire est formée d'électrons ayant leurs moments magnétiques opposés. Chaque paire n'a donc aucun moment magnétique. Si c'est plus économique en énergie, c'est donc stable.

Paradoxe difficile à comprendre : à notre échelle, nous sommes habitués à pouvoir orienter une toupie ou un aimant, dans toutes les directions de l'espace. Pourtant, les particules élémentaires, y compris les électrons, ont une façon très étrange de "*tourner sur eux-mêmes*" (*spin*): ils n'ont chacun que deux états de "rotation" possibles, deux "orientations" possibles par rapport à leur voisinage. Et pas plus de deux ! Soit « *tout contre* », soit « *tout pour* ».

La seule image proche de cela, à notre échelle, sont les **deux états de torsion** d'une courroie:
Fixez l'extrémité d'une courroie. Si vous faites une torsion d'un tour à l'autre extrémité, rien ne peut *effacer* cette torsion. Mais si vous lui faites une torsion de **deux** tours, il est facile d'effacer cette torsion, en laissant les extrémités fixes, et en déformant le reste de la courroie. Deux tours équivaut à zéro tour.

3.7.2. Les matériaux ferromagnétiques; les ferrimagnétiques.

Personne ne sait pourquoi, mais on sait bien en profiter: quelques métaux (fer, cobalt, nickel, cérium), quelques alliages, quelques oxydes (des ferrites, comme la magnétite, Fe_3O_4) sont des aimants. Autrement dit, au lieu de s'annuler les uns les autres, les moments magnétiques d'un électron de certains atomes voisins dans certaines formes cristallines, coopèrent pour s'aligner tous dans la même orientation magnétique. Il en résulte un fort champ magnétique dans ces matériaux; par exemple dans le fer.



. 3.13. Possible domain structures in a square single crystal slab of iron having the top and bottom faces in the (001) plane.

Pourtant, à notre échelle, nous sommes persuadés que le fer *doux* (avec moins de 0,2% de carbone) n'est pas aimanté.

C'est parce que notre échelle est incompétente: en réalité, le fer, en dessous de 774°C, est partout aimanté à fond.

Mais il s'organise en petits domaines, qui referment tous leurs champs en circuits fermés. Ces **domaines de Weiss** ont des dimensions de l'ordre de 0,1 mm, ou moins encore.

MAGNETIZATION AND DOMAIN STRUCTURE [CH. 3, §

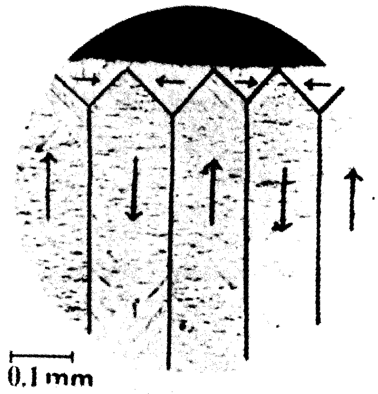


Fig. 3.14. Closure and lamellar domains observed on the (001) surface o silicon–iron (Chikazumi [1964]).

Sous l'action d'un champ magnétique extérieur, dans le fer doux, les domaines orientés dans le sens coopératif grossissent aux dépens des domaines opposés. Ainsi le fer renforce tout champ magnétique extérieur.

Quand tous ses domaines sont bien orientés, le fer est dit **saturé**. Cela arrive aux environs de 2 teslas.

L'existence des ferromagnétiques, c'est ce qui rend possible toute l'électrotechnique: les moteurs électriques, les transformateurs, les relais, les électro-aimants.

C'est ce qui rend possible toute l'électrotechnique: les moteurs électriques, les transformateurs, les relais, les électro-aimants.

Certains alliages peuvent être élaborés pour que les parois des domaines de Weiss soient bloquées: ce sont des aimants permanents. De nos jours, on utilise surtout des ferrites comme aimants permanents. Par exemple dans les hauts-parleurs, dans des petits moteurs à courant continu, dans les alternateurs de vélos.

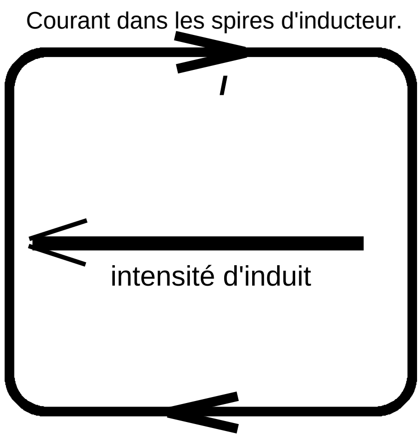
Enfin la Terre est un aimant naturel. Mais on ne sait pas l'expliquer. Et il se retourne de temps en temps...

3.8. Le principe des moteurs électriques.

Sachant le sens du courant dans l'élément d'induit d'un moteur à courant continu, prévoir le sens de rotation. **Le dessiner par une flèche**.

La figure est tracée dans le plan de l'entrefer, qui sépare les pièces pôlaires, du rotor, ou induit. On voit le sens du courant dans les enroulements de l'inducteur. La flèche centrale représente l'intensité dans un brin d'induit.

Que l'enroulement soit devant ou derrière la page, n'a aucune importance.

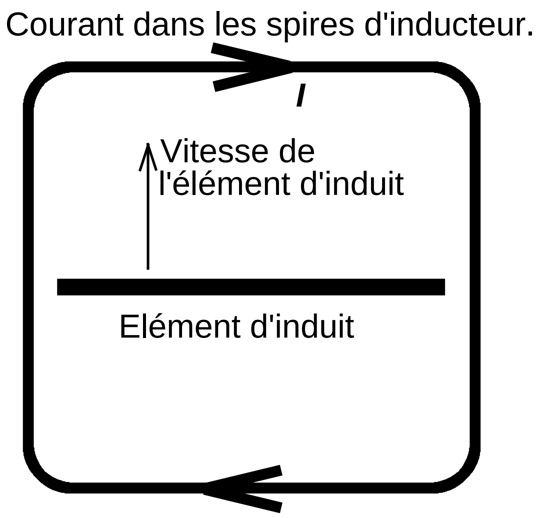


3.9. Les moteurs sont réversibles: générateurs.

Prenons le cas d'un brin conducteur d'induit, se déplaçant devant une pièce polaire d'inducteur. On sait dessiner le sens du courant dans les spires d'inducteur.

Le schéma est entièrement dans le plan de la spire, parallèle au plan déterminé par la vitesse du brin d'induit passant devant la pièce polaire, et par le brin conducteur lui-même.

Votre mission est de prévoir le sens de la f.é.m. dans l'induit. Le + est à droite, ou à gauche?



Dès qu'un moteur à courant continu tourne, il commence à se comporter en générateur: il produit donc une force électromotrice, qui vient en opposition à celle du générateur qui l'alimente, et qui diminue la consommation. Au delà d'une certaine vitesse, ce moteur devient le principal générateur. Pour les alternateurs, l'étude du phénomène est plus difficile: il faut tenir compte de la fréquence, de la tension, et de la phase.

Aucun moteur ne pourrait avoir une taille ni un rendement acceptable, sans le providentiel renforcement du champ magnétique, et à sa canalisation, par les matériaux magnétiques: le fer des pièces polaires, le fer du rotor, le fer des carcasses magnétiques.

4. Résumons par un tableau les trois champs que nous connaissons désormais, et leur corps d'épreuve:

Type de champ	corps d'épreuve du champ?	quoi produit le champ?	géométrie	Potentiel associé	Forme mathé-matique...	du champ	du potentiel	de la force
champ de gravité	tout corps matériel.	Tous les corps matériels.	Vecteur: m /s²	Scalaire: m² /s²	pour masse ponctuelle **m**.	$\frac{\eta.m}{R.\vec{R}} = (\vec{R})^{-1}\frac{\eta.m}{R}$	$-\frac{\eta.m}{R}$	$\frac{\eta.m.m'}{R.\vec{R}}$,
champ électrique	toute charge électri-que.	des charges électriques.	Vecteur. Unité: V / m.	Scalaire: volt, ou J / C.	pour charge ponctuelle **q**.	$\frac{-q}{4\pi\varepsilon_0.R.\vec{R}}$	$\frac{q}{4\pi\varepsilon_0.R}$	$\frac{-q.q'}{4\pi\varepsilon_0.R.\vec{R}}$
champ magnétique	toute charge électri-que en mouvement.	des charges électriques en mouvement, des courants, des aimants.	Tourneur: Unité: weber, ou V. s . m^{-2}.	Vecteur: V. s / m (Volt/vitesse).	pour élément de courant $q.\vec{v}$.	$\frac{\mu_0}{4\pi R.\vec{R}} \wedge q.\vec{v}$	$\frac{\mu_0}{4\pi}.\frac{\vec{v}\ q}{R}$	$\frac{-\mu_0 qq'(\vec{v}.\vec{v}')}{4\pi R.\vec{R}}$
Onde électroma-gnétique	Toute charge élec-trique, atomes.	Tout changement de posi-tion ou de vitesse d'une charge électrique.	Tourneur en di-mension 4: temps + espace.	Vecteur en di-mension 4: temps + espace.				
Champ nucléaire (fort): champ à très courte distance: juste un noyau atomique.	protons, neutrons	protons, neutrons						

On remarque que l'expression du potentiel a toujours un degré de difficulté et de complication en moins. Pour le champ électrique et le champ de gravité, le potentiel n'est qu'un scalaire, et il ne varie que comme $\frac{1}{R}$.

Pour le potentiel magnétique, il ressemble beaucoup au courant électrique qui lui donne naissance: il exprime l'extension de la "*colle*" qui relie les charges électriques entre elles. Il a le sens du courant électrique, mais il s'étend tout autour du fil conducteur, en diminuant avec la distance, comme $\frac{1}{R}$.

Dans tous les cas de champ électromagnétique (électrique + magnétique), la force est sur la droite qui relie les deux charges. Le champ magnétique n'est donc bien qu'une modification du champ électrique, due aux mouvements des charges.