Electromagnétisme

Electrostatique

1.1 Charges électriques

1.2 Loi de Coulomb

1.3 Champs

1.4 Charges dans la matière: conducteurs / isolants

En résumé

1.1 Charges électriques

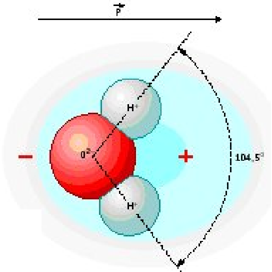
• Nous savons aujourd'hui que beaucoup des propriétés physiques et chimiques de la matière, de l'atome au solide et à la matière vivante, sont liées aux « **forces électriques** », c'est à dire aux interactions entres « **charges électriques** ».

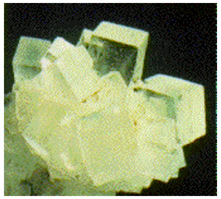
• L'électrisation des corps à longtemps été perçue comme un phénomène extraordinaire et sujet de nombreuses controverses (*existence ou non de l'éther*?). Sa compréhension, ainsi que celle du lien entre électricité et magnétisme, est due aux savants du XIX^{e} siècle.

•J.C. Maxwell donna une description synthétique de l'***électromagnétisme***, et des physiciens et chimistes du début du XX^{e} siècle élucidèrent la nature atomique de la matière.

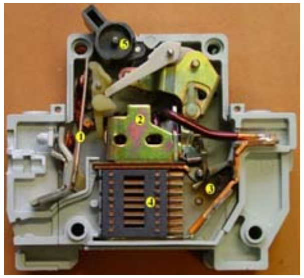
1.1 Charges électriques

Electrostatique …

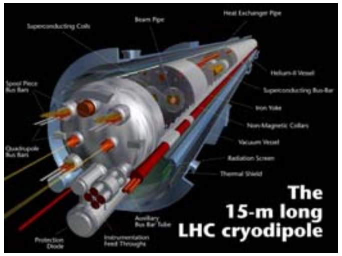




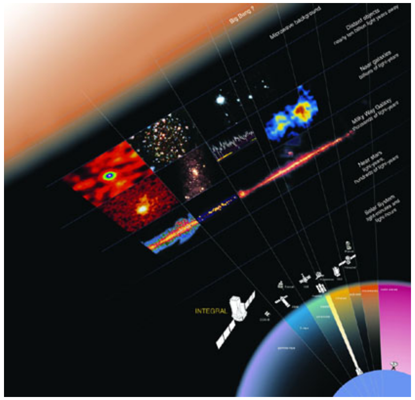
Induction électromagnétique …



Aimants supraconducteurs …



Ondes électromagnétiques …



1.1 Charges électriques

• La charge électrique, comme la masse, est une propriété de la matière. Deux corps « chargés » interagissent, soit en « s'attirant » soit en «se repoussant ». Ceci a conduit à séparer les particules chargées en deux catégories, les charges « positives » et « négatives ». Deux corps qui se repoussent appartiennent à la même classe.

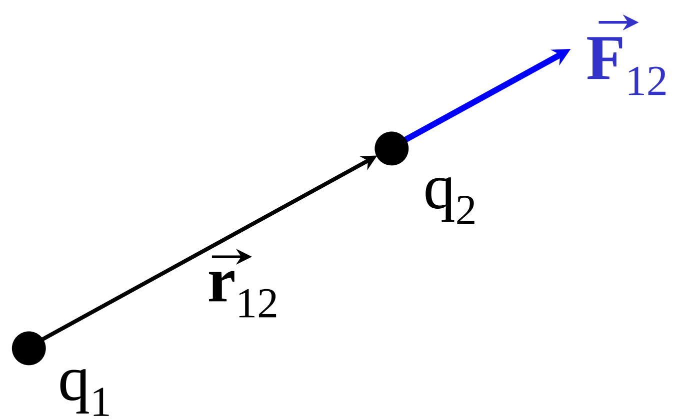
• La charge électrique est une propriété des particules élémentaires. Elle est **conservée** et **quantifiée**. La charge « -e » est la charge de l'électron, où la valeur de « e » est voisine de $1.602e^{-19}$.

La charge électrique totale d'un système isolé reste toujours constante.
Elle est donnée par la somme algébrique des charges positives et négatives des particules élémentaires constituant le système à un instant donné.

1.2 Loi de Coulomb

• De façon similaire à la gravité, la **force s'exerçant entre deux corps stationnaires chargés**, de charges respectives q_1 et q_2 est **proportionnelle au produit des charges** q_1q_2 et **inversement proportionnelle au carré de la distance** séparant les deux charges. La force est parallèle au segment joignant les deux charges et **orientée**, compte tenu du signe des charges. Il s'agit de la **loi de Coulomb**. La force de Coulomb **agit à distance**.

• Nous devons donc calculer la force (vecteur) s'exerçant par la particule ***2*** sur la particule ***1*** en se référant au vecteur $\vec{\mathbf{r}}_{12}$ qui va de ***1*** à ***2*** (ou vice versa). Si les deux charges sont de même signe, les particules se repoussent et la force résultante est dirigée dans le même sens que $\vec{\mathbf{r}}_{12}$.



$$\boxed{\vec{\mathbf{F}}_{12} = k\,\frac{q_1q_2}{|\vec{\mathbf{r}}_{12}|^2}\,\frac{\vec{\mathbf{r}}_{12}}{|\vec{\mathbf{r}}_{12}|}}$$

• Dans le système international (SI), les charges s'expriment en *Coulombs* (C) et les distances en *mètres*. La constante k vaut $8.9875\ 10^9$ (SI). Elle vaut 1 dans le système d'unité CGS (système d'unités « électrostatiques » qui fixe les dimensions de la charge électrique et la valeur de l'unité de charge en fonction d'autres grandeurs fondamentales). Nous essaierons, dans la mesure du possible de nous limiter au système international d'unités.

• Pour des raisons qui apparaîtront (peut-être plus claires) plus loin dans ce cours où dans votre progression dans le monde de l'électromagnétisme (et de la relativité), la constante de proportionnalité k est mise sous la forme:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}$$

• ε_o est appelée ***permittivité du vide*** et vaut $\boldsymbol{\varepsilon_o = 8.\ 854\ 10^{-12}}$ (SI)

1.3 Champs

Si nous considérons que la charge q_1 est une « charge test », et que la charge q_2 (ou toute autre répartition de charges autres que q_1) est la « source » de la force électrostatique agissant sur la charge test située à la position $\vec{\mathbf{r}}$, alors la force agissant sur la charge test peut s'écrire:

$$\vec{\mathbf{F}} = q_1 \frac{kq_2}{|\vec{\mathbf{r}}_{12}|^2} \frac{\vec{\mathbf{r}}_{12}}{|\vec{\mathbf{r}}_{12}|} = q_1 \vec{\mathbf{E}}(\vec{\mathbf{r}})$$

Dès lors qu'il n'y a plus ambiguïté entre la charge « test » (système considéré) et les charges « sources » (système extérieur), l'indice sur la charge test peut être enlevé et la force s'exerçant sur la charge test s'écrit:

$$\vec{\mathbf{F}}(\vec{\mathbf{r}}) = q\,\vec{\mathbf{E}}(\vec{\mathbf{r}})$$

$\vec{\mathbf{E}}(\vec{\mathbf{r}})$ **est le champ électrique** (champ de vecteur électrique). Il règne en tous points de l'espace. **Il agit localement sur la charge test.**

Nous ne l ' aborderons qu ' à peine dans ce cours , mais dès lors que des charges sont en « mouvement rapide », il faut tenir compte des ***effets relativistes*** (relativité ou interdépendance des distance et du temps, de la masse apparente et de l'énergie).

La conséquence de ***charges sources en mouvement***, est qu'elles exercent sur une charge test, elle même en mouvement, une force supplémentaire. Le champ agissant sur la charge test possède alors une composante supplémentaire - qui donne naissance à la **force de Lorentz**. Il s'agit du **champ magnétique** $\vec{\mathbf{B}}$. La théorie montre qu'il y a une relation entre E et cB pour l'amplitude de l'effet des champs électrique et magnétique où c est la vitesse de la lumière (effet de B beaucoup plus faible que l'effet de E).

$$\vec{\mathbf{F}} = q\,(\,\vec{\mathbf{E}} + \vec{v} \wedge \vec{B}\,)$$

force colinéaire à $\vec{\mathbf{E}}$

force perpendiculaire à $\vec{\mathbf{v}}$ et $\vec{\mathbf{B}}$

1.4 Charges dans la matière: conducteurs / isolants

Dans la matière, les charges électriques peuvent être « libres » (ou quasiment), ou alors « liées » (électron lié à un ion, particule chargée adsorbée, etc.). On distingue au point de vue du comportement électrique trois états de la matière: **conducteur** (ou métallique), semi-conducteur et **isolant** (ou diélectrique), dont la présentation relève du cadre d'un cours de physique du solide.

conducteur: dans un conducteur (électronique ou ionique) des charges électriques **q** à une certaine concentration **n** (nombre par unité de volume) sont libres (plus ou moins) de se mouvoir sous l'action d'un champ électrique $\vec{\mathbf{E}}$. Elles acquièrent alors une vitesse $\vec{\mathbf{v}}$ proportionnelle au champ (***loi d'Ohm***): $\vec{\mathbf{v}} = \mu_q \vec{\mathbf{E}}$. La quantité μ_q s'appelle la mobilité électrique.

Le produit $n q \vec{\mathbf{v}}$ à les dimensions $[CT^{-1}L^{-2}]$, c'est à dire d'un courant (débit de charges par unité de temps) divisé par une surface. On parle alors de densité de courant $\vec{\mathbf{j}}$ « **de conduction** ».

$$\vec{\mathbf{j}} = n\, q\, \vec{\mathbf{v}} = n\, q\, \mu_q \vec{\mathbf{E}} = \sigma \vec{\mathbf{E}}$$

1.4 Charges dans la matière: conducteurs / isolants

à une dimension: $\vec{\mathbf{j}} = \sigma \vec{\mathbf{E}}$ donne : $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$

Or pour un conducteur de section S et de longueur L on a:

$R = \rho \dfrac{L}{S} = \dfrac{1}{\sigma}\dfrac{L}{S}$ et $U = LE = RI = \dfrac{1}{\sigma}\dfrac{L}{S} jS$ soit $\boxed{U = RI \quad \Leftrightarrow \quad j = \sigma E}$

isolant: dans un isolant, les charges électriques ne peuvent bouger sous l'action d'un champ électrique, ***que d'une toute petite distance*** autour des « attracteurs » auxquels elles sont liées par une force de rappel (qui les empêche de se déplacer librement).

Aucun courant continu ne peut ainsi être généré et seuls les « déplacements » infimes des charges liées, *où les barycentres des charges positives et négatives ne coïncident pas tout le temps* peuvent donner naissance à un « **courant de polarisation** » en régime variable dans le temps (e.g. alternatif) .

En résumé:

• dans l'univers il y a des **charges électriques** qui interagissent entre elles.

• des charges ***en mouvement*** génèrent des **courants électriques**.

• ces charges engendrent des **champs électrique et magnétique**.

• toutes ces grandeurs, plus quelques **constantes fondamentales** (c, ε_o, μ_o), sont reliées entre elles par un ***ensemble cohérent d'équations*** :

la théorie électromagnétique

- **structure & propriétés de la matière** ***(physique, chimie, vivant…)***
- **électrotechnique** : production & acheminement d'énergie,
  conversion énergie mécanique ↔ électromagnétique
- **télécommunication** : stockage et transmission de l'information

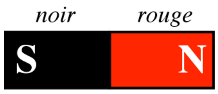
Electromagnétisme

Les champs magnétiques

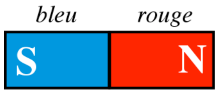
Les sources de champs magnétiques existent à l'état naturel (Terre, aimant naturel) ou peuvent être crées artificiellement (aimant, électro-aimant).

L'unité du champ magnétique $\vec{B}$ est le Tesla (T) Le champ magnétique se mesure avec un teslamètre.

Schéma d'un aimant :



ou



Bipolarité

Un champ magnétique possède toujours un pôle nord et un pôle sud. Ils sont indissociables.

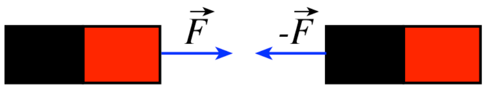
Si on casse un aimant …

… on obtient deux aimants.

Action d'un champ magnétique sur un aimant : attraction - répulsion

Si on approche deux pôles de même polarité, les aimants se repoussent.

Si on approche deux pôles opposés, les aimants s'attirent.

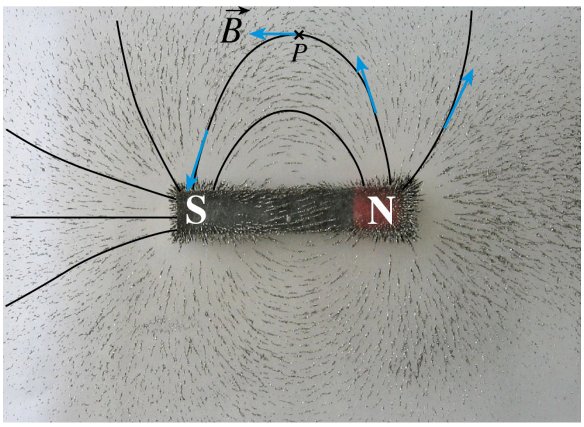


Les forces dépendent de l'intensité du champ magnétique et de la distance entre les deux aimants.

Visualisation du champ magnétique

Des grains de limaille de fer, saupoudrés autour d'un aimant, vont s'orienter selon les lignes de champ.

- Les lignes de champs montrent l'orientation du champ magnétique.
- La densité de lignes de champ informe sur l'intensité du champ magnétique.
- La figure formée par la limaille de fer s'appelle un spectre magnétique.



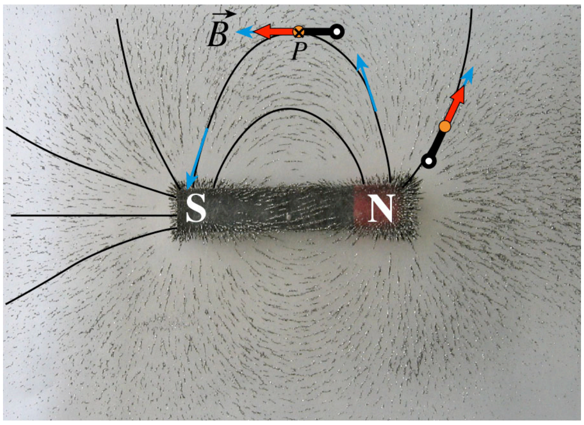
Spectre d'un aimant droit

+ symbolisation de quelques lignes de champs et quelques vecteurs « champ magnétique ».

Le champ magnétique $\vec{B}$ est une grandeur vectorielle. Il varie en direction et en intensité selon l'endroit considéré.

Observations

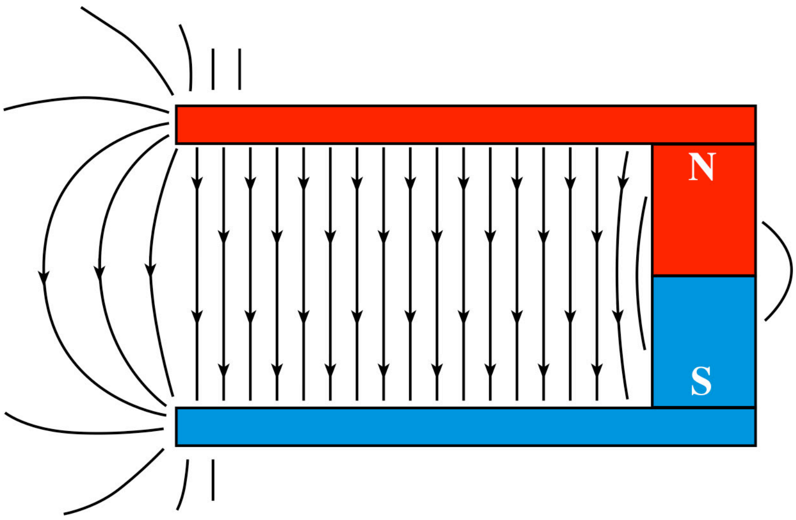
- Les lignes de champ vont du pôle nord vers le pôle sud.
- Le champ $\vec{B}$ est tangent aux lignes de champs.
- Si on place une boussole au point P, son pôle nord va s'orienter dans la direction de $\vec{B}$.



Les boussoles s'orientent selon les lignes de champ.

Internet

- simulation du spectre d'un aimant droit
  http://www.walter-fendt.de/ph11f/mfbar_f.htm



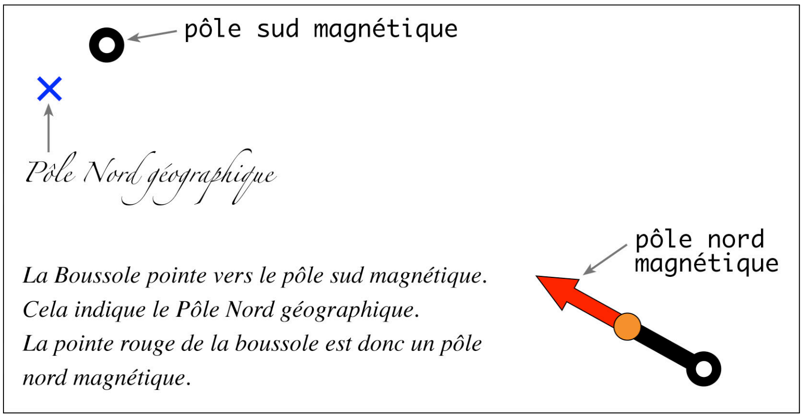
Ligne de champ entre les armatures d'un aimant en U.
(toutes les lignes de champ extérieures ne sont pas dessinées)

Observation

- A l'intérieur d'un aimant en U le champ magnétique est constant en intensité et en direction. On dit qu'il est <u>uniforme</u>.

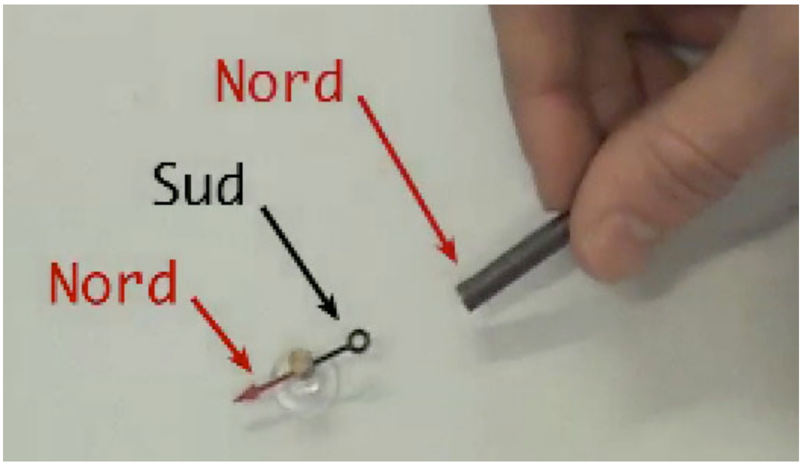
Comment déterminer le pôle d'un aimant

Il faut au préalable connaître la polarité d'un aimant.
Par exemple celui de la Terre (voir l'image ci-dessous)



Le pôle géographique et le pôle magnétique sont décalés de 11° par rapport au centre de la Terre.

Ensuite il suffit de constater la répulsion ou l'attraction entre l'aimant dont on veut déterminer les pôles et l'aimant dont on connaît la polarité.



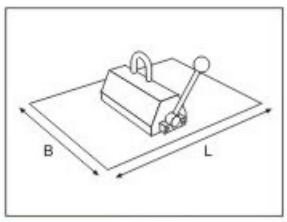
Le barreau aimanté présente un pôle nord à la boussole

Boussole

Attention, une boussole se désaimante et s'aimante en inverse facilement.

Utilisation industrielle

- Moteurs à aimants permanents
- Manutention



Crochet de manutention à aimant permanent
L'aimant est à l'intérieur de la boîte jaune.
La poignée permet d'approcher l'aimant près de l'objet (composé de fer) à manipuler.
Le crochet permet la manipulation avec un engin de levage (treuil par exemple)

Champ magnétique crée par un courant

La source microscopique d'un champ magnétique est le déplacement de charges électriques. Un courant électrique étant un déplacement de charges électrique va donc générer un champ magnétique. Cette propriété est utilisée dans de nombreux systèmes électrotechniques :

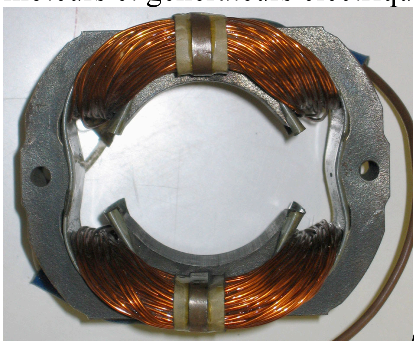
- électro-aimants (gachette de porte d'entrée, engin de levage de ferraille)

Sous l'effet du courant, l'axe de l'électroaimant se rétracte.
Source inconnue sur Internet

Electroaimant pour diverses applications industrielles.
Source inconnue sur Internet

Levage de boîtes de conserves
Source inconnue sur Internet

- moteurs et générateurs électriques

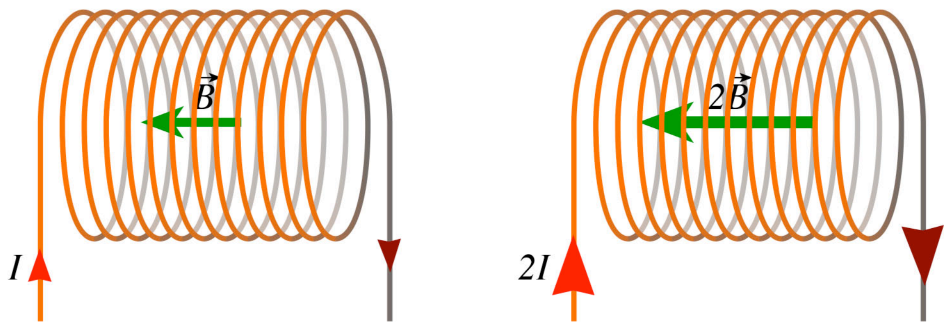


Stator d'un moteur bipolaire

- train à sustentation magnétique

Maglev - http://maglev.de/

L'intensité du champ magnétique est proportionnelle au courant qui le crée : $B = k \times I$



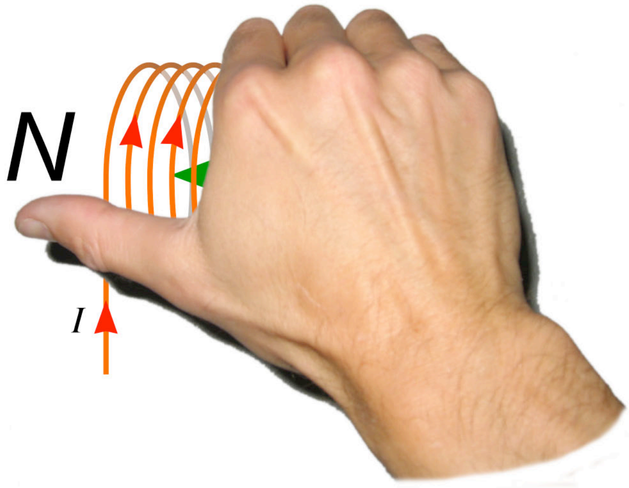
Si le courant double, le champ double.

Observation

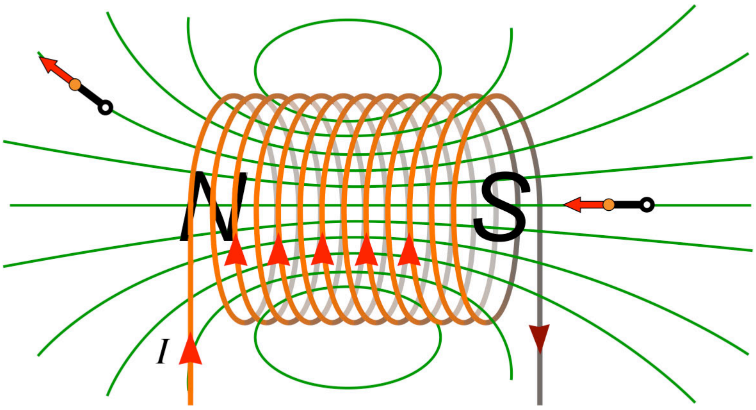
- Dans la grande majorité des applications magnétiques du courant, le fil électrique sera enroulé en bobine. Cela permet d'augmenter les propriétés magnétiques du courant en variant le nombre de spires et en plaçant au centre de la bobine un noyau ferromagnétique.

Polarité d'une bobine parcourue par un courant – règle de la main droite

Placer votre main droite sur la bobine pour l'entourer dans le sens de circulation du courant. Votre pouce vous indiquera la face Nord de la bobine.

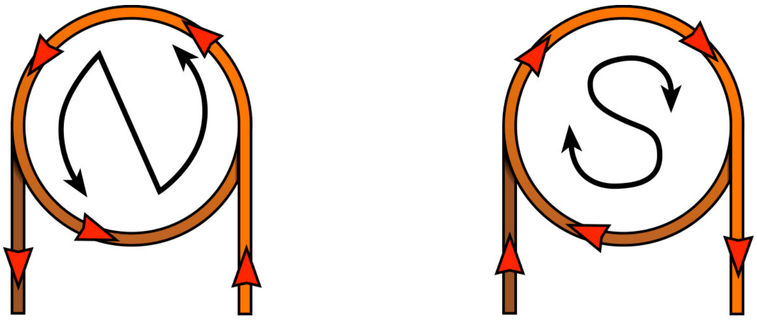


La règle de la main droite indique le pôle nord de la bobine.



Lignes de champ d'un solénoïde

Une autre façon pour déterminer les pôles d'une bobine est de la placer selon son axe et d'observer le sens de rotation du courant.



face nord ***face sud***

Champ magnétique au milieu d'un solénoïde.

Un solénoïde est une bobine qui possède une longueur *l* et une répartition uniforme de *N* spires.

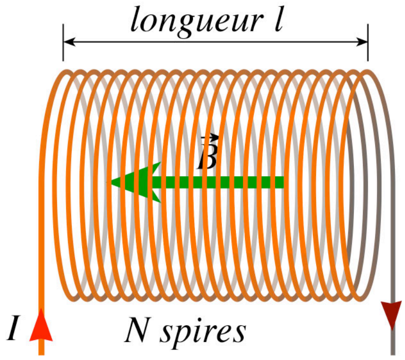
Nous avons vérifié expérimentalement que le champ magnétique s'exprimait de la façon suivante

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$

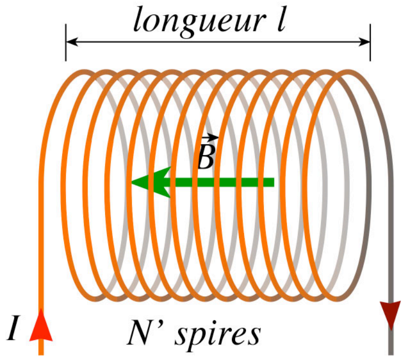
l en mètres (m) ; *I* en ampères (A) ; *N* nombre de spires

μ_0 est la perméabilité du vide (ou de l'air) :

$$\mu_0 = 4\pi.10^{-7} \text{ u.s.i.} = 1{,}257.10^{-6} \text{ u.s.i.}$$



Le champ produit par ce solénoïde sera plus intense…



… que celui-ci.

Excitation magnétique

Reprenons la formule $B = \mu_0 \frac{N}{l} I$

Les termes *N*, *l* et *I* dépendent de la source de champ magnétique (la bobine).
Le terme μ_0 dépend du milieu qui se trouve au centre de la bobine (l'air).

On définit l'excitation magnétique $\vec{H}$ qui ne dépend que de la source.

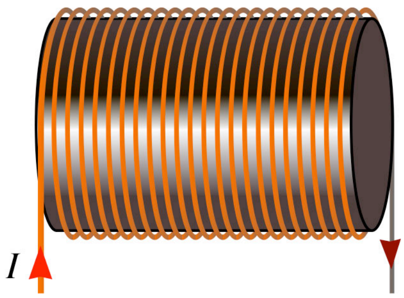
Pour le solénoïde l'intensité *H* (le module du vecteur) va s'exprimer :

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

H s'exprime en ampères par mètre ($A.m^{-1}$).

Milieu ferromagnétique

Si l'on place un noyau ferromagnétique (alliage à base de fer) dans la bobine, le champ sera plus intense. Cette propriété est utilisée dans les moteurs électriques et les transformateurs.

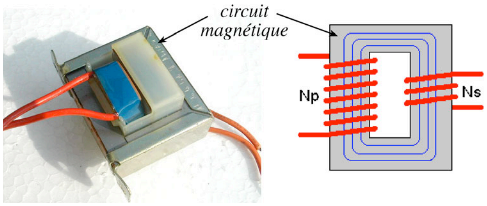


$$B = \mu \times H = \mu \frac{N}{l} I$$

μ est la perméabilité du matériau. μ est beaucoup plus grand que μ_0.

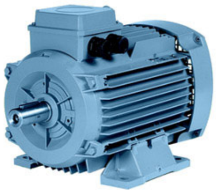
Application du ferromagnétisme

- transformateur : il transforme une tension sinusoïdale de tension efficace U_1 en une autre tension de valeur efficace U_2 plus grande ou plus petite que U_1. Le circuit magnétique canalise et intensifie le champ magnétique.



Sources inconnues sur Internet

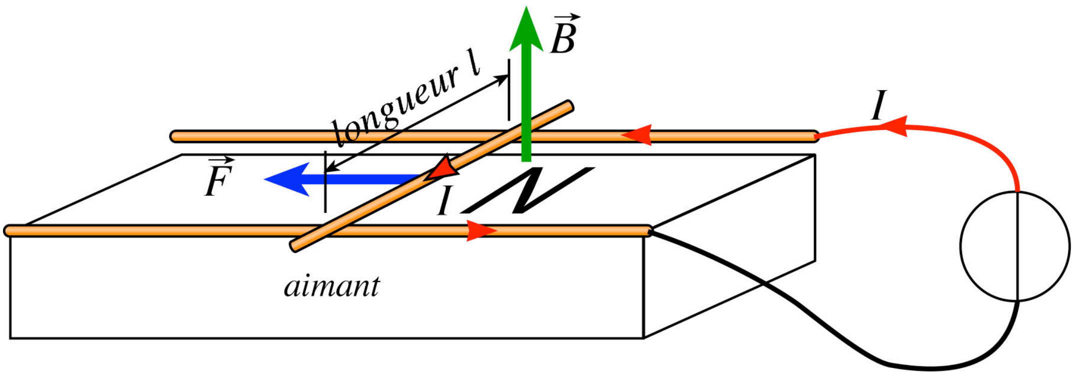
- Moteurs et générateurs électriques : tout le bâti en fer du moteur contribue au transfert d'énergie électromagnétique entre le rotor et le stator.



Source inconnue sur Internet

Force de Laplace

Vous avez pu constater que deux aimants peuvent s'attirer ou se repousser. Il existe donc une force magnétique. La force de Laplace est une des expressions de cette force.



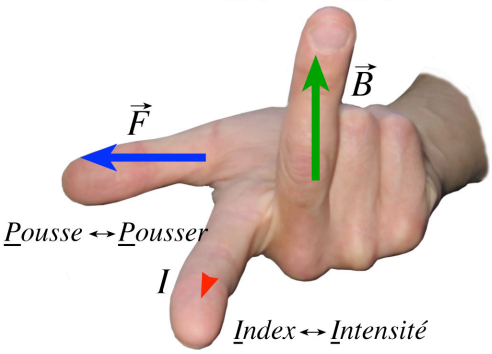
Expérience de Laplace : le barreau conducteur se déplace sur les deux rails. (vidéo)

Un conducteur de longueur l, placé dans un champ magnétique $\vec{B}$ et parcouru par un courant I, subit une force appelée force de Laplace.

$$F = I \times l \times B$$

F en newtons (N), I en ampères (A), l en mètre (m), B en tesla (T).

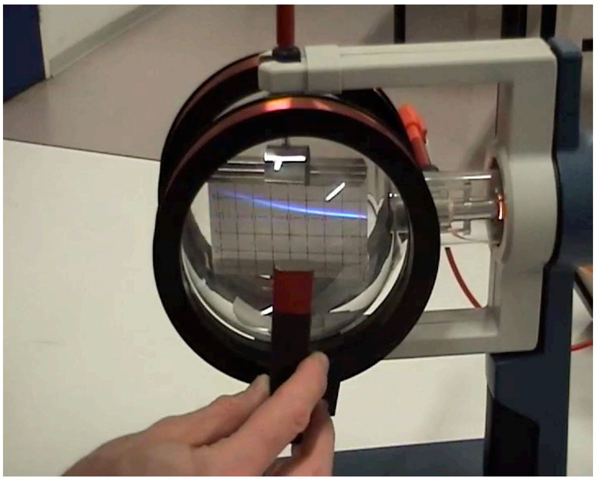
L'orientation de la force peut-être déduite par la règle des trois doigts de la main droite.



Règle de la main droite : dans l'ordre F, I, B équivalent à pousse, index, majeur.

Tout comme un repère orthonormé (x,y,z), les trois doigts forment un trièdre tri-rectangle direct.

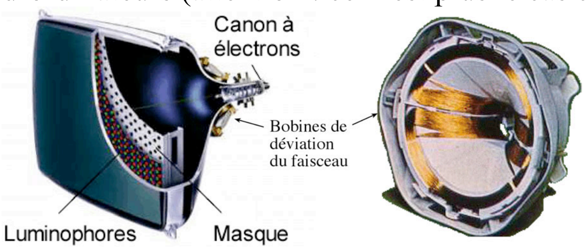
Un faisceau d'électrons étant un courant électrique dans le vide, subit également une force de déviation en présence d'un champ magnétique.



Déviation d'un faisceau d'électron.

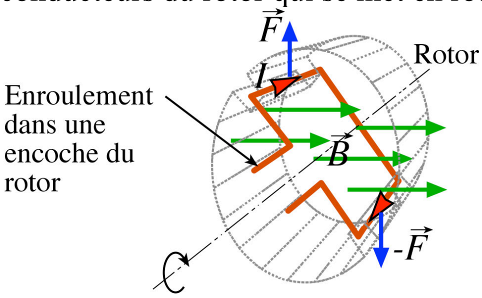
Application de la force de Laplace

- Téléviseur : c'est le principe utilisé dans les tubes cathodiques des téléviseurs et des écrans d'ordinateurs (attention : ce n'est plus le cas dans les écrans plats).

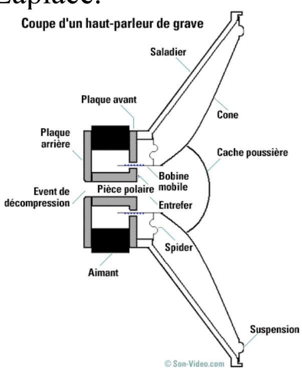


Source inconnue sur Internet

- Moteur électrique : le champ magnétique du stator applique des forces de Laplace sur les conducteurs du rotor qui se met en rotation.



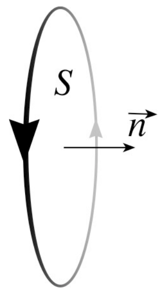
- Haut-parleur
  Le signal électrique fait vibrer la membrane du haut-parleur sur le principe de la force de Laplace.



Source www.son-video.com

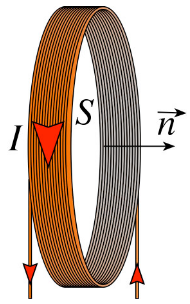
Vecteur surface

Soit une surface S délimitée par un cercle ; on choisit un sens de parcours sur le cercle et on définit le vecteur $\vec{n}$ unitaire normale à la surface avec la règle de la main droite (voir un paragraphe précédent).



On peut également définir le vecteur $\vec{S} = S.\vec{n}$

Pour une bobine parcourue par un courant, le sens de parcours sera donné par le sens du courant. Et donc $\vec{n}$ est orienté comme le champ magnétique généré par la bobine ($\vec{n}$ pointe vers la face nord de la bobine).



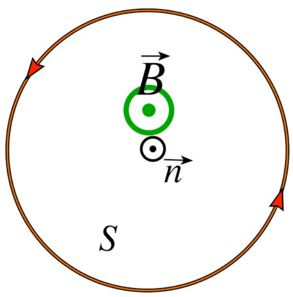
Représentation d'un vecteur perpendiculaire au plan de la feuille

$\odot$ ***Ce symbole est celui d'un vecteur qui pointe vers vous.***

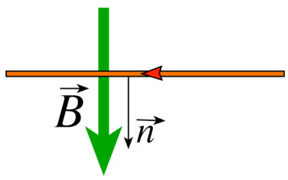
$\otimes$ ***Ce symbole est celui d'un vecteur qui s'éloigne de vous.***

Flux magnétique

Le flux magnétique représente la quantité de champ magnétique « vu » à travers les spires d'un enroulement (une bobine). Le flux change selon l'orientation de la bobine par rapport au champ magnétique.



Une spire traversée par un champ magnétique (vue de face).

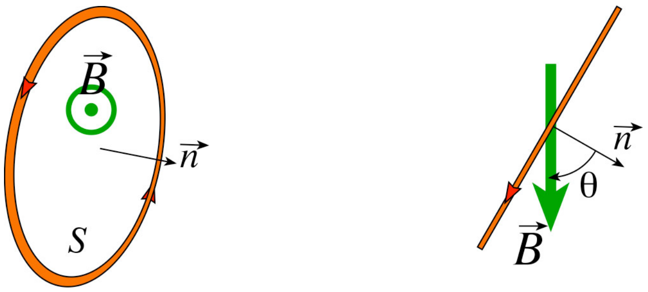


Vu d'au-dessus, l'angle entre la normale à la surface et le champ est nul.

L'angle $\theta = \left(\vec{B}\ \vec{n}\right)$ ***est nul.***

$\cos\theta = 1$

Le flux est maximum



La surface « vue » par le champ magnétique dépend de l'angle θ.

$S_{vue} = S \times \cos\theta$

Vu d'au-dessus, la normale à la surface et le champ s'écartent d'un angle θ (théta)

L'angle $\theta = \left(\vec{B}\ \vec{n}\right)$ ***fait 90°.***

$\cos\theta = 0$

Le flux est nul.

Le champ magnétique ne traverse pas la spire

Le flux magnétique Φ à travers un circuit est le produit du champ magnétique par la surface apparente que lui présente le circuit.

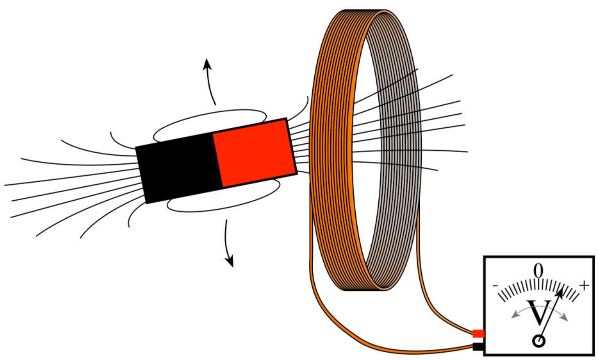
$$\Phi = B \times S \times \cos\theta$$

L'unité du flux est le Weber (Wb).

θ (théta) est l'angle entre la normale $\vec{n}$ à la surface et la champ magnétique $\vec{B}$.

Force électromotrice (fém ou f.é.m.)

Expérience : si on remue un aimant devant une bobine, non alimentée, on observe une tension à ses bornes.



Création d'une force électromotrice

Le champ magnétique applique une force sur les électrons de la bobine. Cette force induit une tension électrique appelée force électromotrice.

Dans quel cas observe-t-on une force électromotrice ?

- l'aimant bouge devant la bobine
- la bobine bouge devant l'aimant
- …

Dans quel cas la f.é.m. est nulle ?

- l'aimant est immobile par rapport à la bobine.

Plusieurs expériences permettent (voir sur www.physique-appliquee.net) de comprendre que pour observer une f.é.m. aux bornes de la bobine, il faut une variation de flux. D'où la loi de Faraday.

Loi de Faraday

Tout circuit soumis à une variation de flux, voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (tension) e telle que :

$$\text{fem (V)} \longrightarrow e = -\frac{d\Phi}{dt} \longleftarrow \begin{array}{l}\text{variation du flux } \Phi \\ \text{en fonction du temps } t\end{array}$$

Règle du flux maximum

Les interactions entre deux sources de champ magnétique sont telles que le flux devient maximum.

Exemple

- Cette règle permet d'expliquer la rotation des moteurs électriques comme le moteur à courant continu et le moteur pas à pas.

Induction électromagnétique et courant induit

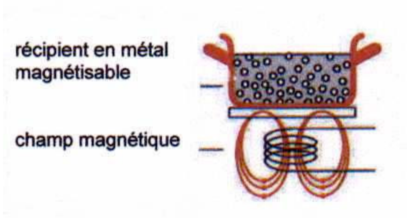
La bobine, soumise à une variation de flux, devient donc une source de tension électrique (f.é.m.).

Si on ferme le circuit de la bobine, un courant va s'établir. Comme il s'agit d'un courant induit par un champ magnétique, on parle de courant induit et d'induction électromagnétique.

Un champ magnétique, variable, induit un courant.

Exemples

- **Les alternateurs** des centrales électriques utilisent ce principe pour produire la tension et le courant du réseau EDF. Sans la rotation de la machine, il n'y aurait pas variation de flux et donc pas de f.é.m.
- **Le transformateur** utilise ce principe pour transférer l'énergie de la bobine primaire à la bobine secondaire. Pour qu'il y ait variation de flux, la bobine primaire du transformateur doit être alimenté en courant variable (sinuosïdal). En courant continu, le champ serait constant et la fem au secondaire nulle.
- **Frein à courant de Foucault** (voir plus loin).
- **Four à induction industriel**
  Un fort champ magnétique induit des courants dans le métal à fondre. Ce courant induit provoque des pertes par effet joule qui fait fondre le métal.
- **Plaque à induction.**
  Une plaque à induction produit un champ magnétique sinusoïdal à 5 kHz. Ce champ induit des courants dans la casserole (surtout le fond). Le fond de la casserole doit être suffisamment résistif pour que le courant induit génère de la chaleur par effet joule ($R.I^2$) qui chauffe le contenu.

 ***Principe***	
	Plaque à induction ouverte, on voit bien la bobine inductrice.

Auto-induction

Mettons une bobine sous tension.

1. Le courant génère un champ magnétique croissant.
2. Le champ magnétique croissant génère un flux magnétique croissant à travers la bobine elle-même (d'où le nom d'auto-induction).
3. Une f.é.m. et un courant induit apparaissent dans la bobine. Ils sont négatifs.
4. Le courant induit étant négatif, le champ magnétique induit s'oppose au champ magnétique inducteur (point 1). Ce principe est énoncé par la loi de Lenz.
5. Le champ résultant est la somme des champs inducteur et induit.
6. Le courant résultant est la somme des courants inducteur et induit.

Exemple

- La propriété principale des bobines (ou inductances, ou selfs) est basée sur l'auto-induction

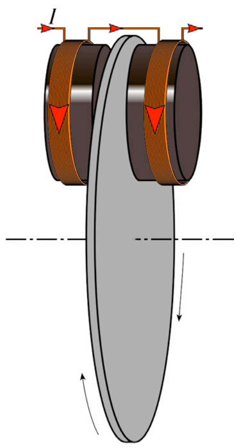
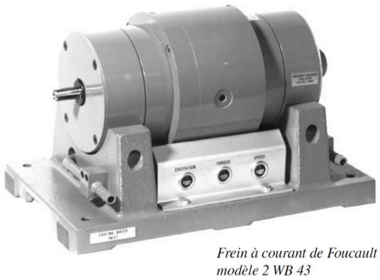
Bobine avec son noyau. Source e.m.c.2.free.fr/

Loi de Lenz

Le sens du courant induit est tel que les effets qu'il produit s'opposent à la cause qui lui donne naissance.

Exemples

- **Frein à courant de Foucault**
  Lorsque le chauffeur de camion appuie sur la pédale de frein, il alimente en courant les bobines des électroaimants. Le flux variable résultant, traverse le disque dans lequel apparaît des courants induits appelés courants de Foucault. Ces courants génèrent des forces qui s'opposent à la rotation du disque et freinent le camion.

		
Principe du frein à courant de Foucault	***Frein à courant de Foucault pour machines tournantes. Source www.magtrol.com***	***Les vélos de salon possèdent un frein à courant de Foucault. Source www.manor.ch***

- **Freinage du TGV**
  Le freinage de la rame est assuré par 4 modes de freinage
  * rhéostatique,
  * à courants de Foucault (rotatif),
  * oléopneumatique à sabots, utilisé pour les freinages d'appoint et d'arrêt,

* magnétique, utilisé pour les freinages d'urgence seulement.
http://www.emdx.org/rail/30ansTGV/

- **Céramique supra-conductrice**
  L'aimant tient en suspension au-dessus de la céramique du fait de l'apparition d'un courant induit qui provoque un champ magnétique qui s'oppose à l'aimant.


Source http://perso.wanadoo.fr/pignolos/college/3e_en+_supraconducteurs.htm

Inductance propre d'un circuit

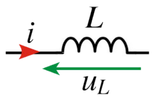
Nous avons déjà parlé précédemment du phénomène d'auto-induction.

Donc toute bobine est soumise à son auto-induction. C'est inévitable. On définit alors l'inductance propre (ou simplement inductance) du composant.

En combinant les différentes relations : $e = -\dfrac{d\Phi}{dt}$; $\Phi = B \times S$ et $B = \mu \dfrac{N}{l} I$,

on peut en déduire une relation donnant la tension u_L aux bornes de la bobine en fonction du courant i qui la traverse (en convention récepteur).

$$u_L = L.\frac{di}{dt}$$



où L, appelée inductance de la bobine, englobe les termes constants, μ, N, l, S des équations précédentes.

L se mesure en henry (H) – exemple : L=100 mH, u_L en volts (V), i en ampère (A), t en secondes (s)

Energie emmagasinée dans une bobine

Lorsqu'une bobine est mise sous tension, elle emmagasine une certaine quantité d'énergie sous forme magnétique. Cette énergie s'exprime.

$$W = \frac{1}{2} L I^2$$

I en ampère (A), L en henry (H), W en joules (J)

Plusieurs vidéos illustrant ce cours sont consultables en ligne à l'adresse :

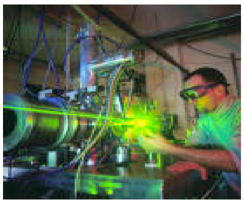
http://www.physique-appliquee.net/videos/index.php

Champs et Interactions

- La Physique a pour but de comprendre les concepts fondamentaux qui sont à la base de tous les phénomènes que nous observons. Ses apports théoriques et expérimentaux contribuent à l'évolution de la société en créant des matériaux originaux ou des instruments d'analyse très performants. La Physique est ainsi omniprésente dans notre vie courante : les lasers, le téléphone portable, l'ordinateur, le diagnostic et le traitement de certaines maladies… Elle est par ailleurs en constante évolution pour relever les défis posés par de nombreux phénomènes encore mal compris : élaboration et propriétés de matériaux supraconducteurs, états extrêmes de la matière, astrophysique, interactions fondamentales entre les particules de l'Univers, chaos sont des exemples de thèmes fondamentaux sur lesquels les chercheurs travaillent actuellement. Enfin, les principes, les méthodes et les techniques de la Physique sont à l'origine de nombreux échanges avec d'autres disciplines : chimie, informatique, sciences de l'ingénieur, sciences de la Terre et de l'Univers, biologie….

Nouveaux matériaux (Supraconducteurs)

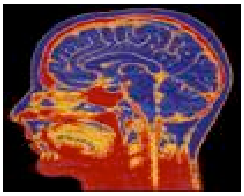
L'Univers et ses structures



Lasers

Production et transport de l'énergie

Télécommunications



Imagerie médicale

Quelques exemples de domaines d'applications de la Physique

➢ Entre 1600 et 1900, trois grands domaines se sont développés et constituent la Physique classique :

- la mécanique classique : étude du mouvement des solides, des fluides
- la thermodynamique : étude de la température, des transferts de chaleur, des propriétés de la matière à notre échelle.
- l'électromagnétisme : étude de l'électricité, du magnétisme, des ondes électromagnétiques et de l'optique.

La majorité des phénomènes qui nous sont familiers entrent dans l'un ou l'autre de ces domaines. A l'échelle des planètes et de l'Univers ou bien au niveau microscopique (noyaux, atomes, molécules…), de nombreux phénomènes ne peuvent néanmoins pas être correctement expliqués par la Physique classique. Le début du 20ème siècle a ainsi vu naître deux grandes théories qui visent à pousser plus loin notre description du monde :

- la Physique relativiste (développée par Einstein) qui s'applique à tous les objets animés de grandes vitesses (proches de celle de la lumière). Cette théorie nous a poussés à revoir en profondeur les concepts d'espace et de temps.
- la Physique quantique qu'il est nécessaire d'utiliser dans le monde microscopique. Cette théorie nous a également obligés à revoir en profondeur notre perception de la mesure des différentes grandeurs physiques.

I- Notion de force

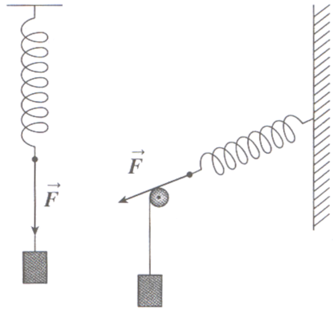
Le concept de force est ancien, mais il a mis longtemps à obtenir une définition utilisable. En effet, à la différence de grandeurs physiques telles que la longueur ou la masse, une force est une notion abstraite, qui ne peut être appréhendée par l'expérience directe et qui représente déjà une modélisation du monde. Les forces ne se voient pas, elles ne sont même pas réelles, elles ne sont qu'une explication d'effets visibles.

a) Généralités

- Les forces représentent l'influence d'un objet sur un autre en physique classique. Elles modélisent précisément, sous forme d'un vecteur $\vec{F}$, toute cause capable de modifier le mouvement d'un corps ou de le déformer.

Illustration : Prenons l'exemple d'un ressort dont on tire une extrémité. On constate que :

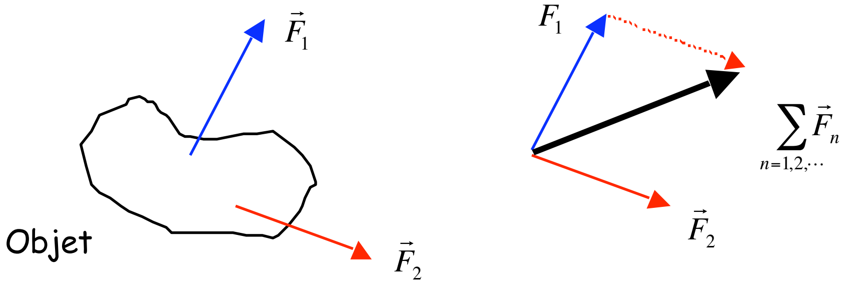
- le ressort prend la direction selon laquelle il est tiré
- il se déforme dans le sens de l'action exercée
- son allongement est proportionnel à l'intensité de l'action exercée.



En résumé, l'opération consistant à tirer sur le ressort a bien un caractère vectoriel. Le vecteur force $\vec{F}$ est défini par une direction et un sens identiques à ceux de l'action mécanique exercée. Sa norme, notée $\|\vec{F}\|$ ou plus simplement F est proportionnelle à l'intensité de l'effort.

Unité : F s'exprime en Newton (N)

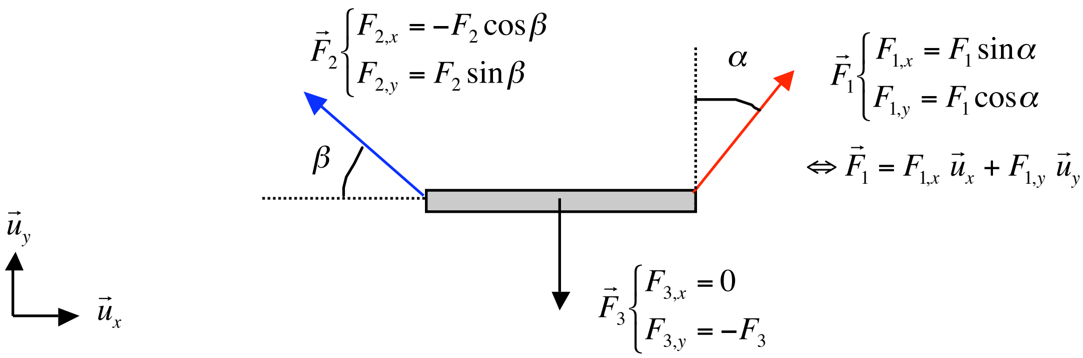
- Les forces appliquées étant des grandeurs vectorielles, elles peuvent être additionnées pour conduire à la résultante des forces :



Lorsque l'objet est à l'équilibre, toutes les causes du mouvement se compensent et la résultante $\sum_{n=1,2,\cdots} \vec{F}_n$ des forces est nulle. Il s'agit en réalité d'un cas particulier de la première loi de Newton (ou principe de l'inertie) que nous étudierons dans un prochain paragraphe.

Dans de nombreux cas, l'exploitation de la relation vectorielle $\sum_n \vec{F}_n = \vec{0}$ est facilitée par la projection des différentes forces sur les axes d'un repère cartésien judicieusement choisi.

<u>Rappel : Décomposition d'un vecteur dans une base cartésienne</u>

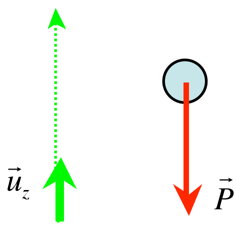


Base cartésienne

b) Exemples de forces

- Poids d'un corps

Il s'agit de la force qui modélise l'action de la Terre sur un corps de masse m

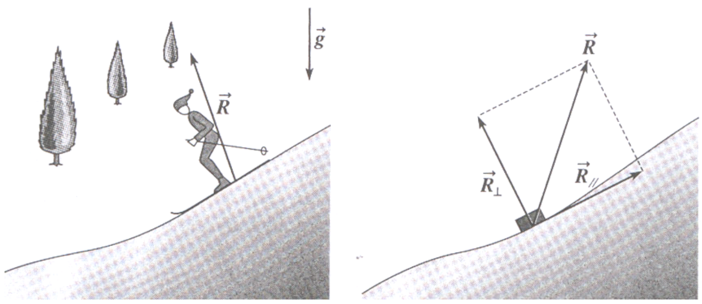


$$\vec{P} = -mg\,\vec{u}_z$$

g est l'intensité de la pesanteur : $g = 9.8\ N.kg^{-1}$ au niveau du sol.

- Réaction d'un support

Lorsqu'un objet est en contact avec une surface, la force de réaction $\vec{R}$ est la force qu'exerce la surface sur cet objet.



$$\vec{R} = \vec{R}_{//} + \vec{R}_\perp$$

La composante tangentielle $\vec{R}_{//}$ caractérise les frottements : elle appartient au plan tangent au support, et son sens est opposé au mouvement. La composante normale $\vec{R}_{\perp}$ est orthogonale au support et dirigée vers l'extérieur du support.

Exemple : Le sol exerce une force de réaction sur nous.

- Force de frottement fluide

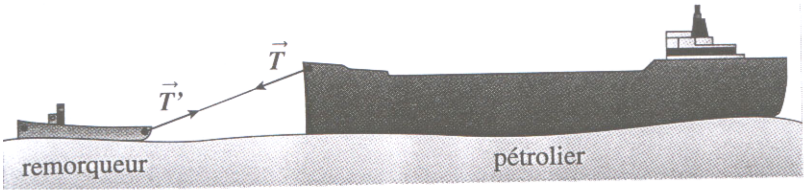
Lorsqu'une particule évolue dans un fluide, celui-ci la freine par l'intermédiaire d'une force de frottement $\vec{F}$ dont l'intensité est proportionnelle à la vitesse v.

$$\vec{F} = -\lambda \vec{v}$$

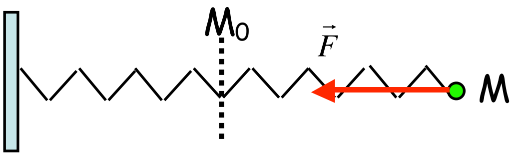
où $\lambda > 0$ est le coefficient de frottement et $\vec{v}$ le vecteur vitesse (vecteur tangent à la trajectoire, orienté dans le sens du mouvement et de norme égale à la valeur de la vitesse. Nous définirons plus précisément $\vec{v}$ dans un prochain paragraphe)

- Tension d'un fil

C'est la force qu'exerce le fil sur l'objet placé à son extrémité.



- Tension d'un ressort



Le ressort exerce une force de rappel $\vec{F}$ parallèle au ressort et proportionnelle au déplacement $\overrightarrow{M_oM}$ de son extrémité :

$$\vec{F} = -k\ \overrightarrow{M_oM}$$

k est la constante de raideur du ressort (Unité $N.m^{-1}$)

c) Les interactions fondamentales

Les progrès de la Physique sont marqués par une réduction dans le nombre des lois fondamentales et par une compréhension de phénomènes de plus en plus complexes en fonction de ces lois. C'est ainsi qu'au cours du 20ème siècle, on est arrivé à expliquer toutes les forces que nous percevons au moyen de 4 interactions fondamentales :

- Interaction gravitationnelle

C'est la seule force qui se manifeste de façon simple à notre échelle. Elle est attractive et son intensité est très faible. Toutefois, en agissant sur toutes les masses, elle constitue la force dominante de l'Univers. Elle est responsable de la cohésion des astres et du mouvement des planètes.
Par ailleurs, le poids $\vec{P}$ d'un corps est approximativement identique à la force d'attraction universelle exercée par la Terre.

- Interaction électromagnétique

Elle s'exerce entre des objets électriquement chargés. Les forces électromagnétiques sont les plus importantes car elles sont à l'origine de la structure atomique, de la liaison chimique, des forces intermoléculaires....Les forces de réaction d'un support ou de tension sont également d'origine électromagnétique. Néanmoins, vu l'imposante chaîne de complexité qui part de l'électron pour aboutir jusqu'à un objet ordinaire, il est illusoire de vouloir décrire ces forces macroscopiques en fonction des forces électromagnétiques élémentaires.

- Interaction faible

Elle est de courte portée et n'agit que sur certaines particules dont les électrons. Elle est responsable de la radioactivité. Sans elle, le soleil ne brillerait pas et il n'y aurait pas de vie sur terre.

- Interaction forte

Elle a une très courte portée et n'agit que sur certaines particules dont les protons et les neutrons. Elle permet d'expliquer la cohésion des noyaux.

Remarque : Les interactions faible et forte sont hors de portée de la mécanique classique et elles ne sont donc pas décrites en termes de forces.

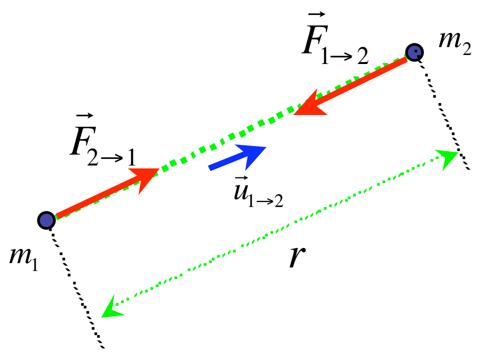
II- L'interaction gravitationnelle

L'histoire a retenu qu'en 1665, Isaac Newton eut l'idée de la gravitation universelle en contemplant la chute d'une pomme. En réalité, il s'appuya sur de nombreuses hypothèses émises depuis l'Antiquité et sur les travaux de ses contemporains (en particulier Copernic et Kepler). La théorie de Newton a ensuite été remise en cause en 1917 par Einstein lorsqu'il proposa le formalisme de la relativité générale.

a) Loi de la gravitation de Newton

- Enoncé

Deux corps ponctuels M_1 et M_2, de masses m_1 et m_2, exercent l'un sur l'autre des forces d'attraction opposées, dirigées suivant la droite qui joint les 2 points, de valeurs proportionnelles aux masses et inversement proportionnelles au carré de leur distance



$$\vec{F}_{1\to 2} = -\mathcal{G}\frac{m_1 m_2}{r^2}\vec{u}_{1\to 2}$$

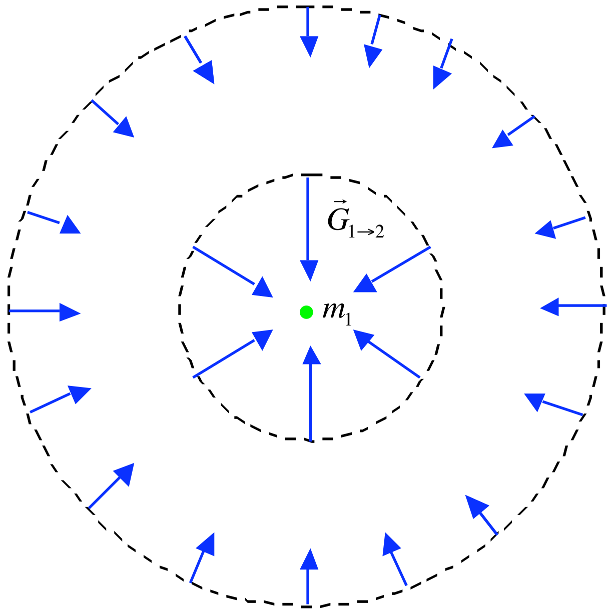
$\mathcal{G} = 6.67\ 10^{-11} N.m^2 kg^{-2}$ est la constante universelle de la gravitation

$\vec{u}_{1\to 2}$ est un vecteur unitaire porté par l'axe qui joint les 2 masses et orienté de M_1 vers M_2.

- Champ de gravitation

Considérons le rapport $\frac{\vec{F}_{1\to 2}}{m_2}$ entre la force gravitationnelle subie par le second point matériel et sa masse. Ce quotient est indépendant de m_2 et il représente l'influence à distance de la masse m_1 : on l'appelle vecteur champ de gravitation.

$$\vec{F}_{1\to 2} = m_2 \vec{G}_{1\to 2}$$
où $\vec{G}_{1\to 2} = -\mathcal{G}\frac{m_1}{r^2}\vec{u}_{1\to 2}$ est le champ de gravitation crée au point M_2 par la masse m_1

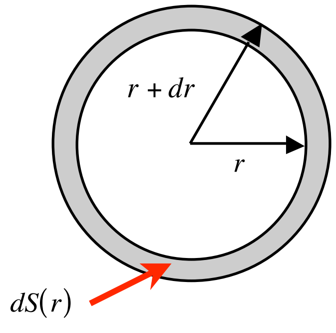


De façon générale, il règne un champ gravitationnel $\vec{G}$ en un point de l'espace si une masse témoin m y subit une force $\vec{F} = m\vec{G}$. $\vec{G}$ est la somme des champs créés par toutes les masses ponctuelles présentes dans l'espace. Il modélise la perturbation totale créée par les corps du fait de leur masse dans l'espace qui l'environne.

b) Détour mathématique : calcul différentiel

Il s'agit d'évaluer comment une grandeur physique se modifie lorsqu'on change très légèrement une de ses variables.

- Exemple : surface d'un disque



Circonférence $L(r) = 2\pi r$
Surface $S(r) = \pi r^2$

Si le rayon passe de r à $r + dr$ où dr est une quantité aussi faible que possible, la surface devient :

$S(r+dr) = \pi(r+dr)^2 = \pi\left(r^2 + 2rdr + dr^2\right)$ avec dr^2 négligeable par rapport à dr

La variation de surface est donc $dS(r) = S(r+dr) - S(r) = 2\pi r dr = L(r)dr$. Or $2\pi r$ est la dérivée de la fonction $S(r) = \pi r^2$ par rapport à r et on peut ainsi écrire :

$$dS(r) = S'(r)dr$$

- Généralisation

Dans une grandeur $f(x)$, si la variable passe de x à $x+dx$ où dx est une variation infinitésimale, la valeur de la fonction devient $f(x)+df(x)$ où $df(x)$ est la différentielle de la fonction f qui vérifie :

$df(x) = f'(x)dx$ où f' est la fonction dérivée.

$\Rightarrow$ Notation de Leibniz de la dérivée $f'(x) = \dfrac{df(x)}{dx}$

- Règles de différentiation

Nous raisonnerons sur 1 seule variable, mais les résultats obtenus sur les différentielles demeurent valables même si la grandeur physique dépend de plusieurs variables .

* $(u+v)' = u' + v' \;\Rightarrow \dfrac{d(u+v)}{dx} = \dfrac{du}{dx} + \dfrac{dv}{dx}$ et $d(u+v) = du + dv$

* $(uv)' = u'v + uv' \;\Rightarrow \dfrac{d(uv)}{dx} = \dfrac{du}{dx}v + u\dfrac{dv}{dx}$ et $d(uv) = vdu + udv$

* $(u^n)' = nu'u^{n-1} \;\Rightarrow \dfrac{d(u^n)}{dx} = n\dfrac{du}{dx}u^{n-1}$ et $d(u^n) = nu^{n-1}du$

* $(Ln\, u)' = \dfrac{u'}{u} \;\Rightarrow \dfrac{d(Ln\, u)}{dx} = \dfrac{1}{u}\dfrac{du}{dx}$ et $d(Ln\, u) = \dfrac{du}{u}$

c) Potentiel et énergie potentielle de gravitation

- Par définition, le potentiel de gravitation $V_{1\to 2}$ crée par la masse ponctuelle m_1 en un point quelconque M_2 est un scalaire donné par :

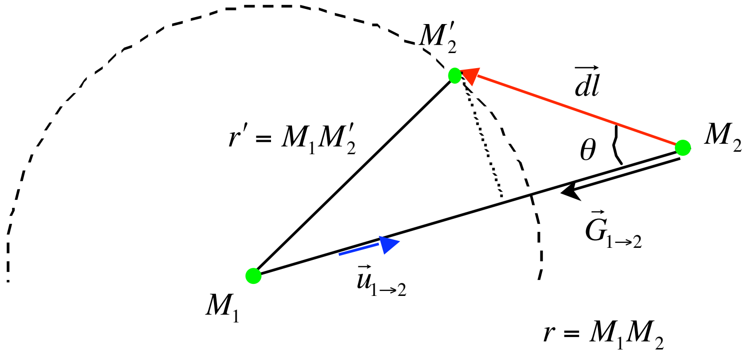
$$\boxed{V_{1\to 2} = -G\frac{m_1}{r}}$$

On peut alors réécrire le champ de gravitation $\vec{G}_{1\to2}$ à l'aide de ce potentiel puisque la fonction $-\frac{1}{r^2}$ est la dérivée, par rapport à la distance r, de $\frac{1}{r}$:

$$\frac{d(1/r)}{dr} = -\frac{1}{r^2} \Rightarrow \vec{G}_{1\to2} = -\frac{dV_{1\to2}}{dr}\vec{u}_{1\to2}$$

- Interprétation physique :

Imaginons que l'on déplace très légèrement le point M_2 pour l'amener dans une nouvelle position M_2' : le vecteur $\overrightarrow{M_2M_2'}$ est appelé déplacement élémentaire et on le note souvent $\vec{dl}$.



Ainsi $r' \approx r - dl\cos\theta$ et donc le potentiel en M_2' vaut :

$$V_{1\to2'} = -\mathcal{G}\frac{m_1}{r'} \approx -\mathcal{G}\frac{m_1}{r}\left(1-\frac{dl\cos\theta}{r}\right)^{-1} \approx -\mathcal{G}\frac{m_1}{r}\left(1+\frac{dl\cos\theta}{r}\right)$$

La variation du potentiel quand on passe de M_2 à M_2' s'écrit donc :

$$dV = V_{1\to2'} - V_{1\to2} = -\mathcal{G}\frac{m_1 dl\cos\theta}{r^2} = -G_{1\to2}dl\cos\theta$$

Pour une valeur dl de déplacement donnée, la plus grande diminution du potentiel est obtenue quand $\theta = 0$, c'est-à-dire quand on se déplace dans la direction et le sens du champ de gravitation.

Le vecteur champ de gravitation donne la direction et le sens dans lesquels la diminution du potentiel est maximale.

Analogie : Considérons un local dans lequel on a placé un climatiseur. Si la température T ne varie qu'avec la distance r par rapport au climatiseur, la direction et le sens dans lesquels on doit se déplacer pour un rafraîchissement optimum sont donnés par le vecteur $-\frac{dT}{dr}\vec{u}$ où $\vec{u}$ est un vecteur unitaire orienté du climatiseur vers le point où l'on se trouve.

- Une analyse similaire peut être menée au niveau de la force gravitationnelle $\vec{F}_{1\to 2} = m_2\vec{G}_{1\to 2}$ subie par une masse m_2 placée en un point où règne le champ $\vec{G}_{1\to 2}$. En effet :

$$\vec{G}_{1\to 2} = -\frac{dV_{1\to 2}}{dr}\vec{u}_{1\to 2} \Rightarrow \vec{F}_{1\to 2} = -\frac{dE^{(p)}_{1\to 2}}{dr}\vec{u}_{1\to 2}$$

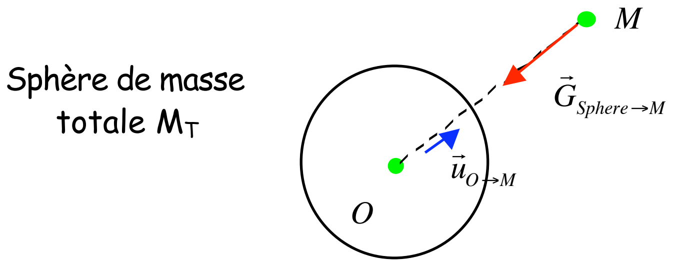
où $E^{(p)}_{1\to 2} = m_2 V_{1\to 2}$ est, par définition, l'énergie potentielle de gravitation. Là encore, la direction et le sens de la force sont ceux de la diminution maximale de l'énergie potentielle associée.

d) Champ gravitationnel crée par la Terre

- Jusqu'à présent, nous avons uniquement considéré les effets gravitationnels engendrés par une masse ponctuelle. En réalité, tous les résultats précédents demeurent, en partie, valables pour lorsque la source du champ est un objet dont la répartition de masse est à symétrie sphérique : la masse volumique ne dépend alors que de la distance par rapport au centre.

Exemple : une bille d'acier ou une balle de ping-pong présentent une telle symétrie. En première approximation, c'est aussi le cas du Soleil, des planètes et de leurs satellites.

Pour de tels systèmes, on démontre en effet (Théorème de Gauss), que le champ de gravitation crée en tout point extérieur à l'objet est identique à celui d'un corps ponctuel de même masse placé au centre de la sphère :



$$\vec{G}_{Sphere\to M} = -\mathcal{G}\frac{M_T}{r^2}\vec{u}_{O\to M} = -\frac{dV_{Sphere\to M}}{dr}\vec{u}_{O\to M} \text{ avec } V_{Sphere\to M} = -\mathcal{G}\frac{M_T}{r}$$

- Appliquons alors ce résultat à la Terre. En un point M d'altitude z, $r = R_T + z$ où R_T est le rayon de la Terre. De plus le vecteur unitaire $\vec{u}_{O\to M}$ est dirigé selon la verticale du point M et orienté vers l'extérieur de la Terre : il s'agit donc du vecteur que nous notons traditionnellement $\vec{u}_z$ lorsque nous repérons un point dans un repère cartésien.

$$\Rightarrow \vec{G}_{Terre\to M} = -\mathcal{G}\frac{M_T}{(R_T+z)^2}\vec{u}_z$$

A la surface de la Terre, $\left\|\vec{G}\right\| = G_o = \mathcal{G}\dfrac{M_T}{R_T^2} \approx 9.8\ N.kg^{-1}$ et ainsi :

$$\vec{G}_{Terre\to M} = -G_o \frac{R_T^2}{(R_T+z)^2}\vec{u}_z = -G_o\left(1+\frac{z}{R_T}\right)^{-2}\vec{u}_z$$

Pour des altitudes $z << R_T$, $\left(1+\dfrac{z}{R_T}\right)^{-2} \approx 1-\dfrac{2z}{R_T}$ et donc $\vec{G}_{Terre\to M} \approx -G_o\left(1-\dfrac{2z}{R_T}\right)\vec{u}_z$.

<u>Exemple</u> : pour $z = 30\ km$, la diminution relative du champ de gravitation par rapport à la surface de la Terre n'est que de 1% : $\dfrac{G_o - G}{G_o} = \dfrac{2z}{R_T} \approx \dfrac{2*30}{6400} \approx 0.01$

Dans une région de l'espace limitée à quelques kilomètres, le champ de gravitation terrestre est pratiquement constant en valeur et en direction : il peut être considéré comme uniforme, soit $\vec{G}_{Terre} \approx -G_o\vec{u}_z$ avec $G_o = \mathcal{G}\dfrac{M}{R_T^2} \approx 9.8\ N.kg^{-1}$.

Une masse m subit alors la force gravitationnelle $\vec{F} = m\vec{G}_{Terre} \approx -mG_o\vec{u}_z$, que l'on est fortement tenté d'assimiler avec le poids $\vec{P}$. En réalité du fait de la rotation de la Terre, ces 2 forces ne sont pas identiques. Néanmoins, elles diffèrent très peu : leur direction font un angle de quelques minutes au maximum et pour une même masse m, l'écart relatif de leur valeur est inférieur à 3.10^{-4}. Dans une très large approximation, on peut donc confondre le poids $\vec{P}$ et la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre :

$$\vec{P} = -mg\vec{u}_z \text{ avec } g \approx G_o = \mathcal{G}\frac{M_T}{R_T^2}$$

- Le potentiel gravitationnel crée par la Terre prend également une forme particulièrement simple :

$$V_{Terre\to M} = -\frac{\mathcal{G}M}{R_T+z} = -\frac{G_oR_T^2}{R_T+z} = -G_oR_T\left(1+\frac{z}{R_T}\right)^{-1} \approx -gR_T\left(1-\frac{z}{R_T}\right),$$

$$\text{soit } V_{Terre\to M} \approx gz + Cte$$

$\Rightarrow$ Energie potentielle d'une masse m $= E^{(p)}_{Terre\to M} = mV_{Terre\to M} \approx mgz + Cte$

Le poids $\vec{P}$ lui est directement relié par $\vec{P} = -\dfrac{dE^{(p)}_{Terre\to M}}{dz}\vec{u}_z$.

III- L'interaction électromagnétique

a) Rappels : la charge électrique

- S'il est frotté avec un tissu de laine, un morceau de plexiglas ou de PVC peut attirer des morceaux de papier ou des grains de poussière : la force correspondante porte le nom de force électrique.

- Ces phénomènes d'électrisation obéissent à plusieurs lois qualitatives :
    - l'électrisation peut être transférée d'un corps à l'autre
    - il existe 2 types d'électrisation conventionnellement qualifiées de positive et de négative
    - deux corps de même électrisation se repoussent alors que 2 corps d'électrisation différentes s'attirent
    - tout corps non électrisé est attiré par 1 corps électrisé quel que soit le type d'électrisation

- Les résultats expérimentaux sur l'électrisation ont été interprétés dès 1785 par Coulomb. Une explication plus profonde a été donnée lors de la découverte des particules élémentaires, comme l'électron en 1881. Il a ainsi été établi qu'une particule élémentaire est caractérisée par une électrisation indépendante de toute circonstance (état de mouvement, forces subies, environnement) et qu'on caractérise par une grandeur appelée charge électrique q (Unité : coulomb C)

- De nombreuses expériences (dont celle de Millikan en 1910) ont enfin montré que la charge électrique est quantifiée : elle ne peut varier que par multiples entiers d'une charge élémentaire $e = 1.6\ 10^{-19} C$.

Exemple : $q = -e$ pour l'électron, $q = +e$ pour le proton et $q = 0$ pour le neutron

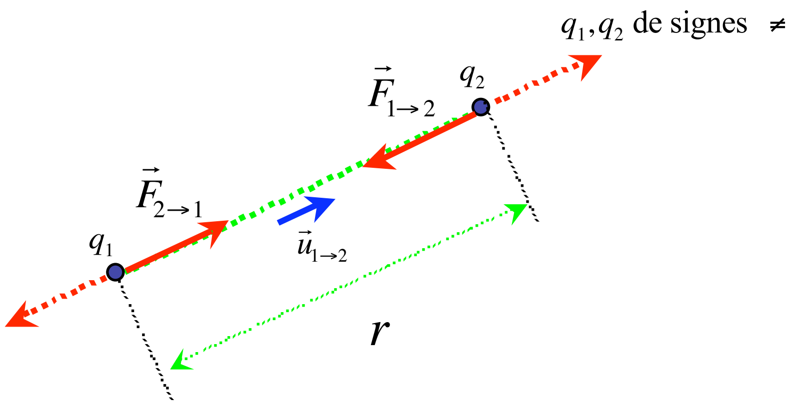
b) Charges au repos : loi de Coulomb, champ et potentiel électrique

- Enoncé

Dans le vide, deux particules au repos M_1 et M_2, de charge électrique q_1 et q_2, sont soumises à des forces directement opposées, dirigées suivant la droite qui joint les 2 points, de valeurs proportionnelles aux charges et inversement proportionnelles au carré de leur distance r :

$$\vec{F}_{1\to 2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1 q_2}{r^2}\vec{u}_{1\to 2}$$: Loi de Coulomb

ε_o est la permittivité du vide : $\frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \approx 9.10^9 N.m^2C^{-2}$

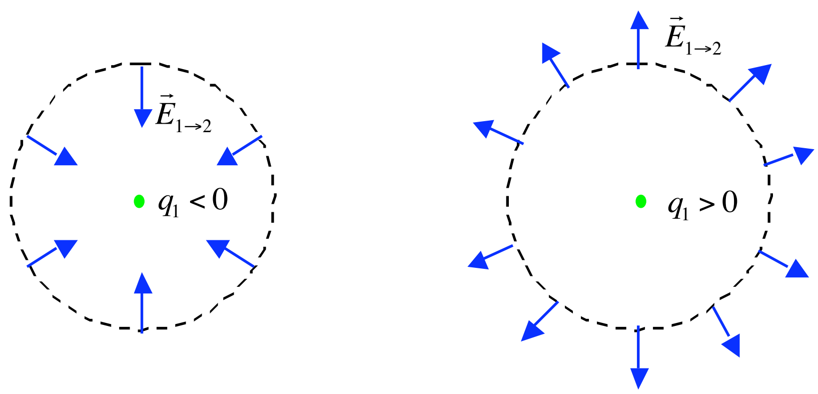


Les lois de l'électrostatique se déduisent de celles de la gravitation via la substitution $\mathcal{G} \to -\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_o}$, $m \to q$.

- Champ électrique

C'est l'analogue du champ de gravitation pour les phénomènes engendrés par les charges au repos. Le champ électrique $\vec{E}_{1\to 2}$ crée par une charge q_1 en un point quelconque M_2 est ainsi la force par unité de charge $\dfrac{\vec{F}_{1\to 2}}{q_2}$ subie par ce point :

$$\boxed{\vec{F}_{1\to 2} = q_2 \vec{E}_{1\to 2} \text{ avec } \vec{E}_{1\to 2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1}{r^2}\vec{u}_{1\to 2}}$$



De façon générale, il existe un champ électrique $\vec{E}$ en un point où une charge q y subit une force donnée par $\vec{F} = q\vec{E}$. Le vecteur $\vec{E}$ modélise la modification des propriétés physiques de l'espace qu'engendre la présence de charges électriques.

- Potentiel électrique

Comme pour le champ gravitationnel, on peut interpréter la direction et le sens du champ électrique comme ceux de la diminution maximale d'une grandeur appelée potentiel électrique V et exprimée en volts (V)

$$\vec{E}_{1\to2} = -\frac{dV_{1\to2}}{dr}\vec{u}_{1\to2} \text{ où } V_{1\to2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1}{r}$$

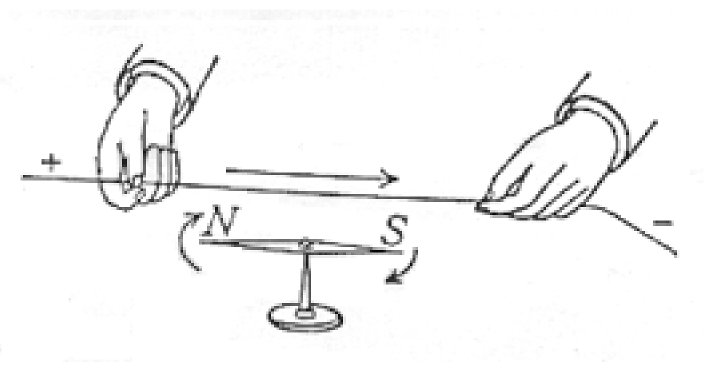
De même la force électrique $\vec{F}_{1\to2}$ est associée à une énergie potentielle $E^{(p)}_{1\to2} = q_2V_{1\to2}$: $\vec{F}_{1\to2} = -\frac{dE^{(p)}_{1\to2}}{dr}\vec{u}_{1\to2}$ et ainsi, la plus forte diminution de l'énergie potentielle est obtenue en se déplaçant dans la direction et le sens de la force.

Remarque :
Compte tenu des expressions précédentes , $E_{1\to2} = \frac{V_{1\to2}}{r}$

$\Rightarrow$ la valeur du champ électrique s'exprime naturellement en Vm^{-1}

c) Charges en mouvement : champ magnétique et force de Lorentz.

- Depuis l'Antiquité, on connaît des objets ayant la propriété d'attirer certains matériaux et d'interagir entre eux à distance : on les appelle des aimants permanents. En plaçant quelques petites boussoles dans le voisinage d'un aimant, on observe que chacune d'elles se stabilise dans une direction différente. C'est au début du 19ème siècle que l'étude du magnétisme progressa rapidement lorsqu'un lien avec l'électricité fut établi : en 1819, Oersted mit en évidence que l'aiguille aimantée d'une boussole, placée parallèlement dessous un fil électrique, s'oriente perpendiculairement au fil lorsqu'un courant électrique parcourt le conducteur.



Des effets semblables apparaissent en réalité dès qu'il y a mouvement de particules chargées que ce soit dans un conducteur solide (comme nous venons de voir), un conducteur liquide (mercure, électrolyte) ou encore dans le vide (faisceau d'électrons par exemple). Dans les aimants, ce sont schématiquement des courants microscopiques au niveau des atomes ou des molécules qui sont responsables des propriétés magnétiques (cette interprétation a été proposée pour la première fois par Ampère).

- De façon générale, des charges électriques en mouvement induisent de nouvelles perturbations dans l'espace qui les environne : on dit qu'elles créent un champ magnétique modélisé par un vecteur $\vec{B}$.

Unité : B s'exprime en tesla (T)

Le champ magnétique est logiquement à l'origine d'une nouvelle force qui agit sur toute particule chargée en mouvement. Son expression a été donnée par le physicien hollandais Lorentz :

$$\boxed{\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}}$$

$\vec{v}$ est le vecteur vitesse de la charge témoin q placée en un point où règne le champ $\vec{B}$: rappelons, pour l'instant, que $\vec{v}$ est un vecteur tangent à la trajectoire, orienté dans le sens du mouvement et dont la norme est la valeur de la vitesse.

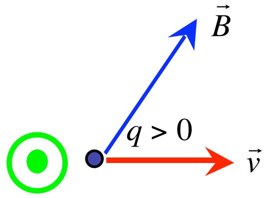
Le symbole « $\wedge$ » correspond à une opération mathématique particulière, appelée produit vectoriel et qui à 2 vecteurs $\vec{u}_1$ et $\vec{u}_2$ en associe un 3ème noté $\vec{u}_1 \wedge \vec{u}_2$, et possédant les caractéristiques suivantes :

* Direction perpendiculaire au plan des 2 vecteurs $(\vec{u}_1, \vec{u}_2)$

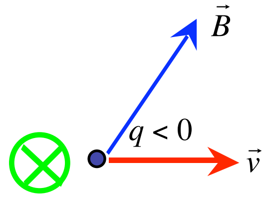
* Sens donné par la règle de la main droite : en plaçant le pouce selon le 1^{e} vecteur $\vec{u}_1$, l'index selon le second vecteur $\vec{u}_2$, le 3ème doigt donne le sens du produit $\vec{u}_1 \wedge \vec{u}_2$.

* Norme : $\| \vec{u}_1 \wedge \vec{u}_2 \| = \| \vec{u}_1 \| \,.\, \| \vec{u}_2 \| \,.\, | \sin(\vec{u}_1, \vec{u}_2) |$

Attention à ne pas confondre ce produit vectoriel avec le produit scalaire dont le résultat est le nombre $\vec{u}_1 . \vec{u}_2 = \|\vec{u}_1\| . \|\vec{u}_2\| . \cos(\vec{u}_1, \vec{u}_2)$.

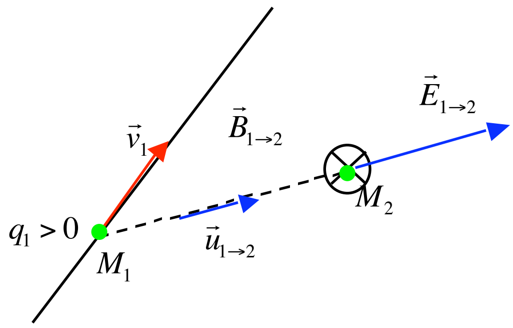


$$\vec{F} \begin{cases} \perp \text{ au plan de la feuille} \\ \text{dirigé vers l'oeil du lecteur} \end{cases}$$



$$\vec{F} \begin{cases} \perp \text{ au plan de la feuille} \\ \text{fuit l'oeil du lecteur} \end{cases}$$

- Expression du champ magnétique : l'exemple d'une charge en mouvement rectiligne uniforme (son vecteur vitesse est constant au cours du temps)



$$\vec{B}_{1\to 2} = \frac{\vec{v}_1 \wedge \vec{E}_{1\to 2}}{c^2}$$ où c est la célérité de la lumière dans le vide $\left(c \approx 3.10^8 ms^{-1}\right)$

En remplaçant le champ électrique par son expression et en introduisant la perméabilité magnétique du vide $\mu_o = c^2/\varepsilon_o$, on peut également écrire le champ magnétique précédent sous une forme proche d'une loi plus générale connue sous le nom de loi de Biot et Savart :

$$\vec{B}_{1\to 2} = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{q_1\vec{v}_1 \wedge \vec{u}_{1\to 2}}{r^2}$$

- Remarque importante : à la différence des phénomènes gravitationnels ou électrostatique, il n'existe pas de potentiel associé au champ magnétique et d'énergie potentielle associée à la force de Lorentz.

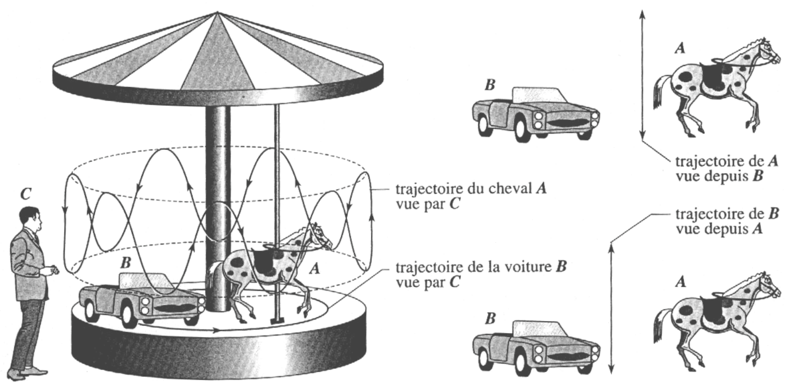
IV- Effets mécaniques des champs

a) Caractéristiques cinématiques d'un point matériel

- Commençons par rappeler que le mouvement est un phénomène relatif : la trajectoire d'un mobile dépend de l'observateur.

Exemple :

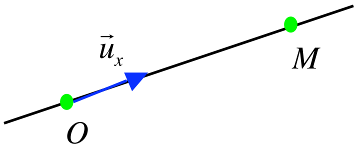
Cheval d'un manège animé d'un mouvement alternatif vertical par rapport au plateau du manège



Un mouvement ne peut donc être défini que par rapport à un système de référence (référentiel) choisi auparavant et auquel appartient l'observateur du mouvement.

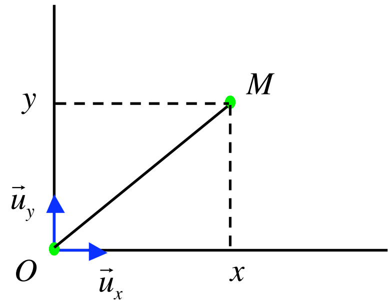
Pour les déplacements de courte durée au voisinage de la surface terrestre, la terre est un bon référentiel.

- Pour caractériser le mouvement d'un corps, il faut déterminer sa position. Dans ce but, on définit, dans le référentiel choisi, un repère cartésien formé d'un point origine fixe O et d'axes également fixes et perpendiculaires entre eux. Chaque point M de l'espace est alors repéré par ses coordonnées sur chacun des axes du repère.



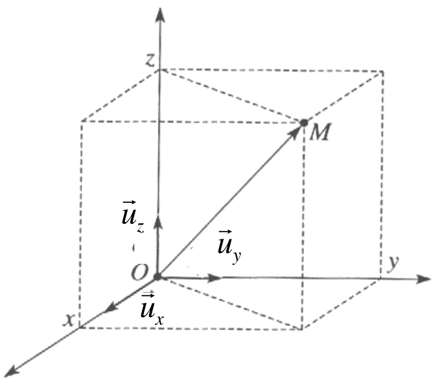
$$\overrightarrow{OM} = x\,\vec{u}_x$$

Mouvement rectiligne



$$\overrightarrow{OM} = x\,\vec{u}_x + y\,\vec{u}_y$$

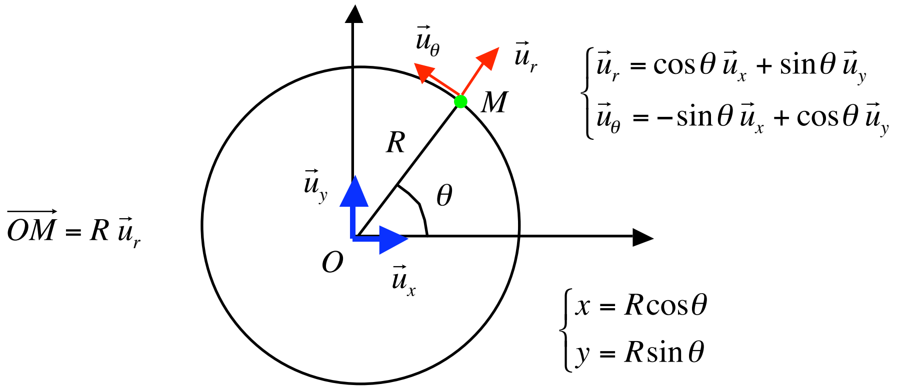
Mouvement plan



$$\overrightarrow{OM} = x\,\vec{u}_x + y\,\vec{u}_y + z\,\vec{u}_z$$

Mouvement tridimensionnel

Dans certains cas, il est néanmoins plus simple de faire appel à d'autres systèmes de repérage. Par exemple, pour un mouvement circulaire, on utilise souvent la base polaire $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta)$:

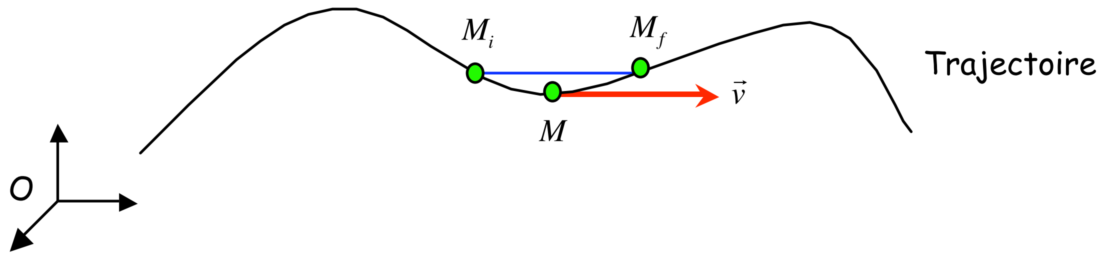


$\vec{u}_r$ est un vecteur unitaire selon l 'axe qui joint l'origine O au point mobile M. Il est orienté de O vers M.

$\vec{u}_\theta$ est un vecteur unitaire orthogonal au rayon OM et orienté dans le sens de l'angle θ.

<u>- Le vecteur vitesse</u>

Dans le langage courant, la vitesse est le quotient de la longueur du chemin parcouru par la durée du trajet. De manière plus précise, on définit un <u>vecteur vitesse instantanée</u> $\vec{v}$ en tout point M de la trajectoire :



$\vec{v} = \dfrac{\overrightarrow{M_iM_f}}{t_f - t_i}$ où le déplacement $\overrightarrow{M_iM_f}$ autour de M est aussi petit que possible

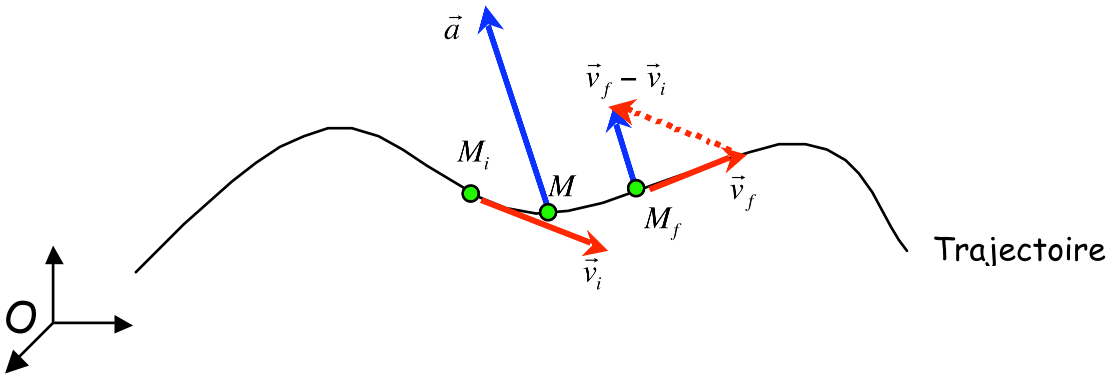
Le vecteur vitesse $\vec{v}$ est tangent à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement.

<u>Unité</u> : v s'exprime en ms^{-1}

On peut aussi écrire $\vec{v} = \dfrac{\overrightarrow{OM_f} - \overrightarrow{OM_i}}{t_f - t_i} = \dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$ où :

* $d\overrightarrow{OM}$ représente une variation infinitésimale du vecteur position autour du point M
* dt est la durée infiniment petite du trajet $d\overrightarrow{OM}$.

- Le vecteur accélération



$\vec{a} = \dfrac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{t_f - t_i}$ où les points M_i, M_f sont infiniment proches de part et d'autre de M.

$$\Rightarrow \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Unité : a s'exprime en ms^{-2}.

Remarques :

i) L'accélération est nulle s'il n'y a pas de variation du module, du sens et de la direction du vecteur vitesse.

ii) Le vecteur accélération n'a pas forcément la direction et le sens du mouvement (cf. les mouvements circulaires).

b) Les lois du mouvement d'un point

- Principe fondamental de la dynamique.

Rappelons que nous avons introduit la notion de forces comme la modélisation vectorielle d'une cause du mouvement. La relation précise entre les forces et le mouvement est donnée par le principe fondamental de la dynamique ou seconde loi de Newton :

La somme des forces appliquées à un point matériel est égale au produit de sa masse par son accélération :

$$\sum \vec{F} = m\,\vec{a}$$

Ce résultat n'est toutefois valable que dans une classe de référentiels, appelés référentiels galiléens, par rapport auxquels un point matériel soumis à des actions mécaniques qui se compensent $\left(\sum \vec{F} = \vec{0}\right)$ est au repos ou en mouvement rectiligne uniforme $(\vec{v} = Cte)$. C'est la première loi de Newton ou principe de l'inertie.

Exemples :

i) Lorsqu'on néglige la rotation autour de l'axe des pôles, le référentiel terrestre peut être considéré comme galiléen

ii) Tout référentiel (R') en translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen (R) est lui-même galiléen.

Illustration : voiture se déplaçant en ligne droite à vitesse constante.

- Application de la relation fondamentale de la dynamique

i) Si l'on connaît l'ensemble des forces qui agissent sur un système alors on peut prédire son mouvement à partir des conditions initiales : à partir de l'accélération $\vec{a} = \dfrac{\sum \vec{F}}{m}$,.on détermine la vitesse $\vec{v}$ puis la position $\overrightarrow{OM}$.

ii) L'inverse est également vrai : à partir de $\vec{a}$ et des conditions initiales on peut déterminer la force résultante qui agit sur le système.

iii) Si le mouvement et les forces sont connus alors on peut déterminer la masse du système (spectromètre de masse).

- Conservation de l'énergie mécanique

Prenons l'exemple d'une chute libre sans frottements : la seule force appliquée est alors le poids $\vec{P} = -mg\vec{u}_z = -\dfrac{dE^{(p)}_{Terre}}{dz}\vec{u}_z$ où $E^{(p)}_{Terre} = mgz + Cte$ est l'énergie potentielle de pesanteur associée. D'après le principe fondamental de la dynamique, on peut par ailleurs écrire :

$$\vec{P} = m\vec{a} = m\frac{d\vec{v}}{dt},\ \vec{v} = v_z\vec{u}_z \text{ étant le vecteur vitesse}$$

Or $\dfrac{d\vec{v}}{dt} = \dfrac{dv_z}{dt}\vec{u}_z$ car $\vec{u}_z$ est constant et donc :

$$m\frac{dv_z}{dt} = -\frac{dE^{(p)}_{Terre}}{dz}, \text{ soit } mv_z\frac{dv_z}{dt} = -v_z\frac{dE^{(p)}_{Terre}}{dz}.$$

Or $v_z \dfrac{dv_z}{dt} = \dfrac{1}{2}\dfrac{d\left(v_z^2\right)}{dt} = \dfrac{1}{2}\dfrac{d\left(v^2\right)}{dt}$

$$\Rightarrow \frac{d\left(mv^2/2\right)}{dt} = -v_z \frac{dE^{(p)}_{Terre}}{dz}$$

De plus, $\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$ où $\overrightarrow{OM} = z\vec{u}_z$ est le vecteur position. Ainsi, $\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \dfrac{dz}{dt}\vec{u}_z$, soit $v_z = \dfrac{dz}{dt}$, ce qui implique finalement :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = -\frac{dz}{dt}\frac{dE^{(p)}_{Terre}}{dz} = -\frac{dE^{(p)}_{Terre}}{dt} \text{ ou encore } \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mv^2 + E^{(p)}_{Terre}\right) = 0$$

La quantité $\dfrac{1}{2}mv^2 + E^{(p)}_{Terre}$ se conserve donc au cours du mouvement. Par définition, $\dfrac{1}{2}mv^2$ porte le nom d'énergie cinétique $E^{(c)}$ et la somme $E^{(c)} + E^{(p)}$ est appelée énergie mécanique $E^{(m)}$.

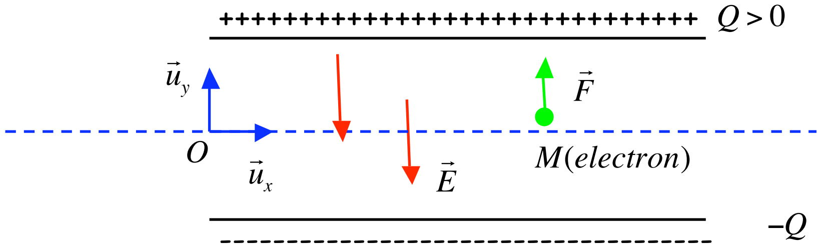
La démonstration précédente se généralise à 3 dimensions et quelle que soit la nature de l'énergie potentielle. Ainsi :

Pour tout mouvement sous l'action d'une force associée à une énergie potentielle, il y a conservation de l'énergie mécanique $E^{(m)} = E^{(c)} + E^{(p)}$.

c) Mouvement dans un champ électrique

- Le champ électrique connaît diverses applications. Dans le tube d'un oscilloscope, il accélère, puis dévie les électrons. Dans la plupart des accélérateurs, il communique aux particules chargées une grande énergie cinétique.

Nous nous limiterons à étudier le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme $\vec{E}$. Un tel champ peut par exemple être crée par un condensateur plan formé par 2 plaques métalliques planes, parallèles, dont les dimensions sont grandes devant la distance qui les sépare et qui portent des charges opposées uniformément réparties :



Entre les 2 plaques, le champ électrique est uniforme, perpendiculaire aux armatures et dirigé vers la plaque chargée négativement.

Considérons un électron, par exemple, qui pénètre dans ce dispositif en O à une date choisie comme origine et avec une vitesse initiale $\vec{v}_o$. En négligeant le poids de l'électron par rapport à la force électrique $\vec{F} = q\vec{E} = -e\vec{E}$, le principe fondamental de dynamique se traduit par :

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = -\frac{e}{m}\vec{E} = \frac{eE}{m}\vec{u}_y$$

<u>- Expression générale des vecteurs vitesse et accélération dans la base cartesienne</u>

Le vecteur vitesse $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$ étant la dérivée par rapport au temps du vecteur position $\overrightarrow{OM} = x\,\vec{u}_x + y\,\vec{u}_y$, on a :

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \frac{d(x\,\vec{u}_x)}{dt} + \frac{d(y\,\vec{u}_y)}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{u}_x + x\frac{d\vec{u}_x}{dt} + \frac{dy}{dt}\vec{u}_y + y\frac{d\vec{u}_y}{dt}$$

Mais les vecteurs $\vec{u}_x$ et $\vec{u}_y$ ne bougent pas au cours du temps : $\frac{d\vec{u}_x}{dt} = \frac{d\vec{u}_y}{dt} = \vec{0}$ et par conséquent :

$$\boxed{\vec{v} = \underbrace{\frac{dx}{dt}}_{v_x}\vec{u}_x + \underbrace{\frac{dy}{dt}}_{v_y}\vec{u}_y}$$

De même, le vecteur accélération $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ est la dérivée par rapport au temps du vecteur vitesse que nous venons de déterminer. Par un calcul similaire :

$$\boxed{\vec{a} = \frac{dv_x}{dt}\vec{u}_x + \frac{dv_y}{dt}\vec{u}_y}$$

- Compte tenu de l'expression de l'accélération déduite de la seconde loi de Newton, on a donc :

$$\begin{cases} \dfrac{dv_x}{dt} = 0 \Rightarrow v_x = Cte = v_{o,x} \\ \dfrac{dv_y}{dt} = \dfrac{eE}{m} \Rightarrow v_y = \dfrac{eE}{m}t + \underbrace{Cte}_{v_{o,y}} \end{cases}$$

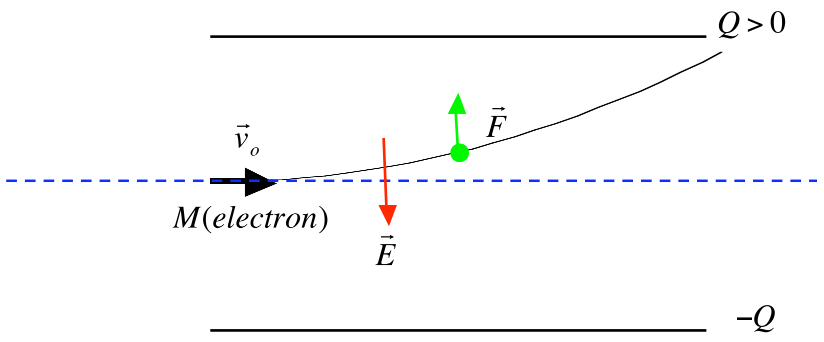
Il en résulte alors pour la position de l'électron :

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = v_x = v_{o,x} \Rightarrow x = v_{o,x}t + \underbrace{Cte}_{0} \\ \dfrac{dy}{dt} = v_y = \dfrac{eE}{m}t + v_{o,y} \Rightarrow y = \dfrac{eE}{2m}t^2 + v_{o,y}t + \underbrace{Cte}_{0} \end{cases}$$

<u>- Cas où la vitesse initiale est orthogonale au champ</u> $(\vec{v}_o = v_o\vec{u}_x)$

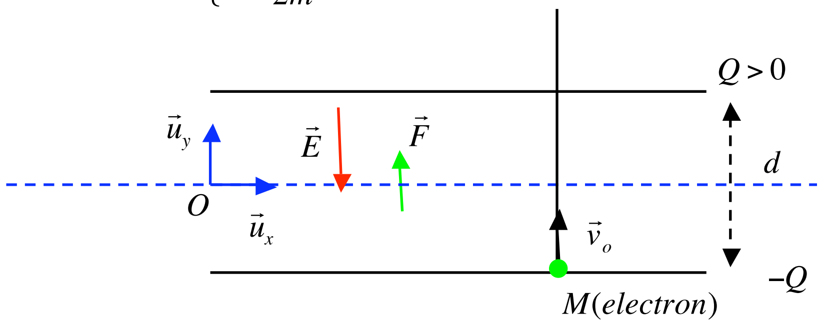
$$\begin{cases} x = v_o t \\ y = \dfrac{eE}{2m}t^2 \end{cases} \Rightarrow y = \dfrac{eE}{2mv_o^2}x^2$$

La trajectoire est donc une parabole : il y a déviation ou déflexion des électrons.



<u>- Cas où la vitesse initiale est parallèle au champ</u> $(\vec{v}_o = v_o\vec{u}_y)$

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = \dfrac{eE}{2m}t^2 + v_o t \end{cases}$$: mouvement rectiligne



A la sortie du condensateur, $y = \frac{eE}{2m}t^2 + v_o t = d$ et par ailleurs le carré de la vitesse est égal à $v^2 = v_x^2 + v_y^2 = \left(\frac{eE}{m}t + v_o\right)^2$. On en déduit donc l'énergie cinétique finale de l'électron :

$$E^{(c)} = E_o^{(c)} + \frac{e^2E^2}{2m}t^2 + eEv_o t = E_o^{(c)} + eE\underbrace{\left(\frac{eE}{2m}t^2 + v_o t\right)}_{y} = E_o^{(c)} + eEd > E_o^{(c)}$$

$\Rightarrow$ Le champ électrique a communiqué de l'énergie cinétique à l'électron

En outre, il y a conservation de l'énergie mécanique au cours du mouvement, puisque la force électrique est associée à l'énergie potentielle $E^{(p)} = qV$ (V étant le potentiel électrique) :

$$E^{(m)} = E_o^{(c)} - eV_- = E^{(c)} - eV_+ \text{ et donc } eEd = e(V_+ - V_-).$$

En d'autres termes, la valeur E du champ électrique à l'intérieur du condensateur plan est reliée à la différence $U = V_+ - V_-$ entre le potentiel V_+ de la plaque chargée + et celui V_- de l'autre armature :

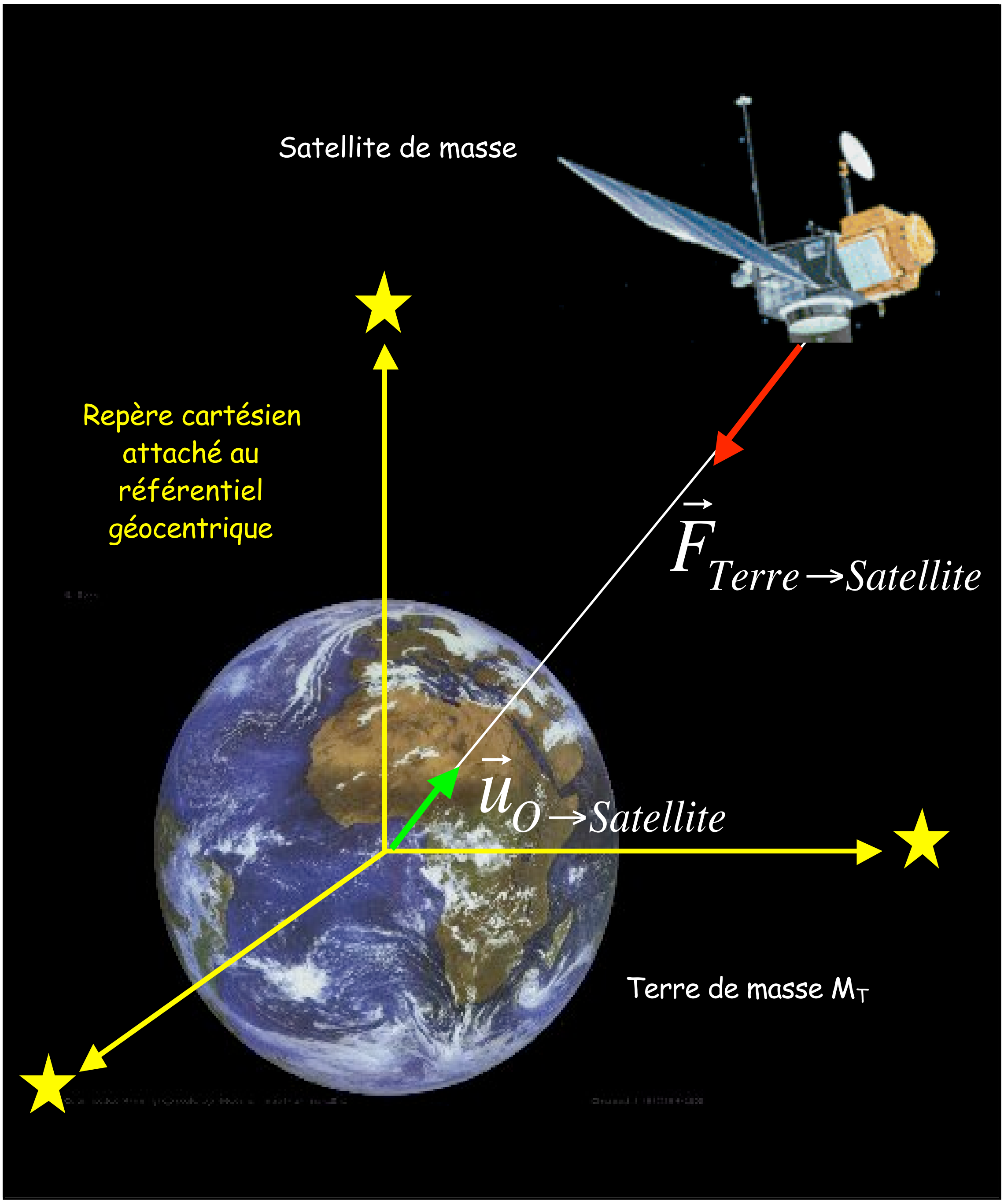
$$\boxed{E = \frac{U}{d}}$$

En réalité, cette relation peut se justifier directement à partir des lois de l'électrostatique.

d) Mouvement dans un champ gravitationnel : l'exemple des satellites terrestres

-Depuis 1957, de nombreux satellites artificiels, destinés aux télécommunications, à la météorologie, à l'observation de la Terre ou de l'espace, évoluent autour de la Terre. La Lune est en fait le seul satellite naturel de la Terre.

- Etudions le mouvement d'un satellite de masse m dans le référentiel géocentrique, c'est-à-dire par rapport au centre de la Terre. Ce référentiel est approximativement galiléen. En outre, les dimensions du satellite étant très petites devant la distance le séparant du centre de la Terre, il peut être considéré comme un objet ponctuel.



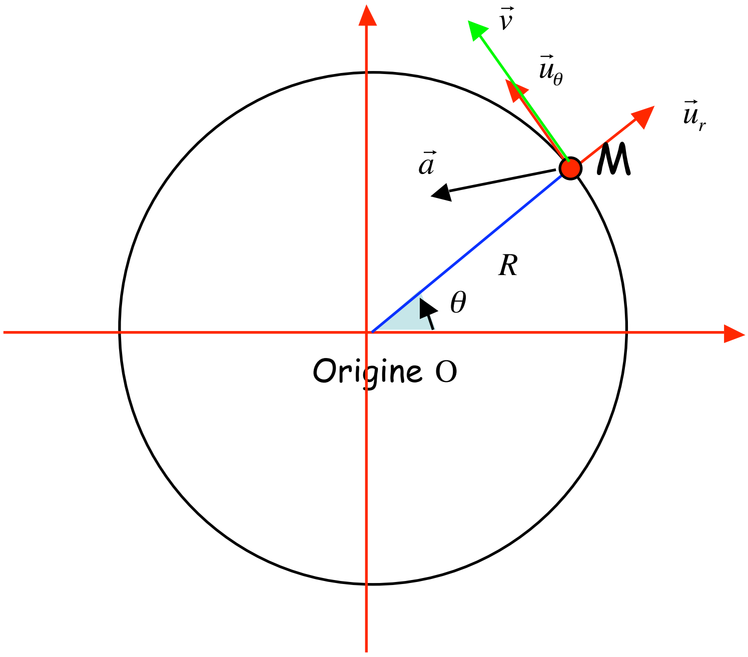
Nous pouvons donc appliquer le principe fondamental de la dynamique :

$$\vec{F}_{Terre \rightarrow Satellite} = m\vec{G}_{Terre \rightarrow Satellite} = -\mathcal{G}\frac{mM_T}{r^2}\vec{u}_{O \rightarrow Satellite} = m\vec{a}$$

$\Rightarrow \vec{a} = -\mathcal{G}\dfrac{M_T}{r^2}\vec{u}_{O \rightarrow Satellite}$: l'accélération du satellite est indépendante de sa masse.

On peut alors montrer que la trajectoire peut être une ellipse, un cercle, une hyperbole ou une parabole. Nous nous limiterons à l'étude des satellites de trajectoire circulaire.

- <u>Expression générale des vecteurs vitesse et accélération pour un mouvement circulaire dans la base polaire</u>



Dans la base cartésienne, nous avons vu que :

$$\overrightarrow{OM} = x\,\vec{u}_x + y\,\vec{u}_y \Rightarrow \vec{v} = \underbrace{\frac{dx}{dt}}_{v_x}\,\vec{u}_x + \underbrace{\frac{dy}{dt}}_{v_y}\,\vec{u}_y \Rightarrow \vec{a} = \frac{dv_x}{dt}\vec{u}_x + \frac{dv_y}{dt}\,\vec{u}_y$$

Pour le mouvement circulaire :

$$\begin{cases} x = R\cos\theta \Rightarrow \dfrac{dx}{dt} = -R\dfrac{d\theta}{dt}\sin\theta \\ \\ y = R\cos\theta \Rightarrow \dfrac{dy}{dt} = R\dfrac{d\theta}{dt}\cos\theta \end{cases} \Rightarrow \vec{v} = R\frac{d\theta}{dt}\left(-\sin\theta\,\vec{u}_x + \cos\theta\,\vec{u}_y\right)$$

$$\boxed{\vec{v} = v\,\vec{u}_\theta \text{ avec } v = R\frac{d\theta}{dt}}$$

Par conséquent :

$$\begin{cases} \dfrac{dv_x}{dt} = \dfrac{d(-v\sin\theta)}{dt} = -\dfrac{dv}{dt}\sin\theta - v\dfrac{d(\sin\theta)}{dt} = -\dfrac{dv}{dt}\sin\theta - v\dfrac{d\theta}{dt}\cos\theta \\ \\ \dfrac{dv_y}{dt} = \dfrac{d(v\cos\theta)}{dt} = \dfrac{dv}{dt}\cos\theta + v\dfrac{d(\cos\theta)}{dt} = \dfrac{dv}{dt}\cos\theta - v\dfrac{d\theta}{dt}\sin\theta \end{cases}$$

Donc $\vec{a} = \frac{dv}{dt}\left(-\sin\theta\,\vec{u}_x + \cos\theta\,\vec{u}_y\right) - v\frac{d\theta}{dt}\left(\cos\theta\,\vec{u}_x + \sin\theta\,\vec{u}_y\right)$, c'est-à-dire :

$$\boxed{\vec{a} = -\frac{v^2}{R}\vec{u}_r + \frac{dv}{dt}\vec{u}_\theta}$$

- Pour un satellite en orbite circulaire de rayon R autour de la Terre, $r = OM = R$, $\vec{u}_{O\to Satellite} = \vec{u}_r$ et le vecteur accélération dans la base polaire doit donc s'écrire $\vec{a} = -\mathcal{G}\frac{M_T}{R^2}\vec{u}_r$. Pour assurer la compatibilité avec l'expression générale que nous venons d'obtenir, il est ainsi nécessaire que :

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow v = Cte \\ \frac{v^2}{R} = \mathcal{G}\frac{M_T}{R^2} \end{cases}$$

Finalement, la vitesse du satellite est donnée par $v = \sqrt{\mathcal{G}\frac{M_T}{R}}$: elle n'est fonction que de son altitude.

La durée d'une révolution, ou période du satellite s'en déduit immédiatement :

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi R^{3/2}}{\sqrt{\mathcal{G}M_T}} \Rightarrow \frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{\mathcal{G}M_T} = Cte \text{ (3}^{\text{ème}}\text{ loi de Kepler)}$$

<u>Exemple</u> :

Le développement des télécommunications nécessite des satellites relais immobiles par rapport à la Terre : ce sont les satellites géostationnaires. Leur période de révolution T est donc égale à la période de rotation propre de la Terre :

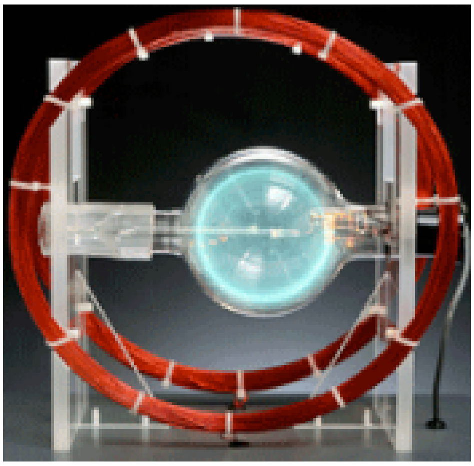
$$T = 1\,jour \Rightarrow R = \left(\frac{T^2\mathcal{G}M_T}{4\pi^2}\right)^{1/3} \approx 42200\ km$$

Le rayon de la Terre étant approximativement de 6400 km, tous les satellites géostationnaires évoluent à l'altitude de 35800 km.

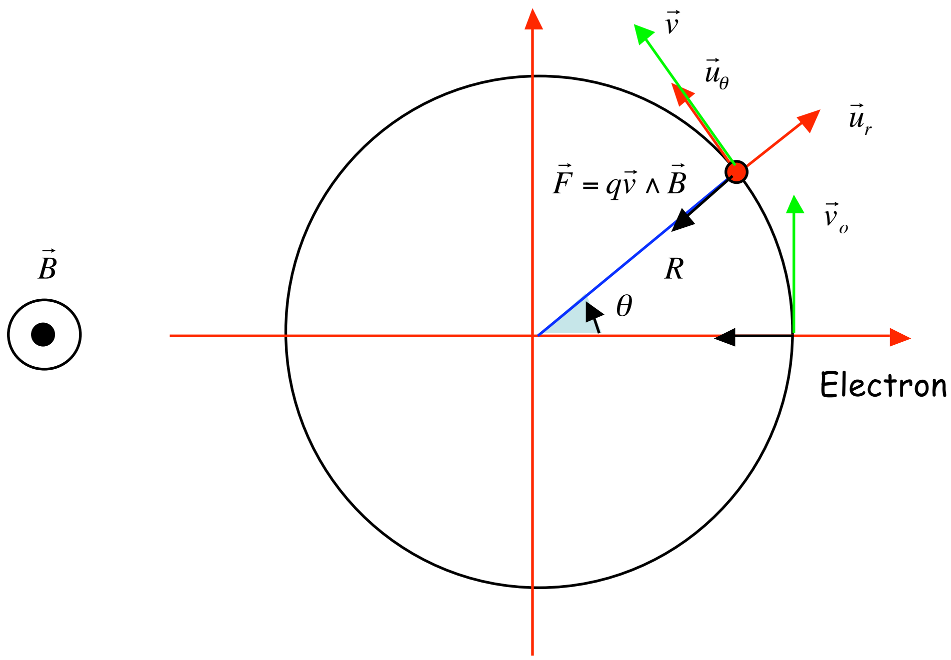
e) Mouvement dans un champ magnétique

- Pour conclure, nous examinerons le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$. Outre les applications dans les accélérateurs de particule (cf. TD), ce type de mouvement est également utilisé dans le tube-image d'un téléviseur pour dévier les pinceaux d'électrons afin qu'ils balaient l'écran.

Un champ magnétique uniforme peut, par exemple, être produit par des bobines de Helmholtz : ce sont des bobines plates identiques, de même axe, parcourues par des courants de même intensité et de même sens. La région de l'espace qui les sépare est le siège d'un champ magnétique quasiment uniforme de valeur proportionnelle à l'intensité du courant.



- Prenons donc le cas d'un électron qui pénètre dans une zone de l'espace où règne un champ $\vec{B}$ uniforme avec une vitesse $\vec{v}_o$ orthogonale à $\vec{B}$. On démontre que la trajectoire est alors circulaire. Nous nous proposons ici simplement de calculer le rayon de la trajectoire en appliquant le principe fondamental de la dynamique.



D’après la seconde loi de Newton, en négligeant le poids devant la force de Lorentz :

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = -\frac{e}{m}\vec{v} \wedge \vec{B}$$

L’accélération est donc orthogonale à vitesse. On montre facilement qu’il en résulte que la valeur de la vitesse reste constante :

$$\frac{d\left(v^2\right)}{dt} = \frac{d\left(\vec{v}^2\right)}{dt} = 2\vec{v}.\frac{d\vec{v}}{dt} = 2\vec{v}.\vec{a} = 0$$

Un champ magnétique peut modifier la direction du vecteur vitesse, mais ne peut pas en changer la valeur.

Dans le mouvement circulaire que nous considérons, nous aurons donc également $\vec{a} = -\frac{v^2}{R}\vec{u}_r$ (puisque $dv/dt = 0$)

$$\Rightarrow a = \frac{v^2}{R} = \frac{e}{m}\left\|\vec{v} \wedge \vec{B}\right\| = \frac{e}{m}vB = \frac{e}{m}v_o B$$

D’où le rayon de la trajectoire circulaire :

$$\boxed{R = \frac{mv_o}{eB}}$$