

INTERACTIONS FORCES ET CHAMPS

1 - Introduction

Deux interactions fondamentales agissent à notre échelle entre les objets.

Les objets massifs vont interagir entre eux du fait de leur masse grâce à l'interaction gravitationnelle.

Les objets possédant une charge électrique vont interagir entre eux via une interaction électrostatique. La compréhension de ces deux interactions est essentielle pour décrire les mouvements des planètes, les chutes des corps, l'électricité, les propriétés des molécules et atomes.

Cette compréhension de ces interactions a également permis le développement de très nombreuses applications modernes en sciences, en médecine, pour les télécommunications, en ingénierie, etc....

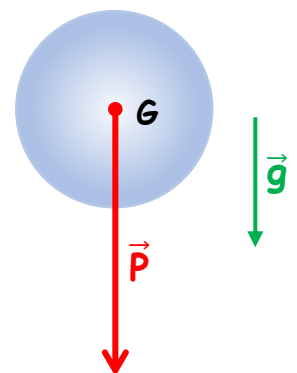
2 - Interaction gravitationnelle

2.1 - Le poids

En première approximation, on peut dire que le poids $\vec{P}$ d'un objet est égal à la force d'attraction gravitationnelle que la Terre exerce sur lui.

Cette force de pesanteur est représentée par un vecteur $\vec{P}$ possédant:

- Une origine: le centre d'inertie G du corps.
- Une direction: la verticale passant par G .
- Un sens: du haut vers le bas.
- Une intensité: $P = m g$.



Remarque: En réalité, le poids n'est pas rigoureusement confondu avec la force de gravitation.

En un point donné M , au voisinage de la Terre, le poids $\vec{P}$ d'un objet de masse m peut s'écrire:

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g} \quad \left| \begin{array}{l} \vec{P}: \text{Vecteur poids (N)} \\ m: \text{Masse (kg)} \\ \vec{g}: \text{Vecteur intensité de la pesanteur (N.kg}^{-1}\text{)} \end{array} \right.$$

Le vecteur $\vec{g}$ est, par définition, le vecteur champ de pesanteur terrestre au point M considéré.

Ce vecteur champ de pesanteur terrestre $\vec{g}$ possède:

- Une origine: le point M.
- Une direction: la verticale passant par M.
- Un sens: du haut vers le bas.
- Une valeur: l'intensité g de la pesanteur au point M

La valeur de l'intensité g de la pesanteur dépend de la latitude du point M où l'on opère et de son altitude:

$$g = 9,78 \text{ N/kg à l'équateur, au niveau de la mer.}$$

$$g = 9,83 \text{ N/kg au pôle nord, au niveau de la mer.}$$

La valeur de l'intensité g diminue avec l'altitude d'environ 1% tous les 30km.

Remarque: Pour faciliter les calculs, on pourra prendre, en première approximation, une valeur de l'intensité de la pesanteur g de 10 N/kg .

Dans un domaine restreint au voisinage de la Terre (dimensions de l'ordre de quelques kilomètres), on peut considérer que le champ de pesanteur est uniforme: le vecteur champ de pesanteur $\vec{g}$ a même direction, même sens et même valeur en tout point de ce domaine restreint.

2.2- Le champ de gravitation

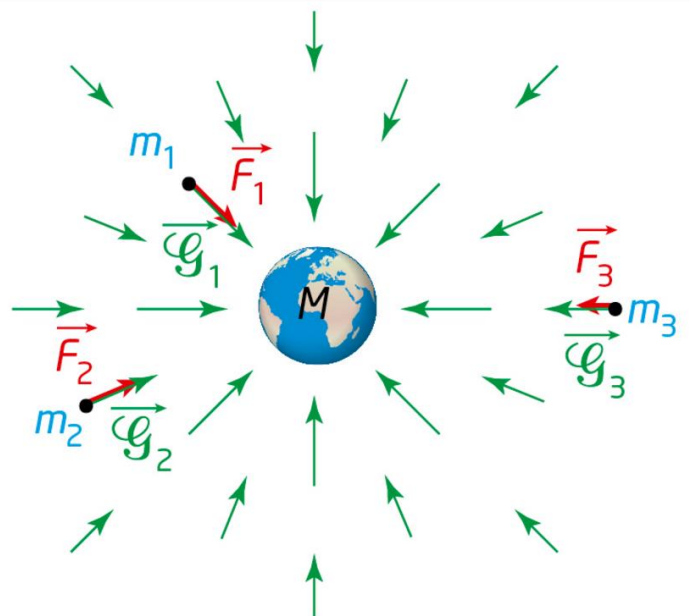
Il s'agit d'un champ traduisant l'influence gravitationnelle d'un corps doté d'une masse M sur l'espace qui l'entoure.

Le champ de gravitation que produit en un point de l'espace une masse ponctuelle M possède les caractéristiques suivantes:

- Ce champ a même direction et même sens que la force gravitationnelle $\vec{F}$ qu'exercerait cette masse M sur une masse ponctuelle m.
- Ce champ a pour expression vectorielle:

$$\vec{G} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Les lignes de champ sont orientées vers le centre de gravité du corps produisant le champ.



Dans le cas d'un corps à symétrie sphérique (comme une planète), les lignes de champ passent par le centre de la sphère.

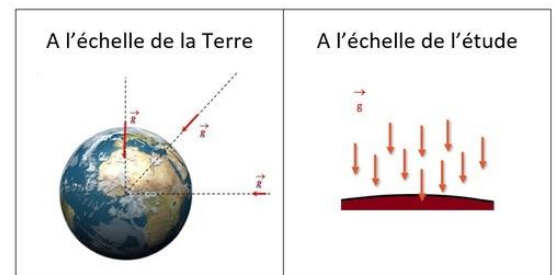
2.3- Champ de pesanteur

Le champ de pesanteur est un cas particulier de champ de gravitation, ces champs sont assimilables l'un à l'autre lorsque la force de gravitation est assimilable au poids c'est à dire:

- Pour un espace proche de la surface d'un astre.
- Lorsque cet espace a une étendue limitée (de faibles dimensions par rapport à la circonférence de l'astre).
- Lorsque cet espace a une hauteur négligeable devant le rayon de l'astre (quelques centaines de mètres voire quelques kilomètres pour la Terre).
- Lorsque la force de gravitation (assimilable au poids) s'exprime par la relation $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$.

C'est un champ qui peut être considéré comme uniforme et qui possède les caractéristiques suivantes:

- Sa direction est la verticale du lieu.
- Son sens est vers le bas.
- Sa valeur est égale à l'intensité de la pesanteur g ($g = 9,81 \text{ N/kg}$ à la surface de la Terre).



Ce champ est défini comme le rapport du poids $\vec{P}$ d'un système par la masse m de ce système soit:

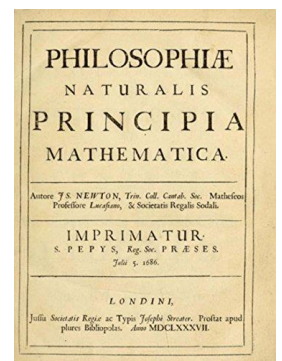
$$\vec{g} = \frac{\vec{P}}{m}$$

2.4- Loi de gravitation universelle

La loi de la gravitation universelle correspond à l'expression de la valeur de la force de gravitation s'exerçant entre deux corps.

Elle est formulée par Isaac Newton qui fut le premier à faire l'hypothèse que la gravitation terrestre n'est pas limitée à sa surface mais qu'elle peut s'étendre plus loin, il suppose qu'elle est universelle, peut se manifester jusqu'aux astres et provoquer leurs mouvements.

La force de gravitation est une force répartie en volume, c'est à dire que chaque particule du système subit cette force mais on peut considérer que la résultante s'applique en point particulier appelé centre de gravité G , ce point est en général confondu avec un autre point appelé centre d'inertie qui correspond au barycentre des masses du système, soit le point "le plus central de la répartition de masse". Pour un système homogène ou pour un système à symétrie centrale alors il correspond simplement au centre géométrique.



Deux objets ponctuels A et B de masse M_A et M_B , exercent l'un sur l'autre une force attractive, dirigée suivant la droite qui les joint.

Cette force varie proportionnellement au produit de leurs masses et à l'inverse du carré de la distance r qui les sépare.

$$\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A} = -G \cdot \frac{M_A \cdot M_B}{r^2} \cdot \vec{u}_{AB}$$

$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \cdot \frac{M_A \cdot M_B}{r^2}$$

$\vec{F}_{A/B}$: Force exercée par A sur B (N)

$\vec{F}_{B/A}$: Force exercée par B sur A (N)

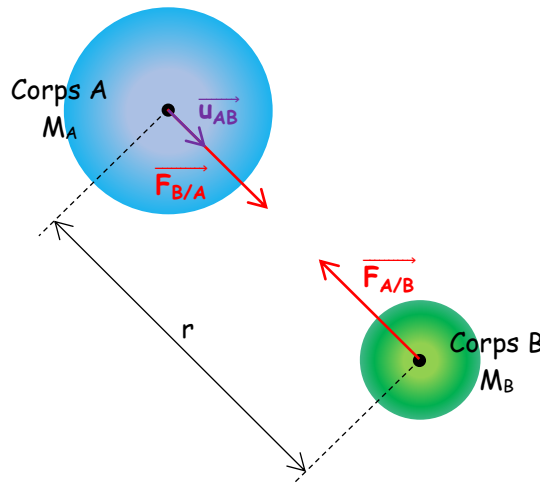
G : Constante de gravitation ($G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$)

M_A : Masse du corps A (kg)

M_B : Masse du corps B (kg)

r : Distance entre A et B

$\vec{u}_{AB}$: Vecteur unitaire dirigé de A vers B



Cette relation est vraie pour deux objets à répartition sphérique de masse. La distance r est alors égale à la distance séparant le centre des deux sphères.

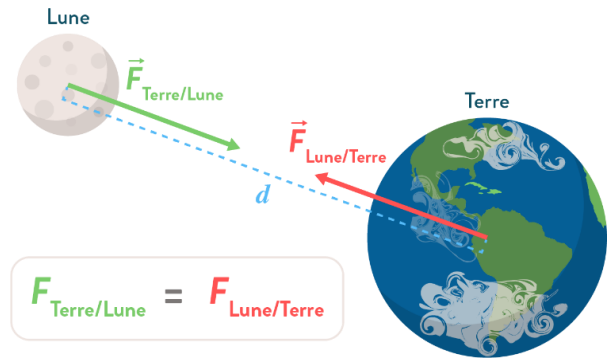
Attention: Les premières applications de cette relation peuvent être laborieuses, voici donc une checklist qui permettant d'éviter les erreurs les plus courantes:

- Vérifier que les masses sont exprimées en kilogramme.
- Vérifier que la distance est exprimée en mètre (et non pas en kilomètre).
- Vérifier que la distance utilisée est bien celle qui sépare les centres de gravité et non pas celle séparant la surface des corps.
- Penser à indiquer le carré de la distance et à en tenir compte dans le calcul.
- Lorsque le calcul est effectué à la calculatrice penser à placer le numérateur et le dénominateur entre parenthèses.
- Penser à présenter le résultat en utilisant la notation scientifique.
- Vérifier l'ordre de grandeur obtenu afin de déceler une éventuelle incohérence révélatrice d'une erreur.

La Terre et la Lune exercent l'une sur l'autre des forces ayant la même direction mais de sens opposés et de même valeur:

$$\vec{F}_{\text{Terre/Lune}} = - \vec{F}_{\text{Lune/Terre}}$$

$$F = F_{\text{Terre/Lune}} = F_{\text{Lune/Terre}} = G \times \frac{M_T \times M_L}{d^2}$$



- F : Force d'interaction gravitationnelle (N)
- G : Constante gravitationnelle ($G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{N.m}^2.\text{kg}^{-2}$)
- M_T : Masse de la Terre (kg)
- M_L : Masse de la Lune (kg)
- d : Distance Terre-Lune (m)

Influence de la masse: La force de gravitation est proportionnelle à chacune des deux masses, par conséquent:

- Une masse deux fois plus élevée (pour l'un des deux corps) correspond à une force de gravitation deux fois plus élevée.
- Une masse trois fois plus élevée (pour l'un des deux corps) correspond à une force de gravitation trois fois plus élevée.

Influence de la distance: La force de gravitation a une valeur inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare les centres des deux corps. Par conséquent:

- Plus cette distance est élevée et plus la force de gravitation est faible.
- Si la distance est doublée alors la valeur de la force de gravitation est divisée par 4.
- Si la distance est triplée alors la valeur de la force est divisée par 9.

Remarque: La force de gravitation diminue très rapidement avec la distance mais ne s'annule jamais totalement, un système subit donc toujours une force gravitationnelle d'un autre système, quel que soit sa distance, même s'il est situé à l'autre bout de l'univers!

Cette relation a de multiples applications:

- Calculer la masse d'une planète.
- Calculer la distance séparant une planète de son étoile.

Cette force s'exerce entre tous les corps possédant une masse mais sa valeur est en général trop faible pour que ses effets soient remarquables lorsque les deux systèmes ont une masse insuffisante: particules subatomiques, atomes, molécules, objets à l'échelle humaine etc.

Lorsque la gravitation s'exerce entre un astre et un corps de masse réduite alors elle est assimilée à ce que l'on appelle le "poids" de ce corps. Elle le maintient à sa surface et provoque sa chute lorsqu'il s'en éloigne.

Lorsque la gravitation s'exerce entre deux astres elle peut, suivant les conditions, soit provoquer leur collision ou permettre à l'astre de masse la plus petite d'adopter une orbite autour de l'astre le plus massif (ce dernier cas est possible si le "petit astre" possède un mouvement adapté).

3- Interactions électrostatiques

3.1- Charges électriques

Un objet peut posséder une charge électrique q dont le signe est positif ou négatif.

La charge s'exprime en Coulomb, dont le symbole est C .

La plus petite charge qu'il est possible d'avoir est la charge élémentaire e qui a pour valeur:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$$

3.2- Phénomène d'électrisation

Un des moyens les plus anciens pour produire des charges électriques est de frotter un tissu, une fourrure ou de la laine contre un autre matériau.

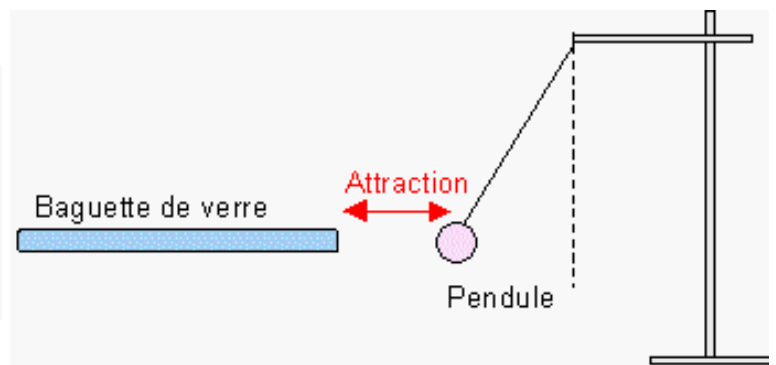
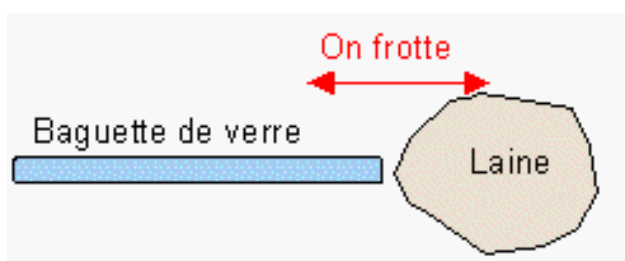
Pour produire des charges positives, on utilise un barreau en verre auquel les électrons sont arrachés.

Pour produire des charges négatives, on utilise un barreau en matière organique (ambre, ébonite, plastique) qui se couvre d'électrons arrachés au tissu.

a- Electrification par frottement

Une baguette de verre frottée avec de la laine attire la boule d'un pendule.

Une baguette de PVC frottée avec de la laine donne des résultats identiques.

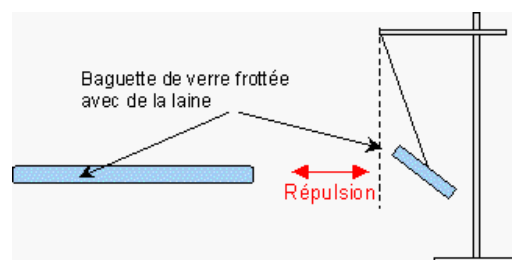


La baguette et la règle ont été électrisées par frottement.

b- Les deux sortes de charges électriques

Une baguette de verre chargée repousse une autre baguette de verre chargée. De même, une baguette de PVC chargée attire une baguette de verre chargée.

Il existe deux types de charges électriques (car les corps électrisés peuvent s'attirer ou se repousser).



Deux corps qui portent des charges de même signe se repoussent, tandis que deux corps qui portent des charges de signe différent s'attirent.

Par convention, les charges portées par le verre frotté avec la laine sont positives.

On en déduit que les charges portées par le PVC frotté avec la laine sont négatives.

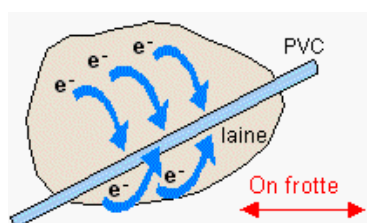
c- Interprétation microscopique

Un atome est constitué d'un noyau chargé positivement et d'électrons chargés négativement.

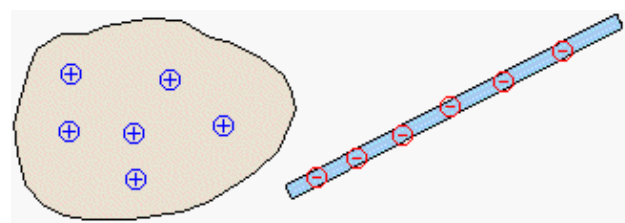
Toute charge électrique q est un multiple de la charge élémentaire: $q = n \cdot e$.

L'électron porte une charge élémentaire négative.

Lors de l'électrisation, la règle en PVC arrache des électrons à la laine.



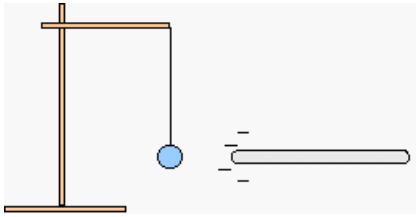
Lorsqu'on frotte, la baguette sur la laine, il se produit un transfert d'électrons de la laine vers la baguette.



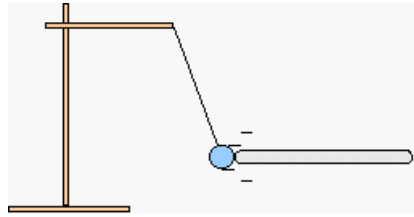
La laine est chargée positivement (déficit d'électrons) et la baguette est chargée négativement (excès d'électrons).

L'électrisation consiste en un transfert d'électrons. Le corps qui possède un excès d'électrons est chargé négativement, tandis que celui qui possède un déficit d'électrons est chargé positivement.

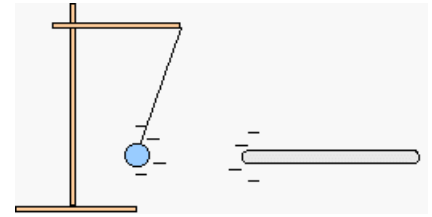
Remarque: Il est possible d'électriser un corps par contact. Dans l'exemple ci-dessous, la baguette chargée négativement attire le pendule, puis le repousse car celui-ci est électrisé à son contact.



La baguette possède un excès d'électrons. Elle attire le pendule.



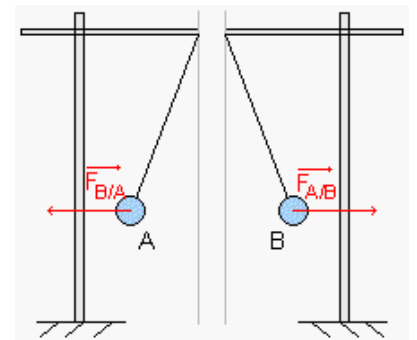
Lors du contact avec le pendule, des électrons passent de la baguette vers le pendule.



Le pendule est alors repoussé par la baguette.

3.3- Loi de Coulomb

Deux pendules portant des charges de même signe se repoussent, tandis que deux pendules portant des charges de signes opposés s'attirent.



Les pendules exercent l'un sur l'autre des forces opposées:

- A exerce sur B une force $\vec{F}_{A/B}$.
- B exerce sur A une force $\vec{F}_{B/A}$.
- $\vec{F}_{B/A} = - \vec{F}_{A/B}$
- $F_{B/A} = F_{A/B}$

Deux corps ponctuels A et B portant respectivement les charges q_A et q_B et séparées d'une distance $r = AB$ sont soumis à deux forces opposées de même valeur.

$$\vec{F}_{A/B} = - \vec{F}_{B/A} = - K \cdot \frac{q_A \cdot q_B}{r^2} \cdot \vec{u}_{AB}$$

$$F_{B/A} = F_{A/B} = K \cdot \frac{q_A \cdot q_B}{r^2}$$

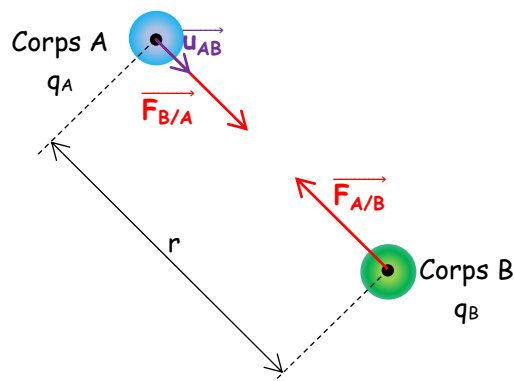
F: Force (N)

q_A et q_B : Charges électriques (C)

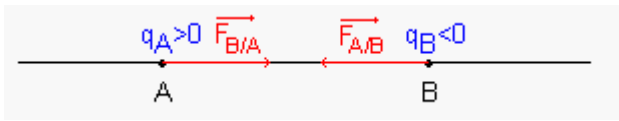
r: Distance entre les charges (m)

K: Constante de Coulomb ($k=9 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}$)

$\vec{u}_{AB}$: Vecteur unitaire dirigé de A vers B



Ces deux forces $\vec{F}_{B/A}$ et $\vec{F}_{A/B}$ qui ont pour droite d'action la droite AB, sont attractives si les charges sont de signes contraires et répulsives si les charges sont de même signe.

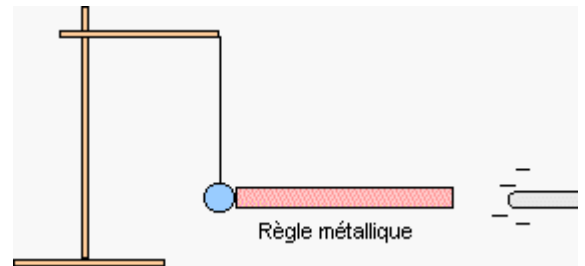


3.4- Conducteurs et isolants

a- Expérience

Lorsque la baguette chargée touche la règle métallique, le pendule est violemment repoussé: le pendule a été électrisé par contact.

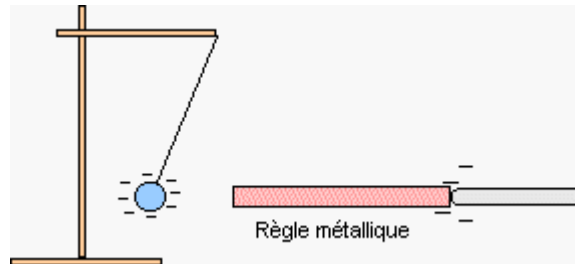
Avec une règle en bois ou en plastique, le pendule reste immobile. Il ne se charge pas.



b- Conducteurs et isolants

Un métal laisse facilement circuler les électrons: c'est un conducteur.

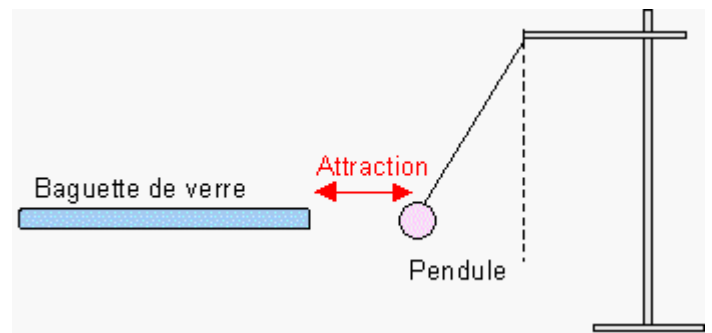
Au contraire, dans un isolant, les électrons ne sont pas libres de se déplacer



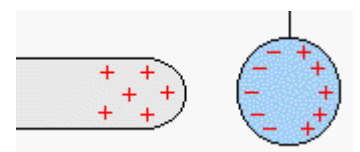
c- Electrification par influence

Lors de la première expérience, la baguette électrisée attire la boule du pendule constituée par exemple d'aluminium neutre. Les électrons sont attirés ou repoussés d'un côté de la boule.

Cette dissymétrie de répartition des électrons sous l'influence des charges électriques s'appelle électrisation par influence.



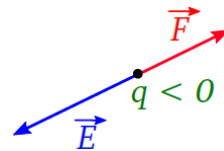
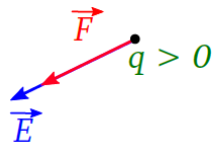
Les électrons de la boule d'aluminium se déplacent sous l'influence de la charge de la baguette.



3.5- Champ électrostatique

Si on place une charge électrique q dans une zone de l'espace où règne en chaque point un champ électrostatique $\vec{E}$ alors la charge électrique q va subir une force $\vec{F}$ telle que:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad \left| \begin{array}{l} \vec{F}: \text{Force électrostatique (N)} \\ q: \text{Charge électrique (C)} \\ \vec{E}: \text{Champ électrostatique (V.m}^{-1}\text{)} \end{array} \right.$$



Un champ électrostatique $\vec{E}$ est créé par une ou plusieurs charges électriques placées dans l'espace. Pour une charge unique q , on peut trouver facilement l'expression du champ créé.

Si on place à proximité une autre charge Q , cette dernière subit une force électrostatique $\vec{F}$:

$$\vec{F} = K \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \cdot \vec{u} = Q \cdot \vec{E}$$

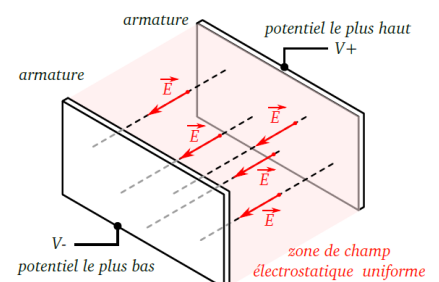
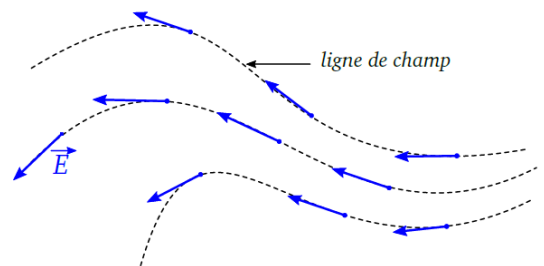
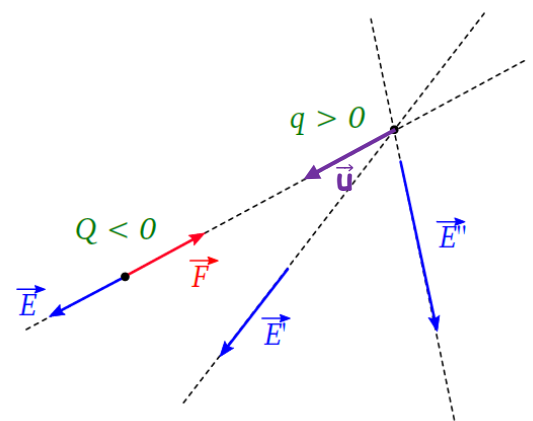
où $\vec{E}$ est le champ électrostatique:

$$\vec{E} = K \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \vec{u}$$

Le long d'une ligne de champ, le vecteur champ électrostatique mesuré en chaque point de la ligne est tangent à la ligne de champ.

On peut produire un champ électrostatique uniforme entre deux plaques d'un condensateur plan. Les vecteurs champs auront même sens, même direction et même intensité dans le volume compris entre les deux armatures. Les lignes de champ seront des droites parallèles entre elles, perpendiculaires aux armatures du condensateur.

Le champ électrique uniforme $\vec{E}$ est orienté de l'électrode à haut potentiel vers l'électrode à bas potentiel (couramment de la borne $\oplus$ vers la borne $\ominus$.)



On utilise un tel système pour modifier la vitesse de particules chargées ou les dévier. Cela est utilisé notamment dans un spectromètre de masse afin de réaliser des analyses chimiques d'échantillons de très petites tailles.

4- Analogies entre les interactions gravitationnelle et électrostatique

On observe différentes analogies entre les lois de Coulomb et de gravitation universelle:

- Ce sont des actions à distance, les corps n'ont pas besoin d'être en contact.
- L'intensité des forces est inversement proportionnellement au carré de la distance.
- La direction des forces d'interaction passe par le centre de chaque objet massif ou chargé.
- Les deux interactions peuvent être attractives, mais seule la force électrostatique peut être répulsive.

5- Comprendre la cohésion de la matière

5.1- Particules élémentaires

On appelle particule élémentaire toute particule indivisible.

La diversité de la matière résulte des nombreux arrangements des atomes entre eux.

L'atome est constitué à partir de 3 particules considérées comme élémentaires: le proton, le neutron et l'électron.

Autour du noyau formé de neutrons et de protons, les électrons sont en mouvement rapide.

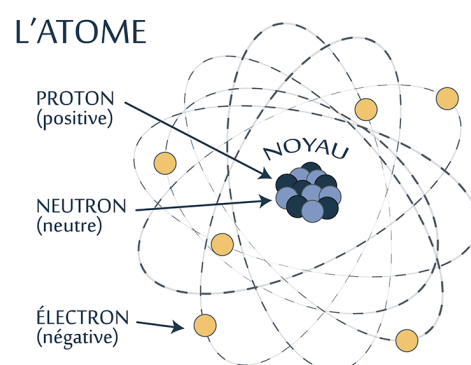
Un atome est constitué:

- D'un noyau contenant A nucléons (Z protons et $N-Z$ neutrons). Ce noyau portant Z charges élémentaires positives (Z protons) est chargé positivement.
- D'un nuage électronique constitué de Z électrons.

La matière de l'univers, de l'infiniment petit (atomes, molécules, cellules) à l'infiniment grand (étoiles, nébuleuses, galaxies) est formée à partir de ces trois particules.

Ces particules élémentaires qui peuvent porter une charge électrique q (positive ou négative) s'assemblent de manière à former des atomes.

L'atome étant électriquement neutre, le nombre de protons et d'électrons sont identiques.



Les caractéristiques essentielles des particules élémentaires constituant l'atome sont données dans le tableau ci-dessous.

Caractéristiques essentielles des particules élémentaires			
Particules	Charge (C)	Masse (kg)	Rayon (m)
Proton	$q_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$	$r = 1,2 \cdot 10^{-15}$
Neutron	$q_n = 0$	$m_n = 1,67 \cdot 10^{-27}$	$r = 1,2 \cdot 10^{-15}$
Électron	$q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$	?

Remarques:

- La masse des électrons étant négligeable devant celle des nucléons, la masse d'un atome diffère peu de la masse de son noyau ($m_{\text{atome}} \approx Z \cdot m_p + (A-Z)m_n \approx A \cdot m_n$).
- Le rayon du noyau est de l'ordre de 1 fm (10^{-15} m) alors que le rayon de l'atome est de l'ordre de 10^{-10} m. La plus grande partie d'un atome est constituée de vide. L'atome a une structure lacunaire.

5.2- Les interactions fondamentales

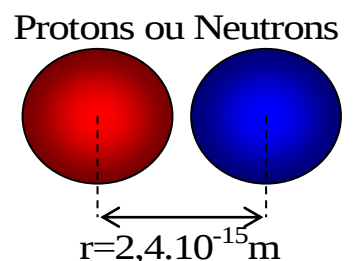
Il existe trois types d'interactions entre les particules élémentaires qui assure la cohésion de la matière:

- La première de ces forces est l'interaction gravitationnelle entre les masses des particules découverte par Newton en 1667.
- La seconde de ces forces est l'interaction électrique entre les charges découverte par Coulomb en 1785).
- La dernière de ces forces est l'interaction forte entre les nucléons. Découverte en 1970, elle est plus délicate à modéliser.

5.3- Cohésion de la matière à l'échelle du noyau atomique

Considérons un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$, et déterminons la valeur des interactions gravitationnelles et électriques qui existent entre les différentes particules de ce noyau.

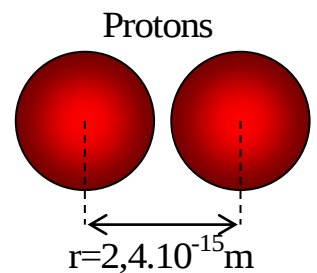
La force d'interaction gravitationnelle entre 2 protons, 2 neutrons ou 1 proton et 1 neutron est:



$$F = G \cdot \frac{m_p \cdot m_p}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \times \frac{(1,67 \cdot 10^{-27})^2}{(2,4 \cdot 10^{-15})^2} = 3,23 \cdot 10^{-35} \text{ N}$$

La force d'interaction électrique entre 2 protons est:

$$F = K \cdot \frac{q_p \cdot q_p}{r^2} = 9,0 \cdot 10^9 \times \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(2,4 \cdot 10^{-15})^2} = 40 \text{ N}$$



On constate que la force de répulsion électrique est très supérieure à la force d'attraction gravitationnelle. La cohésion des noyaux ne peut être due aux deux forces précédentes (les noyaux se disloqueraient).

La cohésion des noyaux est donc due à l'interaction forte.

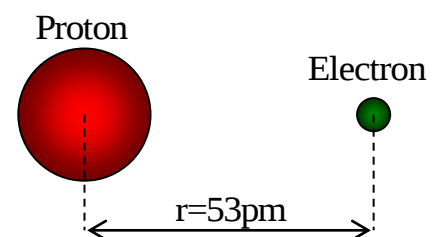
L'interaction forte est une interaction attractive importante qui s'exerce sur les nucléons. Elle assure la cohésion des noyaux.

Remarque: Contrairement à l'interaction gravitationnelle et à l'interaction électrique, l'interaction forte augmente avec la distance. Cependant, c'est une action à courte portée.

5.4- Cohésion de la matière à l'échelle de l'atome

Considérons un atome d'hydrogène ^1_1H et déterminons la valeur des interactions gravitationnelles et électriques qui existent entre le noyau (proton) et l'électron de cet atome.

La force d'interaction gravitationnelle est:



$$F = G \cdot \frac{m_p \cdot m_e}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \times \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \times 9,11 \cdot 10^{-31}}{(53 \cdot 10^{-12})^2} = 3,61 \cdot 10^{-47} \text{ N}$$

La force d'interaction électrique est:

$$F = K \cdot \frac{q_p \cdot q_e}{r^2} = - 9,0 \cdot 10^9 \times \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(53 \cdot 10^{-12})^2} = - 8,20 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

On constate que l'intensité de la force d'attraction électrique est très supérieure à l'intensité de la force d'attraction gravitationnelle.

L'interaction électrique assure la cohésion de la matière à l'échelle atomique.

5.5- Cohésion de la matière à l'échelle moléculaire

Un calcul identique au niveau de la molécule donne le même résultat.

Les propriétés des solides, des liquides et des gaz en découlent.

La cohésion de la matière à l'échelle moléculaire est assurée par l'interaction électrique.

5.6- Cohésion de la matière à l'échelle astronomique

A l'échelle de l'Univers, la matière est électriquement neutre.

L'interaction gravitationnelle assure la cohésion de la matière à l'échelle de l'Univers.

Elle est responsable du mouvement des astres, de la formation des étoiles, des planètes et des galaxies.

5.7- La physique des particules

Afin de mieux connaître l'origine et l'évolution de l'univers, la recherche fondamentale actuelle s'intéresse aux particules élémentaires et à leurs interactions.

Les nucléons (protons et neutrons) ne sont pas les particules ultimes de la matière, que l'on ne peut pas diviser. Les théories actuelles prévoient que les nucléons sont composés de quarks.

L'existence des quarks a été démontrée théoriquement par Murray GELL-MANN et George ZWEIG en 1964, et expérimentalement en 1975. Les quarks sont liés entre eux par l'interaction forte, la même que celle qui lie les nucléons.

Le neutrino dont l'existence a été prévue par PAULI dès 1930, a été mis en évidence en 1936. Cette particule n'est pas chargée électriquement. Le projet ANTARES au large de Toulon, par 2500m de fond, permettrait d'évaluer la masse de l'univers et de prévoir son évolution.

L'antimatière est constituée d'antiparticules (anti-quarks, anti-électrons, anti-neutrinos). Imaginée en 1927 par Paul DIRAC, elle est créée dans les accélérateurs de particules (CERN). Lors de la collision entre la matière et l'antimatière il y a production de grandes quantités d'énergie. La question que l'on peut actuellement se poser est de savoir où est passée toute l'antimatière qui aurait dû être créée en même temps que la matière lors de la création de l'univers.

Les photons, grains de lumière, correspondent à la particule de l'interaction électrique.

Les gluons sont responsables de l'interaction forte qui lie les quarks et qui participe donc à la cohésion du noyau atomique.

Les physiciens considèrent l'existence d'une quatrième interaction fondamentale: l'interaction gravitationnelle. On considère actuellement que deux particules en interaction échangent une particule (particule d'échange). Des recherches récentes ont permis de mettre en évidence la particule responsable de l'interaction gravitationnelle: le graviton.