PHYSIQUE GÉNÉRALE A

Électricité, magnétisme et intro à la physique moderne

Carmine SENATORE

LES THÈMES ABORDÉS

Électrostatique

Circuits électriques

Électrodynamique et magnétisme

Le rayonnement électromagnétique

L'optique géométrique

Photons et atomes

Introduction à la physique nucléaire

ÉLECTROSTATIQUE I

Charge électrique

Force électrique

Champ électrique

Loi de Coulomb

Énergie dans le cadre de l'électrostatique

Potentiel électrique

Tension électrique

Équipotentielles

Kane chapitres 16.1 – 16.5
Hecht chapitres 17 et 18

INTRODUCTION

La matière interagit de différentes manières :

Nous faisons tous les jours l'expérience d'une interaction fondamentale propre à la matière massive :

l'interaction gravitationnelle

C'est une manifestation de la masse, une des caractéristiques de la matière.

Deux corps de masse M et m séparés d'une distance r s'attirent avec une force F_G :

$$F_G = G\frac{mM}{r^2}$$

$$F_G = ma = mg$$

$$g = G\frac{M}{r^2}$$

Une seconde interaction fait intervenir une autre propriété de la matière, la charge électrique :

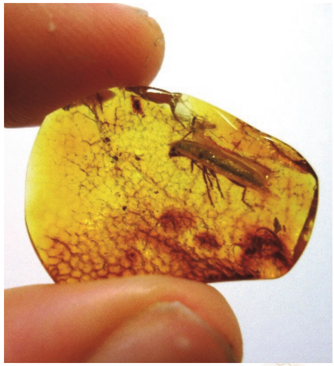
l'interaction électromagnétique

Découverte de l'électricité

Dès l'an 600 av. J.-C., les humains avaient conscience d'une autre force, mystérieuse, qui agit entre certaines formes de matière.

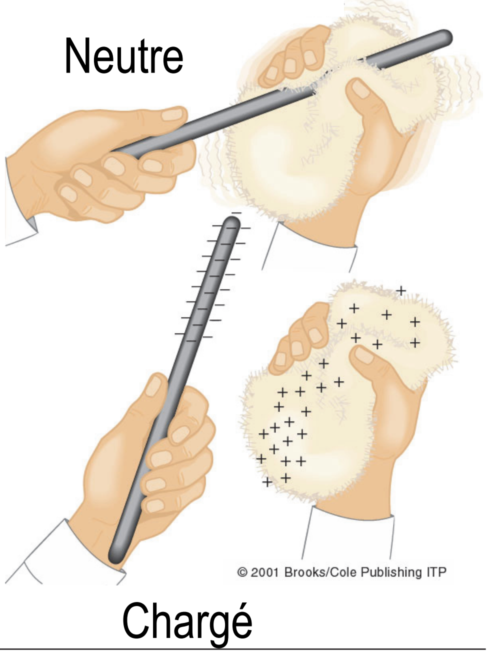
Cette force est aujourd'hui connue comme

la force électrique



Les Grecs avaient remarqué que l'ambre poli (utilisé dans la bijouterie) avait la capacité d'attirer de petits objets légers.

Ambre se dit *elektron* en grec.



Si on frotte une tige d'ambre ou de plastique avec une fourrure, celle-ci devient capable d'attirer des feuilles de papier, des poussières, les cheveux, etc…

LA FORCE ÉLECTRIQUE : Attraction et répulsion

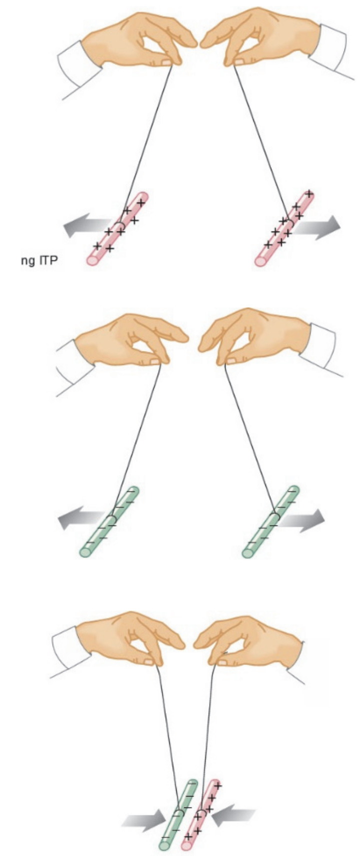
LA FORCE ÉLECTRIQUE : Attraction et répulsion

La force électrique

- s'exerce à distance, comme celle de la gravitation
- peut être attractive ou répulsive, contrairement à la gravitation

Il y a donc deux sortes d'électricité :

- une charge électrique positive
- une charge électrique négative

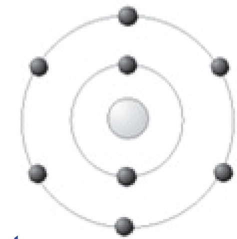


Le signe relatif de deux charges est fixé par la direction de la force qu'elles causent :

- deux charges de même signe se repoussent.
- deux charges de signe opposé s'attirent.

Charges positives et négatives – Quantification de la charge

La charge électrique est une propriété fondamentale de la matière.



La matière est constituée d'atomes, eux-mêmes constitués d'un noyau qui contient des protons chargés positivement et d'électrons chargés négativement.

Les protons sont liés dans les noyaux et essentiellement immobiles, les électrons sont moins fortement liés, et une partie peut former un "nuage" plus ou moins mobile autour des noyaux.

Il n'existe aucun moyen de neutraliser un électron en le déchargeant.

L'électron est une particule fondamentale, indivisible et sans structure interne. Sa charge est aussi une grandeur fondamentale indivisible:

$$q_e = -1.60217733(49) \times 10^{-19}\, C$$

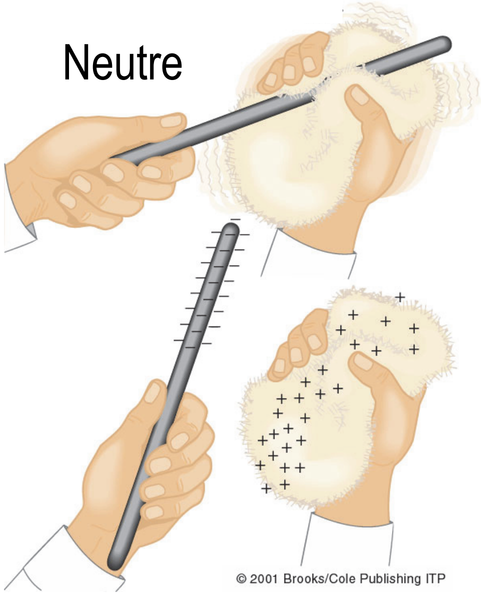
Le proton, contrairement à l'électron, a une structure interne (il est formé de quarks). Il est cependant remarquable que la charge du proton, $q_p = -q_e$, soit exactement égale et opposée à celle de l'électron.

La charge électrique est quantifiée en unités de la charge de l'électron: toute charge électrique libre est un multiple de q_e.

Conservation de la charge

Généralement, la charge totale d'un corps est nulle avec un nombre identique de charges positives et négatives. Le corps est alors électriquement neutre.

Un corps neutre peut être chargé en gagnant ou en perdant des électrons. Mais cela ne peut se faire que par échange de charges avec un autre corps. Un corps chargé négativement contient un excès d'électrons, un corps chargé positivement manque d'électrons.



La force d'attraction des expériences ci-dessus résulte du transfert de charges entre le chiffon et la tige :

L'ensemble tige / chiffon reste neutre et les électrons perdus par l'un se retrouvent sur l'autre.

La loi de conservation de la charge dit : *La charge totale d'un système, c'est-à-dire la somme des charges positives et négatives, est toujours constante.*

Électrisation et affinité électronique

Selon les matériaux, les électrons sont plus ou moins fortement liés aux atomes.

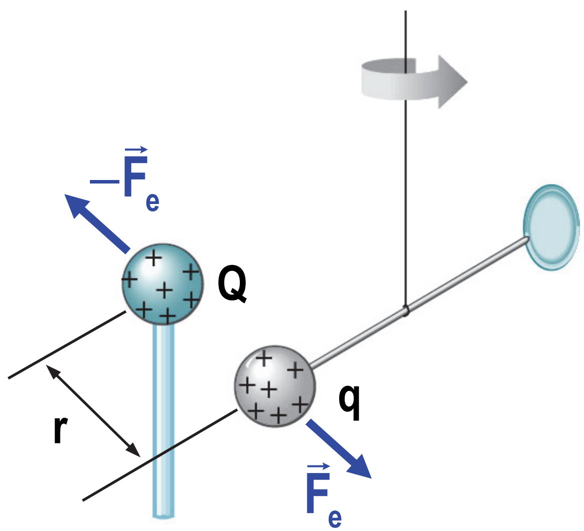
Lorsque l'on frotte deux matériaux, des électrons iront de celui où ils sont le moins liés, vers celui où ils le sont le plus.

Le signe des charges obtenues dépend donc des deux matériaux.

On peut classer les matériaux par leur affinité électronique.

LA FORCE ÉLECTRIQUE : La loi de Coulomb

En 1785 Charles de Coulomb mesura la dépendance de la force électrique $\mathbf{F_e}$ en fonction de la distance r entre deux charges.



Deux charges positives sont déposées sur 2 sphères. Une des sphères est un pendule de torsion. La déviation α est une mesure de la force. Il observa alors que :

$$F_E = k\frac{|q||Q|}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q||Q|}{r^2}$$

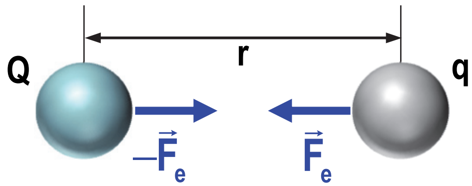
avec $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} \approx 9\cdot 10^9\,\dfrac{\mathrm{Nm}^2}{\mathrm{C}^2}$ $\left(\varepsilon_0 = 8.85\cdot 10^{-12}\,\dfrac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{Nm}^2}\right)$

permittivité diélectrique du vide

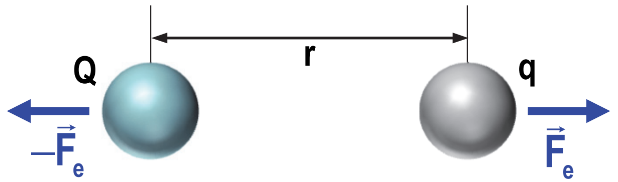
L'unité SI de la charge est le Coulomb, $[q]$ = C.

$\mathbf{F_e}$ est une force radiale; elle est dirigée le long de la droite reliant les deux charges.

Le sens de $\mathbf{F_e}$ le long de la droite reliant les 2 charges dépend des signes de q et Q.



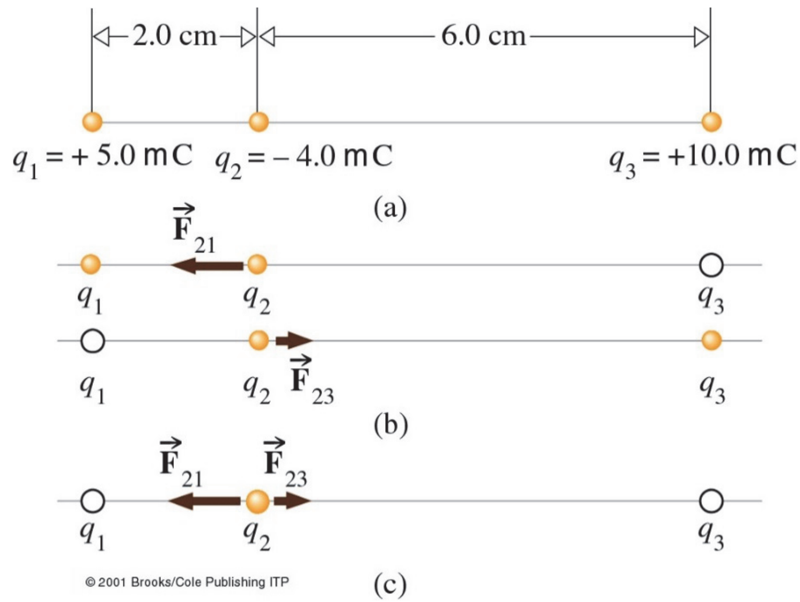
q et Q de signes opposés



q et Q de mêmes signes

Addition des forces électrostatiques – Exemple 1

La force électrique est une grandeur vectorielle. Elle agit le long de la droite qui relie les deux charges :



QUESTION : Soit trois petites sphères alignées et uniformément chargées. Déterminez la force résultante sur la sphère du milieu produite par les deux autres. Attention aux unités, nous voulons tout en SI.

SOLUTION : La force résultante sur la charge 2 est la somme des vecteurs force colinéaires: $\overrightarrow{F_2} = \overrightarrow{F_{21}} + \overrightarrow{F_{23}}$

L'amplitude de chaque force se calcule en appliquant la loi de Coulomb :

$$F_{21} = k\frac{q_2 q_1}{r_{21}^2} = (9\times10^9\,\mathrm{Nm^2/C^2})\frac{(-4\times10^{-3}\,\mathrm{C})(5\times10^{-3}\,\mathrm{C})}{(2\times10^{-2}\,\mathrm{m})^2} = -450\times10^6\,\mathrm{N}$$

$$F_{23} = k\frac{q_2 q_3}{r_{23}^2} = (9\times10^9\,\mathrm{Nm^2/C^2})\frac{(-4\times10^{-3}\,\mathrm{C})(10\times10^{-3}\,\mathrm{C})}{(6\times10^{-2}\,\mathrm{m})^2} = -100\times10^6\,\mathrm{N}$$

Addition des forces électrostatiques – Exemple 1

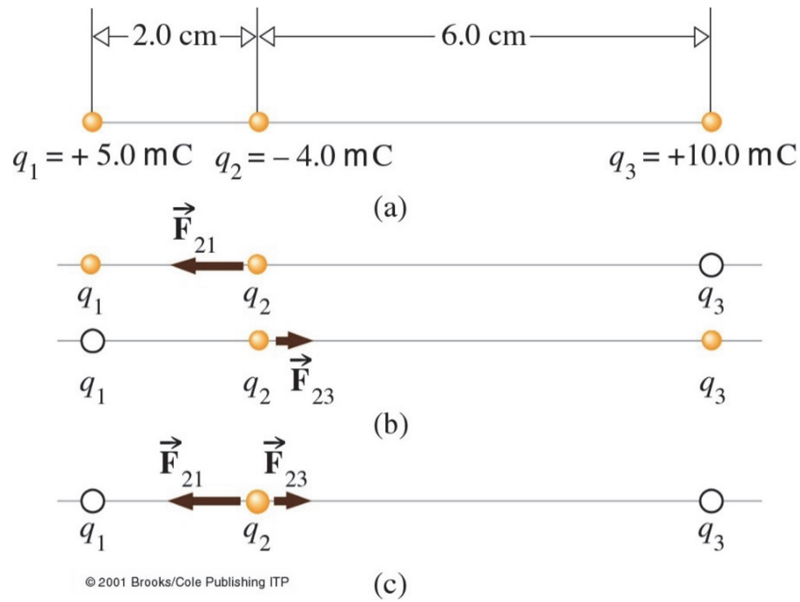
QUIZ

Si la charge q_2 était laissée libre de se déplacer sous l'effet de la force électrique,

A. elle se déplacerait vers q_1

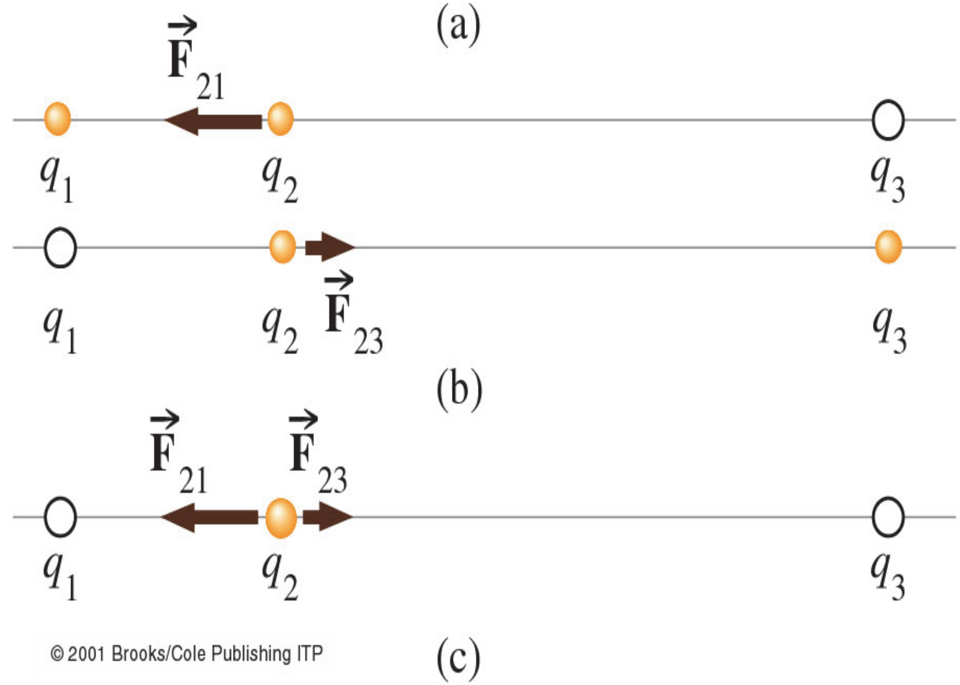
B. elle se déplacerait vers q_3

C. elle resterait immobile



Addition des forces électrostatiques – Exemple 1

La direction des forces est indiquée par les flèches et dépend des signes respectifs des charges.



Les deux forces $\overrightarrow{F_{21}}$ et $\overrightarrow{F_{23}}$ sont attractives, mais elles agissent dans des directions opposées.

En définissant la direction positive vers la droite on peut calculer la norme du vecteur force résultant : $\overrightarrow{F_2} = \overrightarrow{F_{21}} + \overrightarrow{F_{23}}$

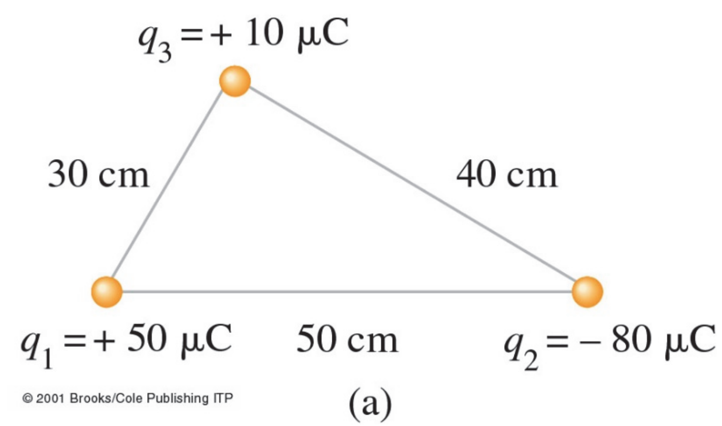
$$F_2 = -\left|F_{21}\right| + \left|F_{23}\right| = (-450\times10^6\,\mathrm{N})+(+100\times10^6\,\mathrm{N}) = -350\times10^6\,\mathrm{N}$$

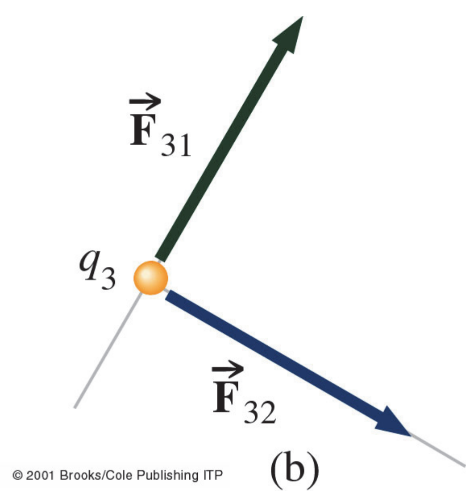
La force résultante agit vers la gauche.

Addition des forces électrostatiques – Exemple 2

QUESTION : Trois petites sphères chargées sont fixées aux sommets d'un triangle. Calculez la force exercée sur q_3 par les autres charges.

SOLUTION : Tracez le diagramme des forces qui agissent sur q_3 et déterminez quelles forces sont attractives ou répulsives.





La force entre q_1 et q_3 est répulsive, celle entre q_2 et q_3 est attractive (direction indiquée par les flèches sur le diagramme ci-contre) et la loi de Coulomb donne :

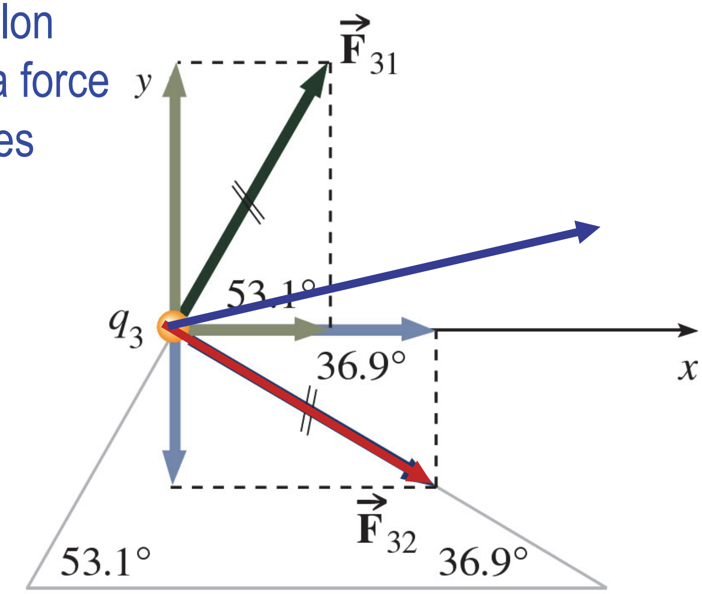
$$F_{31} = k\frac{q_3 q_1}{r_{31}^2} = (9.0\times10^9\,\mathrm{Nm^2/C^2})\frac{(10\times10^{-6}\,\mathrm{C})(50\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(30\times10^{-2}\,\mathrm{m})^2}$$

$$= 50\mathrm{N}$$

$$F_{32} = k\frac{q_3 q_2}{r_{32}^2} = -45\mathrm{N}$$

Addition des forces électrostatiques – Exemple 2

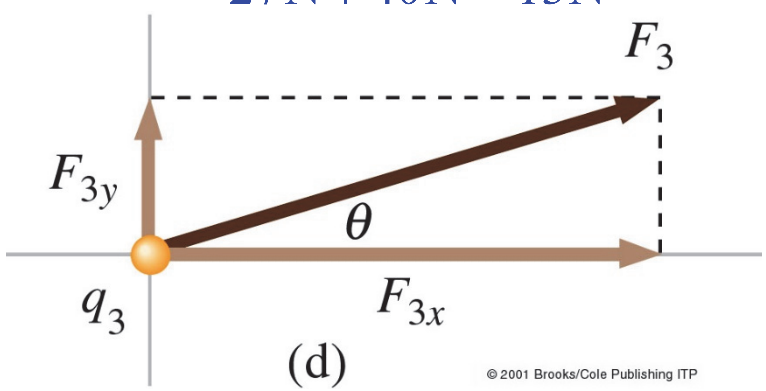
L'addition vectorielle se fait en décomposant les forces selon deux axes perpendiculaires x et y. Les composantes de la force résultante sont (les angles sont définis par les positions des charges) :



(c)

$$F_{3x} = |F_{32}|\cos 36.9° + |F_{31}|\cos 53.1°$$
$$= (45\text{N})(0.8) + (50\text{N})(0.6)$$
$$= 36\text{N} + 30\text{N} = +66\text{N}$$

$$F_{3y} = -|F_{32}|\sin 36.9° + |F_{31}|\sin 53.1°$$
$$= -(45\text{N})(0.6) + (50\text{N})(0.8)$$
$$= -27\text{N} + 40\text{N} = +13\text{N}$$



(d)

La norme de la force résultante vaut:

$$F_3 = \sqrt{F_{3x}{}^2 + F_{3y}{}^2} = \sqrt{(66\text{N})^2 + (13\text{N})^2} = 67\text{N}$$

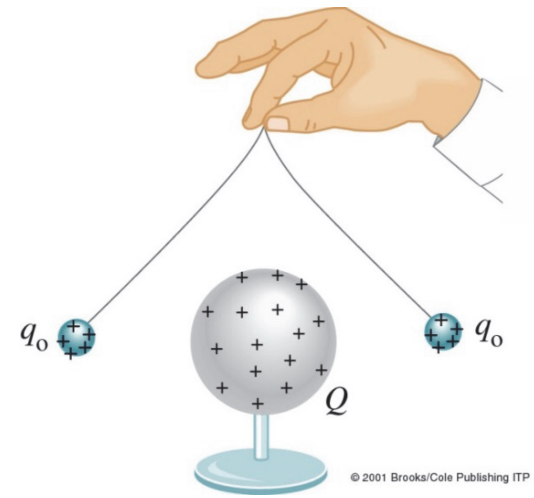
Sa direction fait un angle θ avec l'axe x:

$$\theta = \arctan\frac{F_{3y}}{F_{3x}} = \arctan\frac{13\text{N}}{66\text{N}} = 11°$$

Le champ de force électrique

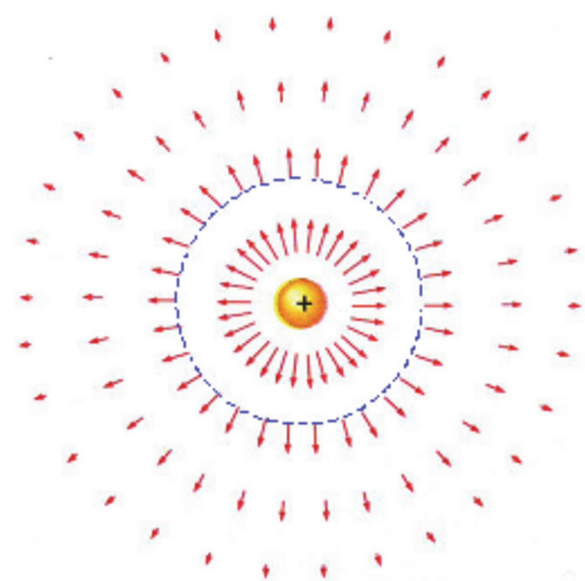
Une charge test positive q_0 subit une force électrique en tout point dont la direction et la norme sont des fonctions de ce point. Nous attribuons alors à chaque point un vecteur force correspondant.

Pour une charge source uniforme, ces vecteurs forment un champ vectoriel radial avec une symétrie sphérique.

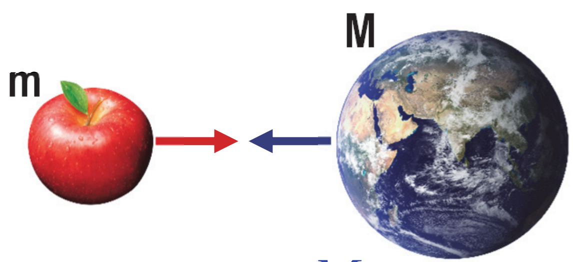


Selon la loi de Coulomb, la force est grande quand on est proche de la source. Elle diminue quand on s'éloigne de la source.

$$F_E = k\frac{|q_0||Q|}{r^2}$$



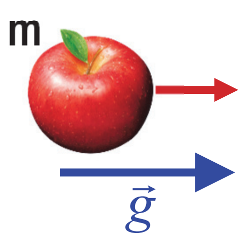
Le champ électrique : similitude avec la gravitation



$$F_g = G\frac{mM}{r^2}$$

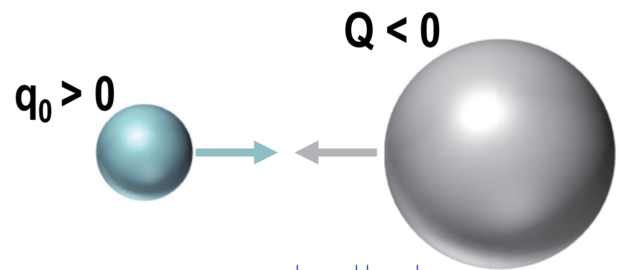
Champ gravitationnel

$$\vec{F}_g = m\vec{g}$$



$$\boxed{g = G\frac{M}{r^2}}$$

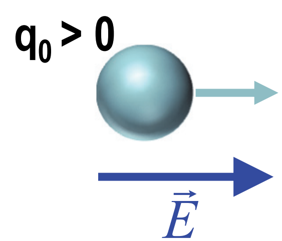
On remplace la masse M par un champ de gravitation **g**. Le champ gravitationnel est produit par M. Cela permet de se concentrer sur la physique agissant sur m en oubliant M, si l'on considère **g**.



$$F_E = k\frac{|q_0||Q|}{r^2}$$

Champ électrique

$$\vec{F}_E = q_0\vec{E}$$



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

On remplace la charge Q par un champ électrique **E**. Le champ électrique **E** est produit par Q. Cela permet de se concentrer sur la physique agissant sur q_0 en oubliant Q, si l'on considère E

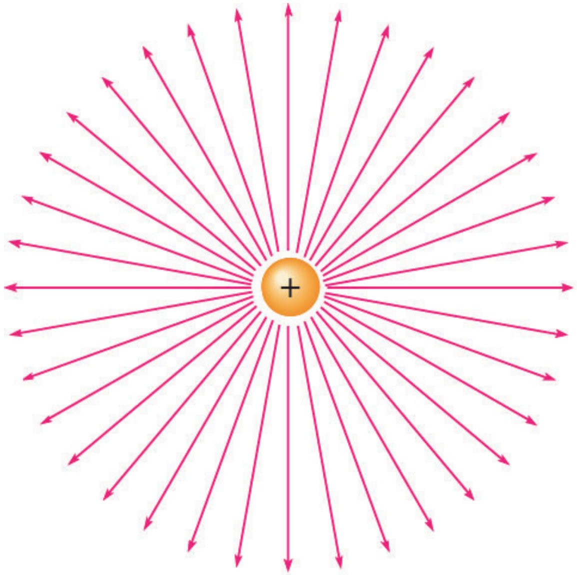
Lignes de champ électrique

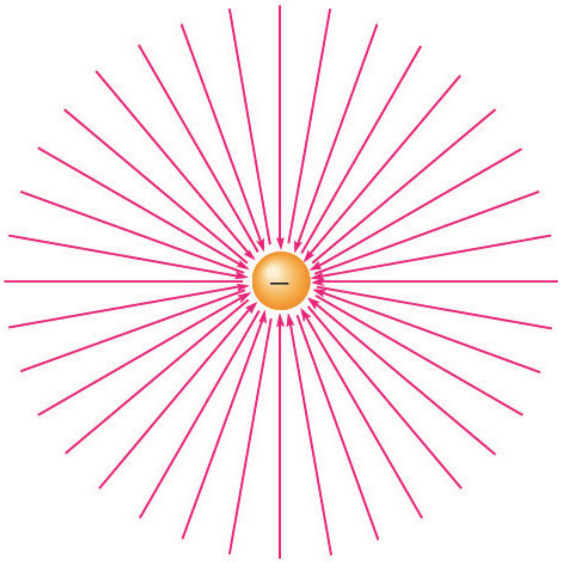
Les lignes de champ permettent de visualiser un champ vectoriel.

En chaque point de l'espace, on peut tracer une et une seule courbe à laquelle le champ électrique soit tangent, orientée dans le sens du champ électrique. Ces courbes sont appelées lignes de champ. Une charge test positive subit une force dirigée selon la tangente à la ligne de champ en tout point de l'espace et dans le même sens que la ligne de champ.

Les lignes de champ:

- divergent radialement à partir d'une charge ponctuelle positive.
- convergent radialement vers une charge ponctuelle négative.

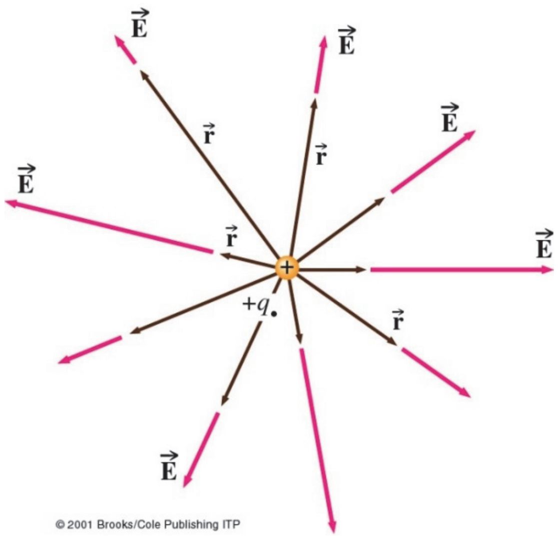




Plus les lignes de champ sont concentrées (denses), plus le champ est intense, et plus la force sur une charge test donnée sera grande

ATTENTION : Les lignes de champ ne se croisent jamais.

Expression du champ électrique pour une charge ponctuelle



La loi de Coulomb nous donne la force subie par une charge test q_0 placée à une distance r d'une charge source Q:

$$\vec{F}_E(\vec{r}) = k\frac{q_0 Q}{r^2}\hat{r}$$

Ainsi, le champ électrique à une distance r d'une charge ponctuelle est:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}_E(\vec{r})}{q_0} = k\frac{Q}{r^2}\hat{r}$$

Unité [E] = $\frac{\text{N}}{\text{C}}$

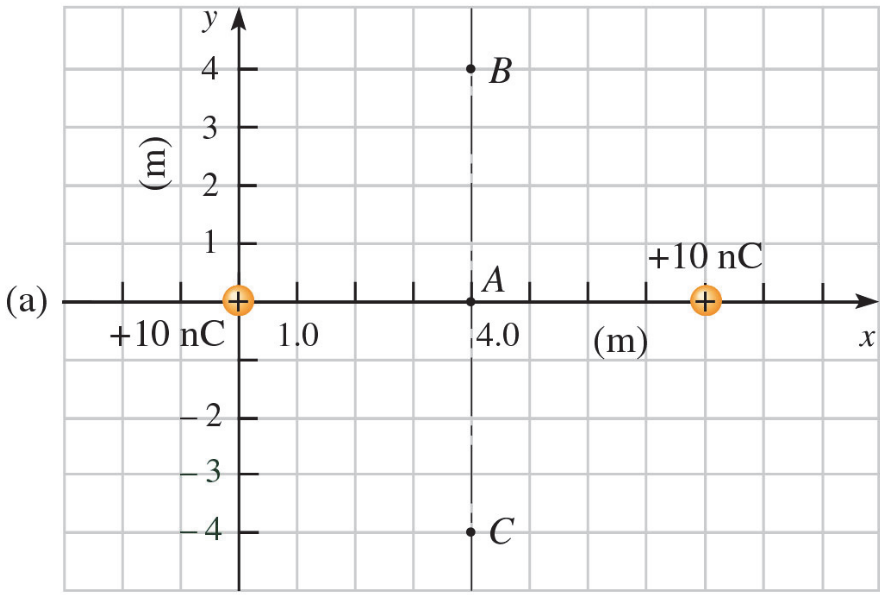
Le sens du champ est parallèle au vecteur $\vec{r}$ qui relie la source à la position si la charge source est positive, opposé à ce vecteur si la charge source est négative.

Ce résultat est extrêmement important: il nous permet – *au moins en principe* – de calculer le champ électrique de n'importe quelle distribution de charges qui peut être décrite comme un assemblage de charges ponctuelles. Les contributions des charges ponctuelles s'additionnent vectoriellement pour donner le champ total $\vec{E}$.

Champ électrique de charges ponctuelles – Exemple

QUESTION : Deux charges ponctuelles de +10nC chacune sont fixées à une distance de 8.0m.

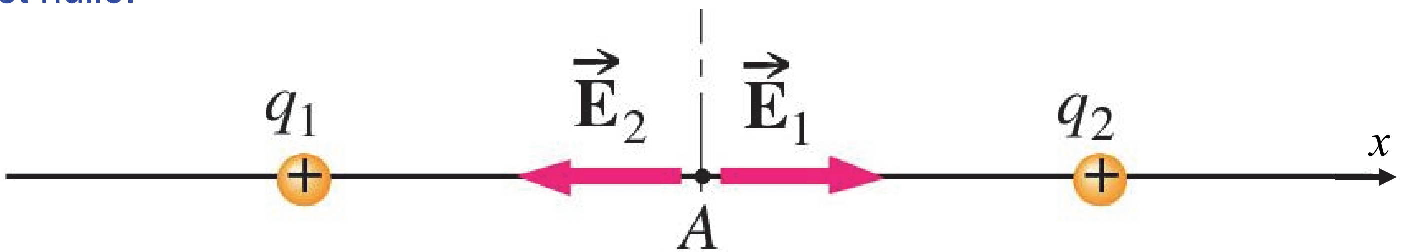
Calculez le champ électrique aux points A, B et C.



SOLUTION:

$$E_i = k\frac{q_i}{r^2}$$

Le point A est équidistant des deux charges. Leurs champs en ce point, $\vec{E}_1$ et $\vec{E}_2$ ont la même norme mais sont dirigés dans les directions $-x$ et $+x$, respectivement. Leur somme vectorielle est nulle.

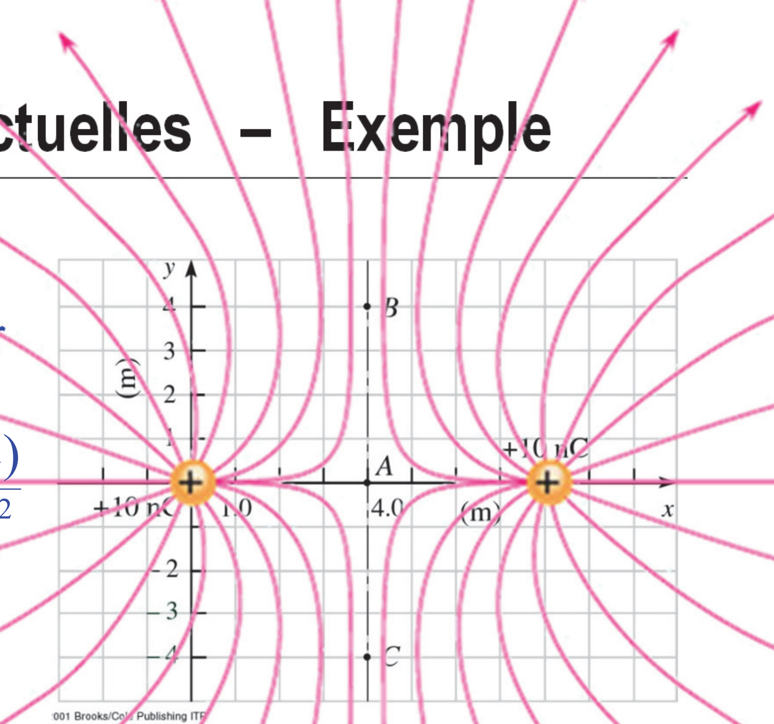


Champ électrique de charges ponctuelles – Exemple

Les points B et C se trouvent aussi sur l'axe de symétrie des deux charges. Les normes des deux champs sont par conséquent égales:

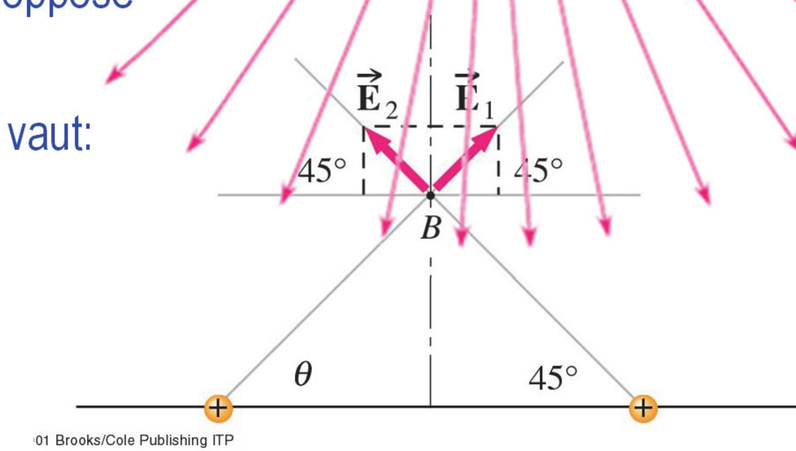
$$E_1 = E_2 = k\frac{q}{r^2} = (9.0\times10^9\,\mathrm{Nm^2/C^2})\frac{(+10.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})}{(4.0\mathrm{m}/\sin45°)^2}$$

$$= 2.81\mathrm{N/C}$$



Comme les vecteurs sont inclinés à 45º, leurs composantes horizontales sont égales et de signe opposé $\rightarrow$ elles s'annulent.

La composante verticale est dirigée vers le haut et vaut:



$$E_B = E_1\sin45° + E_2\sin45°$$

$$= 2\cdot(2.81\mathrm{N/C})\cdot(0.707) = 4.0\mathrm{N/C}$$

Par symétrie, $E_C = 4.0\mathrm{N/C}$, mais dirigée vers le bas.

ÉNERGIE ÉLECTROSTATIQUE

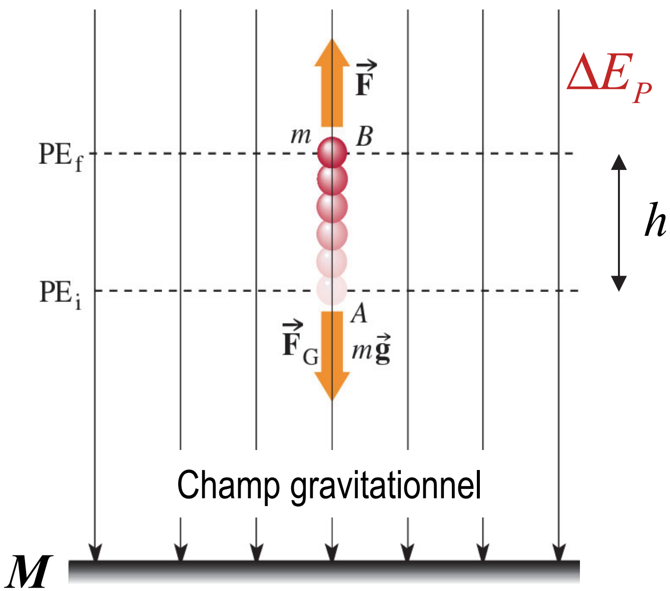
GRAVITATION	TRAVAIL : $W = \vec{F} \cdot \vec{d}$	ÉLECTROSTATIQUE

Il faut appliquer une force F pour éloigner une masse m d'une distance h à vitesse constante de M : $F = mg$

Cette force fourni un travail : $W = mgh$

W se retrouve sous forme d'énergie potentielle gravitationnelle de la masse :

$\Delta E_P = mgh$

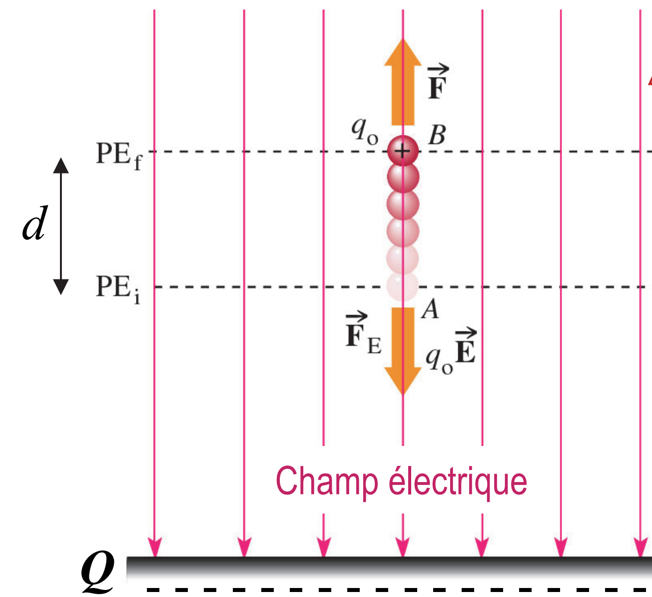


Il faut appliquer une force F pour éloigner une charge $q_0 > 0$ d'une distance d à vitesse constante de Q<0 : $F = q_0 E$

Cette force fourni un travail : $W = q_0 E d$

W se retrouve sous forme d'énergie potentielle électrostatique de la charge :

$\Delta E_P = q_0 E d$



ÉNERGIE ÉLECTROSTATIQUE

GRAVITATION	TRAVAIL : $F \propto 1/r^2$	ÉLECTROSTATIQUE

E_P augmente quand la force agit contre le champ gravitationnel.

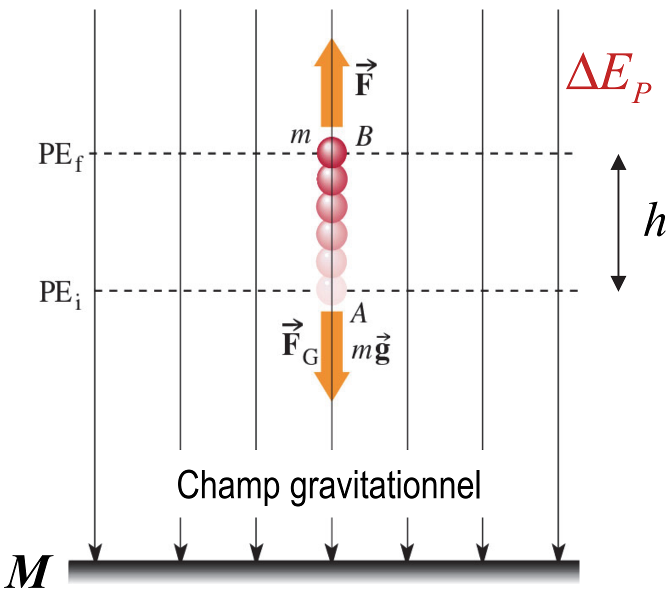
Cette énergie potentielle peut être regagnée en ramenant la masse à sa hauteur initiale;

la force gravitationnelle est conservative.

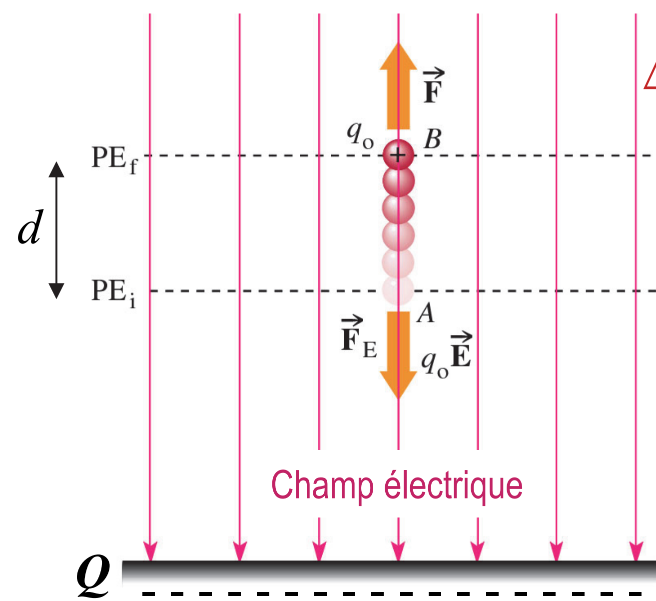
E_P augmente quand la force agit contre le champ électrique.

Cette énergie potentielle peut être regagnée en ramenant la charge à sa distance initiale;

la force électrique est conservative.



$$\Delta E_P = mgh$$



$$\Delta E_P = q_0 E d$$

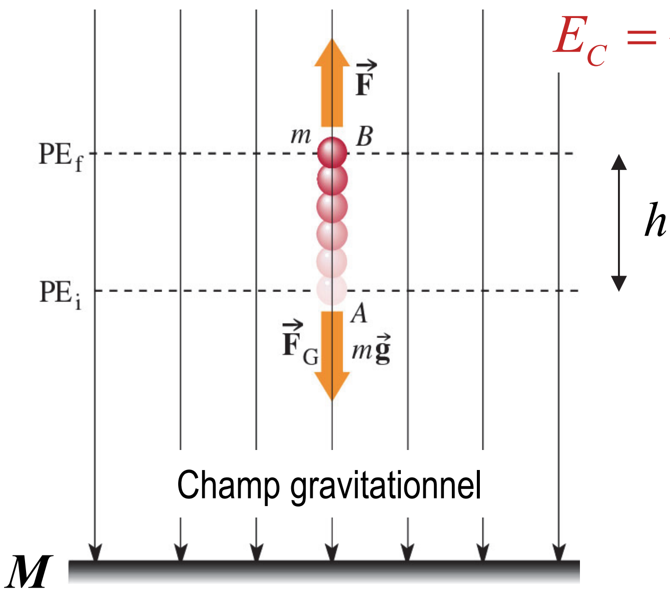
ÉNERGIE ÉLECTROSTATIQUE

GRAVITATION	TRAVAIL et ÉNERGIE	ÉLECTROSTATIQUE

Une masse m lâchée au voisinage d'une masse M immobile est accélérée vers M. C'est alors le champ gravitationnel de M qui fournit un travail: la masse m gagne de l'énergie cinétique aux dépens de son énergie potentielle.

$$E_P = mgh$$

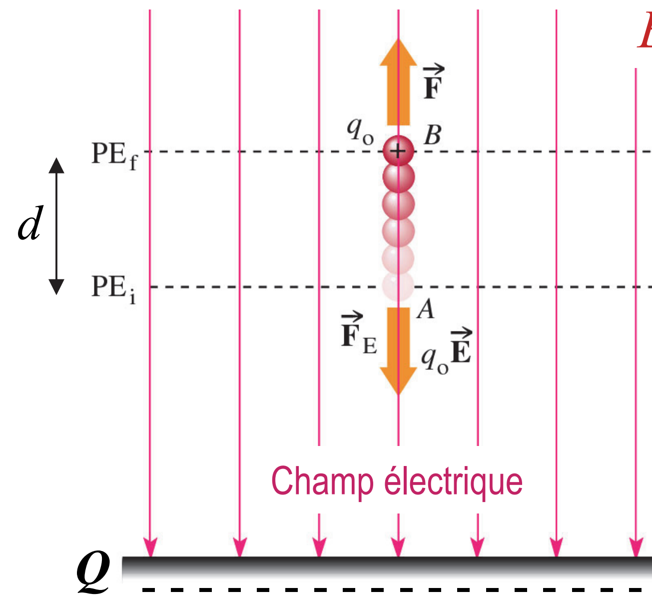
$$E_C = \tfrac{1}{2}mv^2$$



Une charge $q_0>0$ lâchée au voisinage d'une charge Q négative immobile est accéléré vers Q. C'est alors le champ électrique de Q qui fournit un travail: la charge positive (particule massive) gagne de l'énergie cinétique aux dépens de son énergie potentielle.

$$E_P = q_0 Ed$$

$$E_C = \tfrac{1}{2}mv^2$$



ÉNERGIE ÉLECTROSTATIQUE

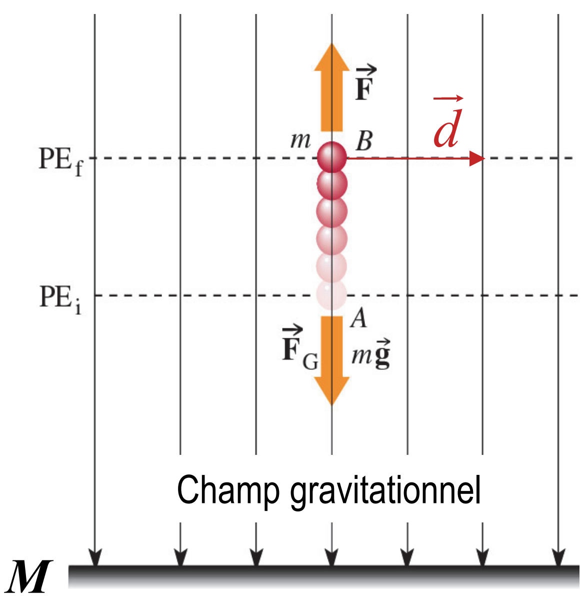
GRAVITATION	TRAVAIL et ÉNERGIE	ÉLECTROSTATIQUE

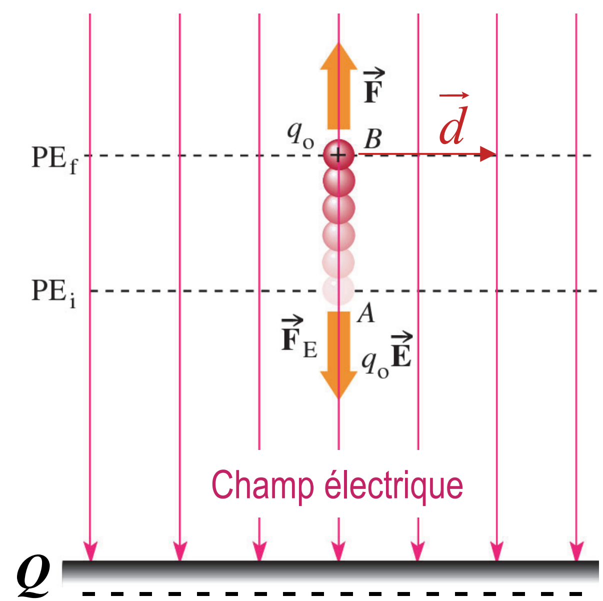
Déplacer une masse perpendiculairement aux lignes de champ gravitationnel (i.e. horizontalement) ne change pas son énergie potentielle.

Déplacer une charge perpendiculairement aux lignes de champ électrique ne change pas son énergie potentielle.

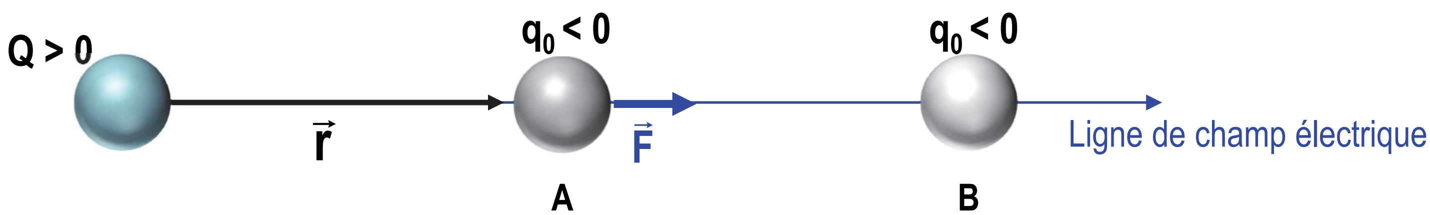
$$\boxed{W = \vec{F} \cdot \vec{d} = Fd\cos\theta = 0}$$

Toute ligne perpendiculaire aux lignes de champ définit une équipotentielle.





Énergie potentielle de q_0 dans un champ E généré par une charge ponctuelle Q



$$\Delta E_P^{A\to B} = W^{A\to B} = \int_A^B \vec{F}\cdot d\vec{r} = -\int_A^B \vec{F}_E\cdot d\vec{r} = -q_0\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{r}$$

$$\Delta E_P^{A\to B} = -q_0\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{r} = -q_0\int_A^B E\,dr = -\,q_0\int_A^B k\frac{Q}{r^2}dr = -\,kq_0Q\int_A^B\frac{1}{r^2}dr$$

$$= kq_0Q\left(\frac{1}{r_B}-\frac{1}{r_A}\right) = E_P^B - E_P^A$$

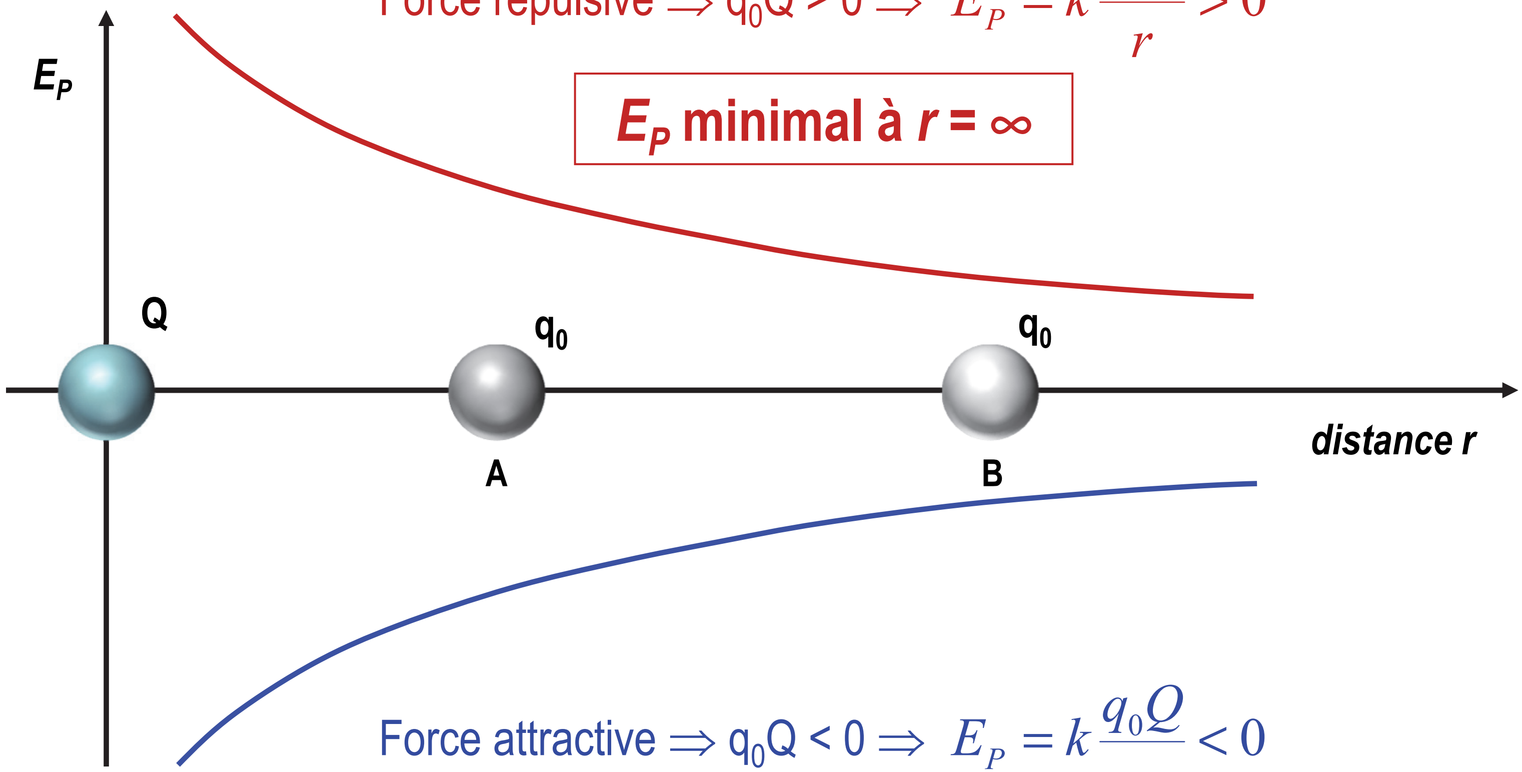
Si $r_B \longrightarrow \infty$ on a $E_P{}^B \longrightarrow 0$: cela fixe le zéro d'énergie potentielle à l'infini. Donc l'énergie potentielle de q_0 au point r dans le champ E généré par la charge Q est

$$\boxed{E_P(r) = k\frac{q_0 Q}{r}}$$

Discussion sur l’énergie potentielle: force attractive et force répulsive

Force répulsive $\Rightarrow q_0Q > 0 \Rightarrow \; E_P = k\dfrac{q_0Q}{r} > 0$

$\boxed{\boldsymbol{E_P \text{ minimal à } r = \infty}}$



Force attractive $\Rightarrow q_0Q < 0 \Rightarrow \; E_P = k\dfrac{q_0Q}{r} < 0$

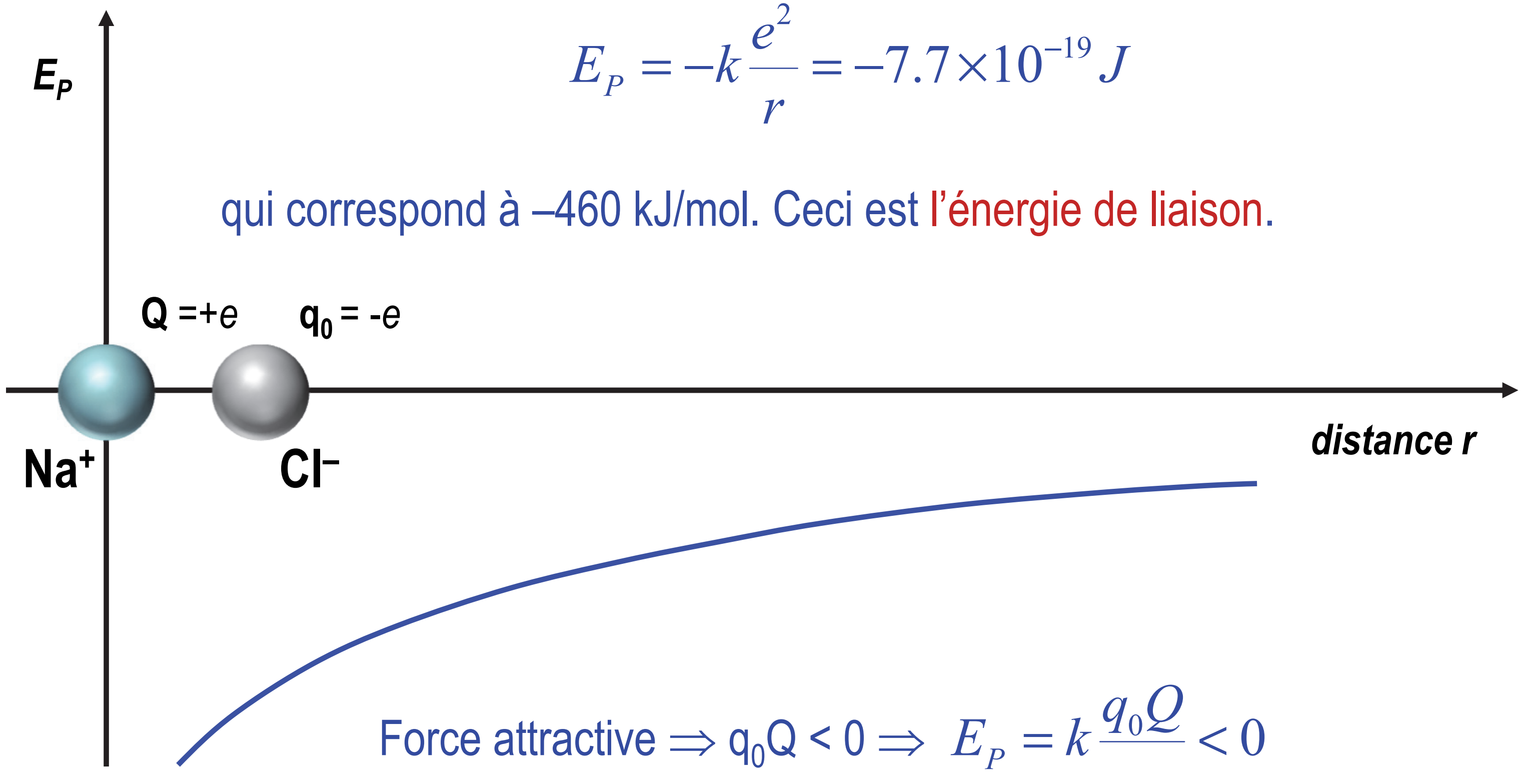
$\boxed{\boldsymbol{E_P \text{ minimal à } r = 0}}$

Énergie de liaison de NaCl – Exemple

On considère les ions Na^+ et Cl^-, de charges +e et –e. A l'infini, l'ion Cl^- a une énergie potentielle électrique $E_P = 0$. À une distance r = 0.3 nm :

$$E_P = -k\frac{e^2}{r} = -7.7\times10^{-19}\,J$$

qui correspond à –460 kJ/mol. Ceci est l'énergie de liaison.



Force attractive $\Rightarrow q_0Q < 0 \Rightarrow E_P = k\frac{q_0Q}{r} < 0$

E_P minimal à r = 0

POTENTIEL ÉLECTRIQUE / TENSION ÉLECTRIQUE

Nous savons calculer le champ de force d'une charge quelconque. Mais ce champ dépend de la charge test q_0 utilisée pour le sonder.

Nous avions alors défini le champ électrique par unité de charge test pour qu'il ne dépende que de la charge source Q.

$$F = k\frac{|q_0||Q|}{r^2} \qquad \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad \left[\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}\right]$$

Pour obtenir une énergie potentielle E_P qui ne dépend pas de la charge test, nous procédons de manière analogue: E_P est divisée par la charge test.

Nous obtenons ainsi le potentiel électrique V :

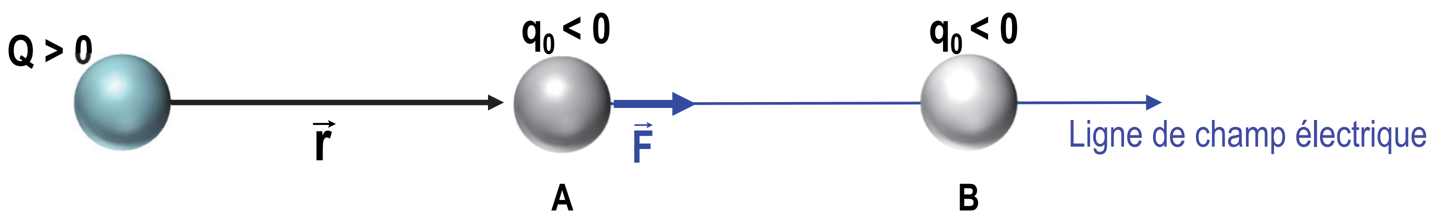
$$V = \frac{E_p}{q_0} \quad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}\right]$$

L'unité SI du potentiel électrique est le Joule/Coulomb ou Volt : 1 [J/C] = 1[V].

Le potentiel électrique est une grandeur scalaire.

Il est communément appelé voltage ou tension.

Potentiel électrique produit par une charge ponctuelle Q



$$\Delta E_P^{A\to B} = E_P^B - E_P^A = kq_0Q\left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A}\right)$$

Selon la définition de potentiel électrique, la différence de potentiel entre les points A et B vaut:

$$\Delta V^{A\to B} = \frac{\Delta E_P^{A\to B}}{q_0} = kQ\left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A}\right) = V_B - V_A$$

Le potentiel est défini à une constante près. Si on a défini $V = 0$ à l'infini, on trouve que le potentiel produit au point *r* par la charge Q est

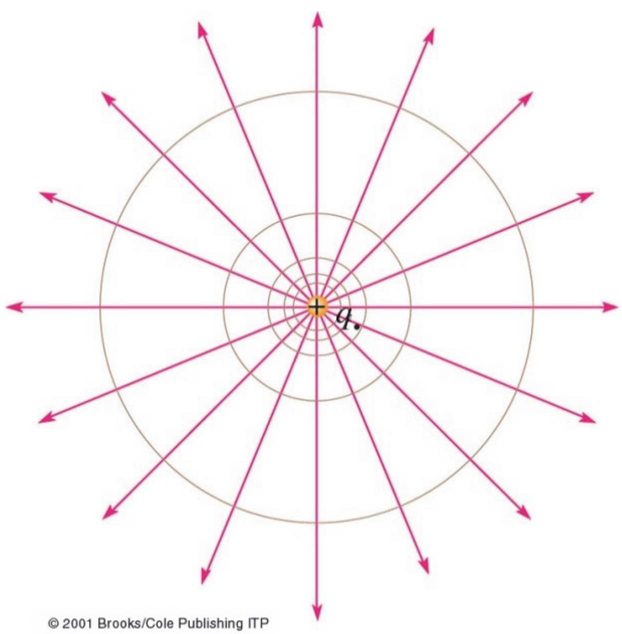
$$\boxed{V(r) = k\frac{Q}{r}}$$

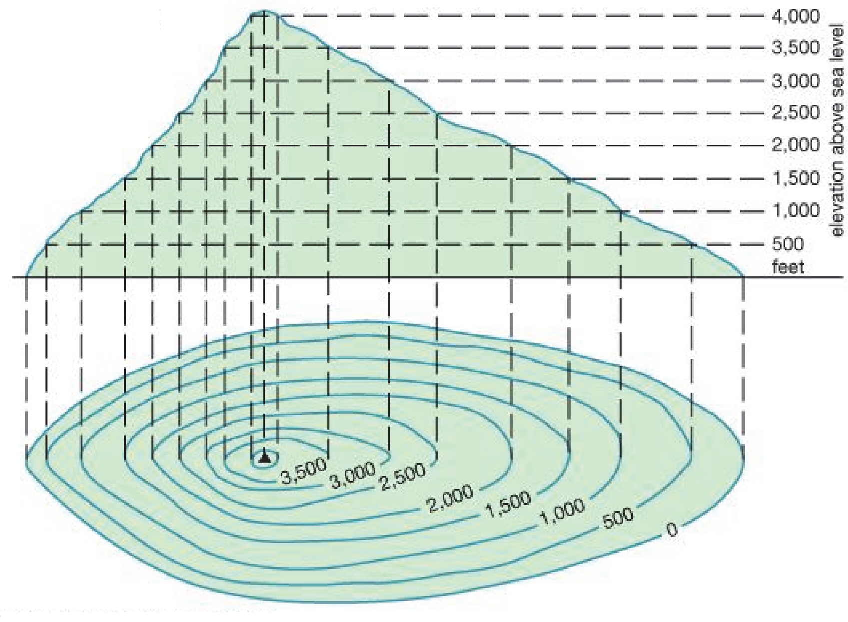
Le potentiel, tout comme l'énergie potentielle, est une grandeur scalaire. Le potentiel généré par un nombre fini de charges est simplement la somme des potentiels dus à chaque charge.

Équipotentielles et courbes de niveaux

Les équipotentielles relient les points de même potentiel, ou de même énergie potentielle électrique pour une charge donnée, c'est à dire entre lesquels on peut se déplacer sans travail contre le champ électrique.

Pour une charge ponctuelle q, les surfaces équipotentielles sont des sphères concentriques centrées sur la charge. Ces surfaces sont perpendiculaires aux lignes de champ électrique.

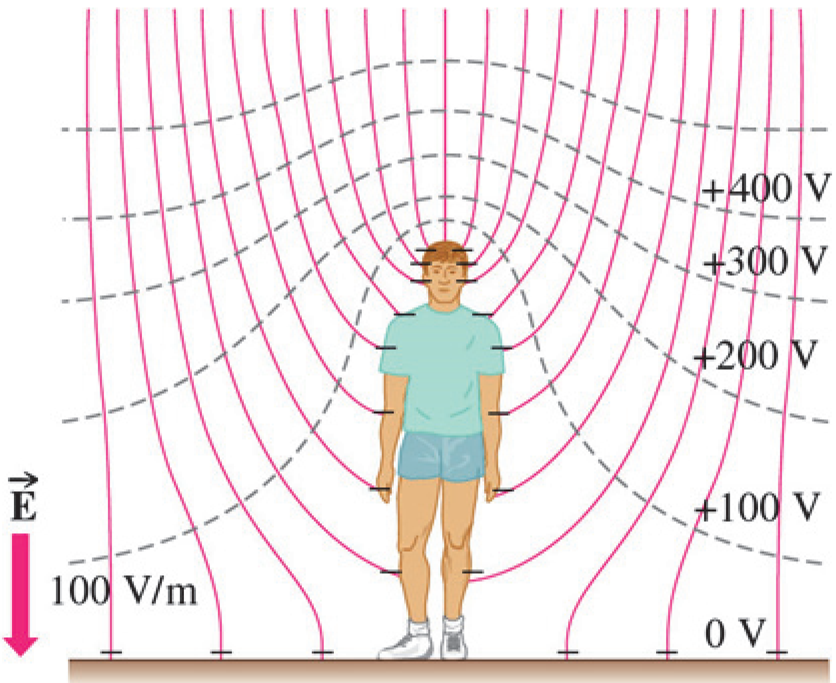


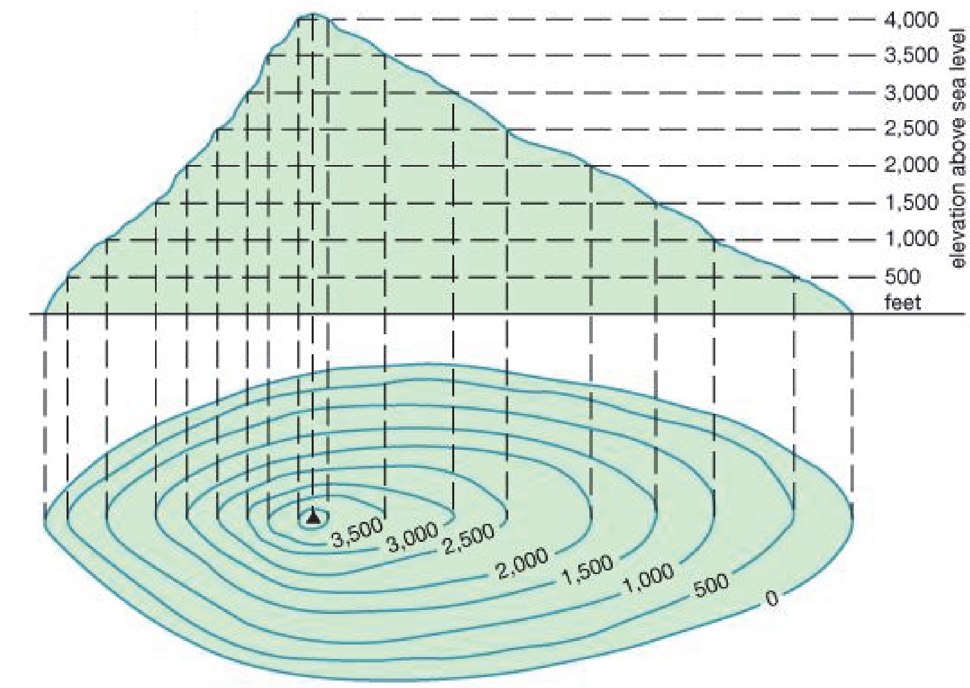


Analogie avec la gravitation : Les courbes de niveau représentent l'intersection de la montagne avec des plans à hauteur constante. Ces plans sont des "équipotentielles" dans le champ gravitationnel.

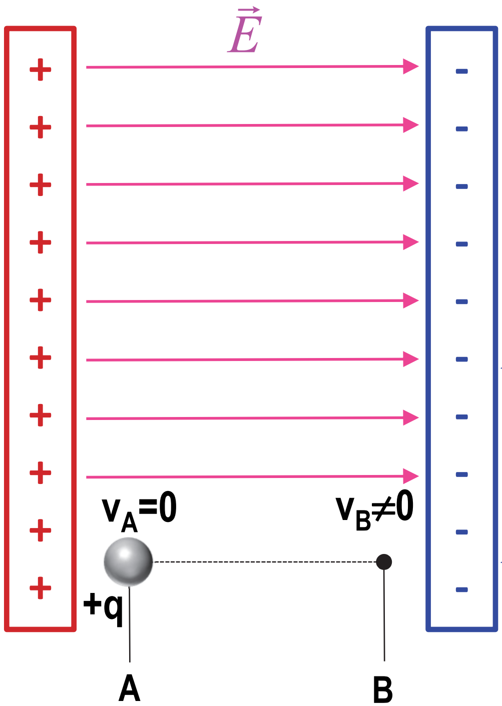
Une réflexion…

Quelle information physique peut-on extraire de l'espacement entre les courbes équipotentielles ?





Accélérateur de particules



Une charge +q est dans un champ électrique E produit par 2 plaques parallèles. Cette charge subira une force +qE dirigée vers la droite et sera accélérée.

Conservation énergie mécanique $\Rightarrow E_{TOT} = E_P + E_C$ = constante

$$\left.\begin{aligned} E_{TOT}^A &= qV^A + \underbrace{\frac{1}{2}mv_A^2}_{0} = qV^A \\ E_{TOT}^B &= qV^B + \frac{1}{2}mv_B^2 \end{aligned}\right\} E_{TOT}^A = E_{TOT}^B \Rightarrow qV^A = qV^B + \frac{1}{2}mv_B^2$$

$$q\left(V^A - V^B\right) = q\Delta V = \frac{1}{2}mv_B^2$$

L'énergie cinétique acquise est proportionnelle à la charge et à la différence de potentiel entre le point de départ et d'arrivée, exprimée en volts.

Pour cette raison, on exprime parfois, dans le contexte de l'accélération de particules notamment, l'énergie en électrons-volts: 1 eV = 1.602 x 10^{-19} J

PROCHAINE SÉANCE D'EXERCICES

Mardi 9 Décembre 13:15 – 15:00

Salles Müller et S1-S2