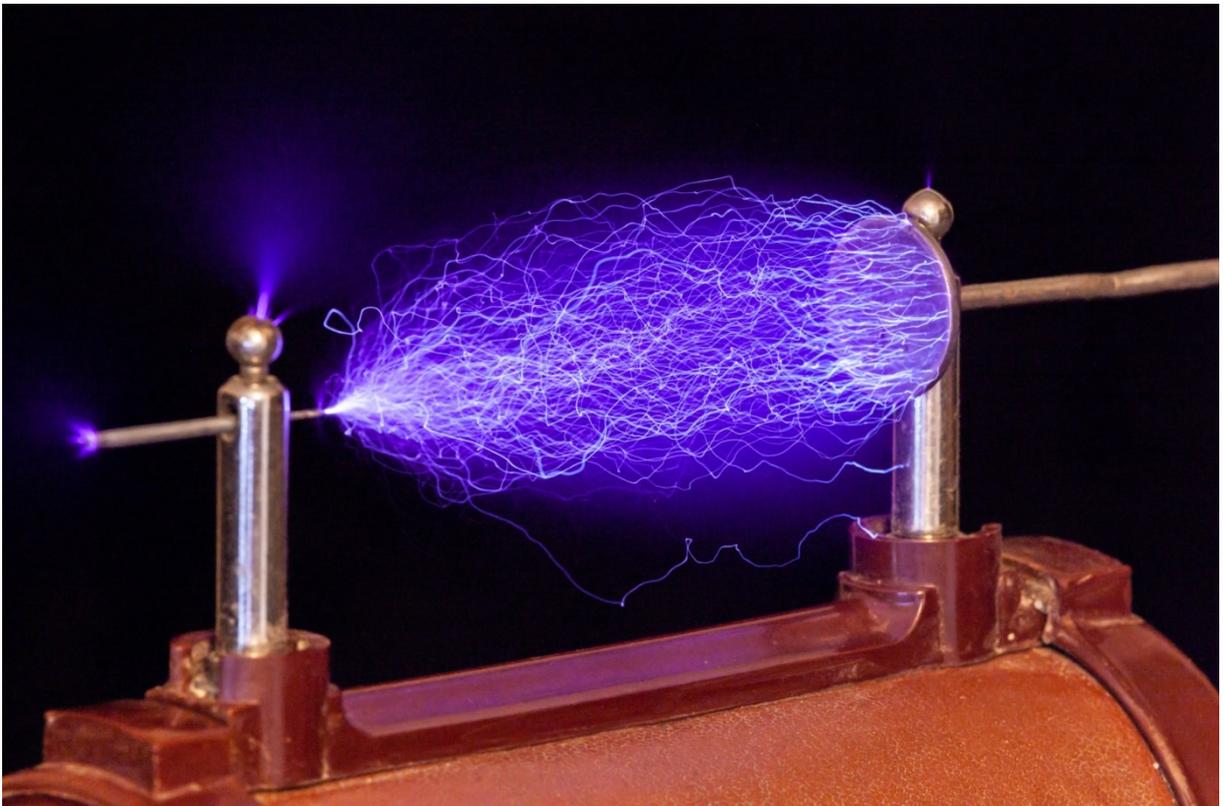


4.

Champ et force électriques



© Andrey Semenov Shutterstock.com

Sommaire

1	Force électrique	1
2	Influence électrique	3
2.1	Influence électrique dans un conducteur	3
2.2	Influence électrique dans un isolant	3
3	Champ électrique	5
3.1	Définition du vecteur champ électrique	5
3.2	Caractéristiques.....	6
3.3	Champ électrique d'une charge ponctuelle	6
3.4	Champ électrique de plusieurs charges ponctuelles	7
3.5	Lignes de champ et spectres électriques	9
3.5.1	Charge ponctuelle isolée	9
3.5.2	Deux charges ponctuelles de signe opposé, mais égales en valeur absolue	9
3.5.3	Deux charges ponctuelles de même signe et égales en valeur	10
3.5.4	Champ électrique autour d'une pointe.....	10
3.6	Champ électrique uniforme	11
3.7	Écrantage d'un champ électrique ; cage de Faraday	12
4	Énergie potentielle électrique.....	13
4.1	Définition.....	13
4.2	Surfaces et lignes équipotentiels	14
4.3	Potentiel électrique et différence de potentiel	15
4.4	L'électronvolt	17
5	Pour en savoir plus	19
6	Exercices.....	22

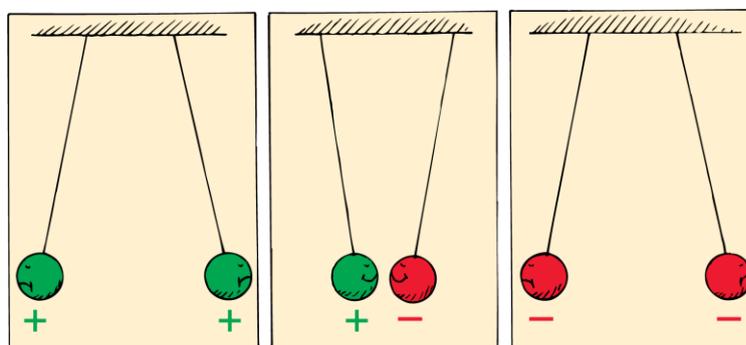
1 Force électrique

L'interaction électromagnétique décrit l'interaction entre charges électriques. Elle est à la base de tous les phénomènes électriques et magnétiques, tels que le frottement, le courant électrique, le magnétisme, la lumière et les réactions chimiques. En outre, elle est responsable de la :

- structure de l'Univers à petite échelle (au niveau de l'atome : liaison des électrons au noyau atomique ; au niveau d'une molécule : liaison entre atomes ; au niveau d'un cristal : liaison entre molécules)
- rigidité des corps solides, de la viscosité des fluides

Lorsque les charges sont au repos, l'interaction est purement électrique. La force d'interaction est alors appelée **force électrostatique** ou **force électrique** ou encore **force de Coulomb**. Ce n'est qu'au XVIII^e siècle qu'on a constaté que :

Deux charges de même signe se repoussent. Deux charges de signe opposé s'attirent.



Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) analysa dans de nombreuses expériences les caractéristiques de la force électrique. Il a mesuré pour la première fois l'intensité de la force électrique qu'un corps chargé exerce sur un autre. Les résultats de ses expériences l'ont mené à publier en 1785 une loi, que l'on nomme aujourd'hui en son honneur, **la loi de Coulomb** :

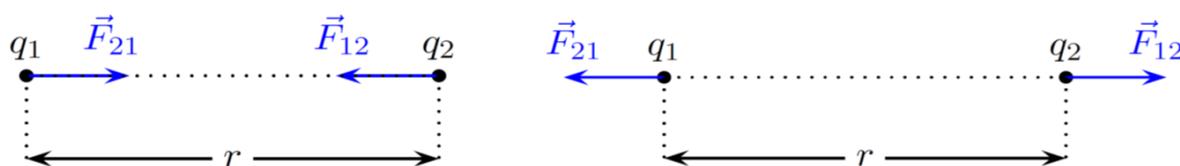
Deux charges ponctuelles q_1 et q_2 au repos, séparées d'une distance r dans le vide, interagissent électriquement avec des forces $\vec{F}_{1/2}$ et $\vec{F}_{2/1}$, dont les intensités

- sont égales d'après le principe de l'action et de la réaction ;
- sont proportionnelles au produit de leurs charges ;
- sont inversement proportionnelles au carré de leur distance.

Mathématiquement :

$$F_{1/2} = F_{2/1} = F_e = k \cdot \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2}$$

où $k = 8,987 \cdot 10^9 \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}$ désigne la constante de proportionnalité (constante de Coulomb).



Charges de signe opposé : attraction

Charges de même signe : répulsion

Remarques

- La force électrique est une force centrale.
- La loi de Coulomb est une loi en carré inverse et sa portée est infinie.
- Alors que la force de gravitation est toujours attractive, la force électrique peut être soit attractive, soit répulsive.

La loi de Coulomb est similaire à la loi de la gravitation de Newton. Cependant, la constante de gravitation universelle K est énormément plus petite que la constante de Coulomb k . Voilà pourquoi l'interaction électrique est beaucoup plus forte que l'interaction gravitationnelle¹.

ATTRACTIVE

PRODUIT DES MASSES

$$F_g = K \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

PETITE VALEUR

LOI EN CARRE INVERSE

ATTRACTIVE OU REPULSIVE

PRODUIT DES CHARGES

$$F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

GRANDE VALEUR

LOI EN CARRE INVERSE

Exercice résolu

Énoncé : Considérons deux électrons situés à une distance r l'un de l'autre. La masse de l'électron vaut $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg, sa charge q est égale, en valeur absolue, à la charge élémentaire : $|q| = e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Comparer les normes des interactions gravitationnelle et électrique entre les deux électrons.

Solution : Expression de l'intensité de la force gravitationnelle : $F_g = K \frac{m_e^2}{r^2}$

Expression de l'intensité de la force de Coulomb : $F_e = k \frac{e^2}{r^2}$

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{k \frac{e^2}{r^2}}{K \frac{m_e^2}{r^2}} = \frac{k e^2}{K m_e^2} = \frac{k}{K} \left(\frac{e}{m_e} \right)^2 = \frac{8,987 \cdot 10^9}{6,673 \cdot 10^{-11}} \left(\frac{1,602 \cdot 10^{-19}}{9,11 \cdot 10^{-31}} \right)^2 = 4,2 \cdot 10^{42}$$

Lorsqu'on étudie les mouvements des particules chargées, la force de gravitation peut être négligée devant la force électrique².

■ As-tu-compris ?

1. Avec quelle force électrique s'attirent deux ballons sphériques séparés de 2 m, portant des charges respectives de $+3 \cdot 10^{-8}$ C et $-2 \cdot 10^{-8}$ C ?

¹ La constante k est souvent exprimée en fonction d'une autre constante, la permittivité du vide :

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N m}^2}, \text{ suivant la relation : } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

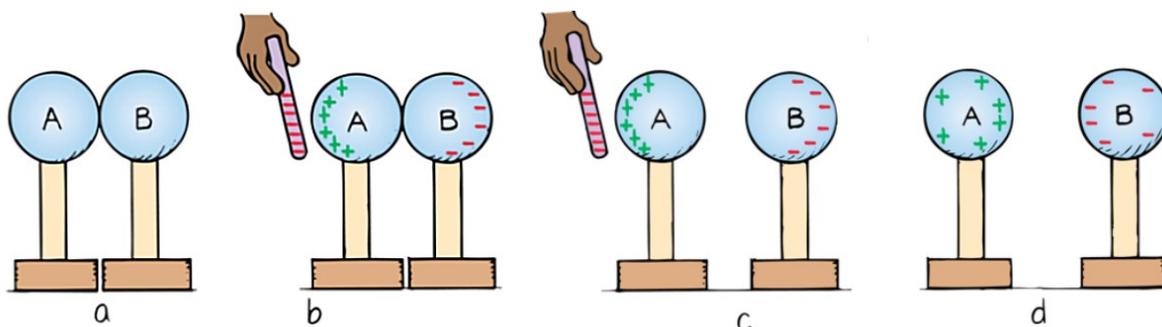
² Le physicien et lauréat du prix Nobel de Physique, Richard Feynman (1918-1988), illustre l'énorme différence entre les intensités des forces électrique et gravitationnelle à l'aide d'un exemple :

https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_01.html#Ch1-S1

2 Influence électrique

On appelle **influence électrique**, la redistribution de charges électriques dans un corps causée par des charges électriques à proximité.

2.1 Influence électrique dans un conducteur

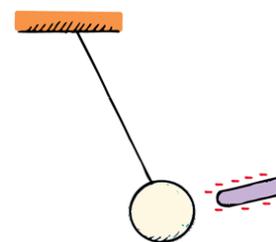


- Deux sphères conductrices A et B électriquement neutres et isolées du sol sont en contact et forment ainsi un seul conducteur non chargé.
- Lorsqu'un bâton d'ébonite chargé négativement est approché de A, les électrons libres sont repoussés sous l'effet de la force électrique exercée par le bâton chargé. B présente un excès d'électrons, c.-à-d. une charge négative ; A présente un défaut d'électrons, c.-à-d. une charge positive : il y a **séparation de charges**.
- Si A et B sont séparées en présence du bâton d'ébonite, les charges opposées ne peuvent plus se neutraliser et les sphères portent une charge électrique équivalente en valeur absolue, mais de signe opposé.
- A et B vont rester chargées si le bâton est éloigné. Les deux sphères ont été chargées par **influence**. Les charges se répartissent uniformément sur les surfaces des sphères car des charges de même signe se repoussent.

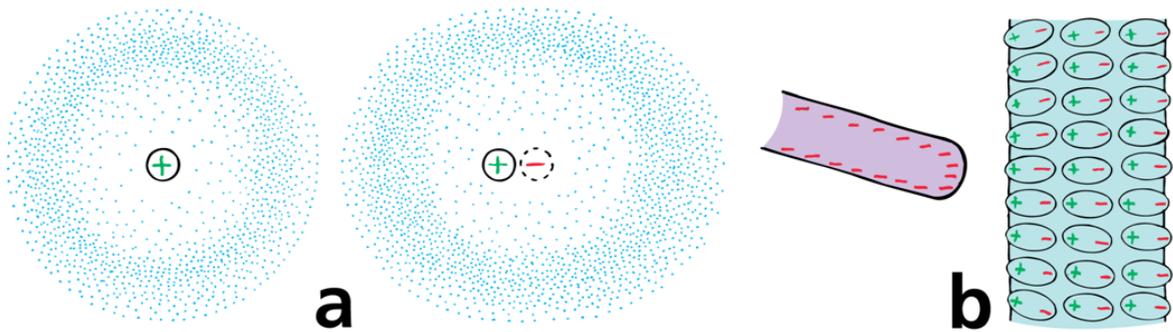
2.2 Influence électrique dans un isolant

Contrairement aux conducteurs, les isolants ne renferment pas d'électrons libres de se déplacer. Or, l'influence électrique a également lieu sous forme microscopique dans les isolants.

Lorsqu'on place un bâton d'ébonite chargé négativement à proximité d'une boule isolante d'un pendule électrique, on observe que la boule est attirée par le bâton, bien qu'elle soit électriquement neutre.



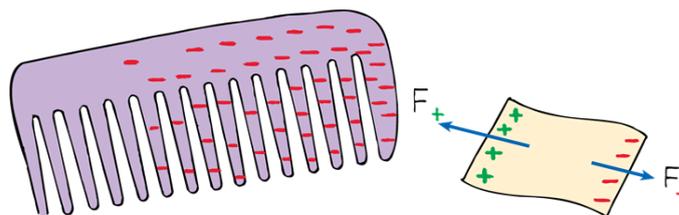
Les nuages électroniques des atomes à la surface de la boule se déforment de sorte qu'il se forme une région chargée négativement et une région chargée positivement dans chaque atome. Les atomes deviennent des **dipôles électriques** ; ce phénomène est appelé **polarisation électronique**. Il en résulte une charge surfacique positive du côté du bâton et une charge surfacique négative de l'autre côté. La charge surfacique positive étant plus près du bâton, la boule est attirée.



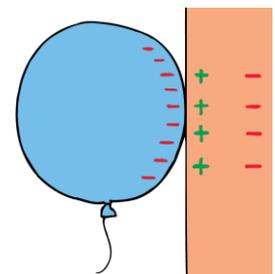
a. Une charge négative à gauche de l'atome neutre provoque une déformation du nuage électronique.
 b. Une charge superficielle positive se crée sur l'isolant en face au bâton chargé. L'isolant est attiré.

Exemples

- Des morceaux de papier électriquement neutres sont attirés par influence par un corps chargé, tel qu'un peigne chargé. Si les morceaux touchent le peigne ils s'envolent soudainement. Une électrisation par contact a lieu ; les morceaux de papier acquièrent le même signe de charge que le peigne et sont alors repoussés.

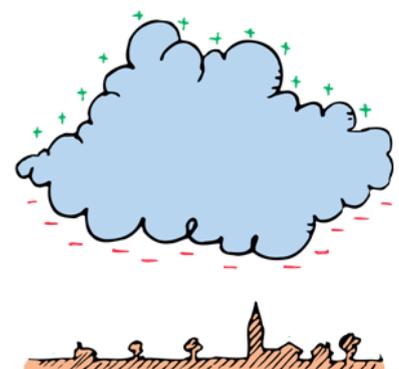


- Un ballon gonflé frotté sur les cheveux est chargé électriquement. Lorsqu'on place le ballon contre un mur il y reste accroché. Par influence, la charge sur le ballon induit une charge de signe opposé sur la surface du mur.



■ As-tu-compris ?

- Lorsqu'un nuage chargé négativement en bas et positivement en haut se déplace au-dessus du sol, le sol
 - devient chargé négativement.
 - devient chargé positivement.
 - ne devient pas chargé parce que le nuage est électriquement neutre.



3 Champ électrique

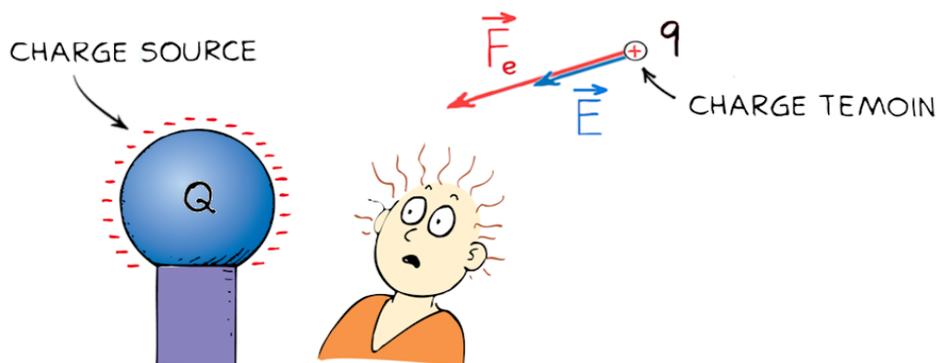
On dit qu'il existe un champ électrique en un point de l'espace, si une charge témoin placée en ce point est soumise à une force électrique. Même si l'on enlève la charge témoin, le champ électrique persiste.

3.1 Définition du vecteur champ électrique

Le **vecteur champ électrique** \vec{E} en un point de l'espace correspond à la force électrique qui s'exerce en ce point sur l'unité de charge :

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

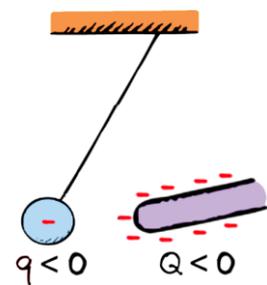
L'unité SI d'intensité du champ électrique est le newton par coulomb : $[E] = 1 \frac{N}{C}$



Exemple

Une boule d'un pendule électrique et un bâton d'ébonite sont tous les deux chargés négativement. Si on approche le bâton de la boule, celle-ci est repoussée. La répulsion électrique de la boule de charge q peut s'interpréter de deux manières différentes :

- La charge q subit la force électrique répulsive qui est exercée à distance par l'autre charge Q .
- La charge Q du bâton, appelée **charge source**, associe à tout point de l'espace un champ électrique. La **charge témoin** q « sent » la présence du champ électrique et subit la force électrique qui est exercée directement par le champ.



À l'aide du concept de champ, la force électrique qui s'exerce sur la charge q peut être déterminée sans avoir besoin de se référer à la charge Q qui est située au loin. Il suffit de considérer les caractéristiques du vecteur champ électrique \vec{E} à l'emplacement de la charge q . L'action à distance de Q est remplacée par une action locale de \vec{E} . La force électrique que subit la charge témoin s'écrit dès lors : $\vec{F}_e = q \vec{E}$

Remarque

Dans la suite nous n'allons considérer que des champs électriques qui sont créés ou subis par des charges au repos. De tels champs électriques sont encore appelés **champs électrostatiques**.

3.2 Caractéristiques

1. *Origine* : \vec{E} est associé à tout point de l'espace où règne le champ
2. *Direction* : celle de la force électrique \vec{F}_e
3. *Sens* : celui de \vec{F}_e si $q > 0$; sens opposé à \vec{F}_e si $q < 0$
4. *Intensité (norme)* : $E = \frac{F_e}{|q|}$

3.3 Champ électrique d'une charge ponctuelle

Considérons une charge témoin ponctuelle $q > 0$ et une charge source ponctuelle Q , qui sont séparées dans le vide d'une distance r .

Q exerce sur q une force électrique $\vec{F}_e = q \vec{E}$. Deux cas se présentent :



Vecteur champ électrique à une distance r d'une charge source ponctuelle

Dans les deux cas l'intensité de la force électrique est donnée par la loi de Coulomb : $F_e = k \cdot \frac{|Q \cdot q|}{r^2}$

Caractéristiques

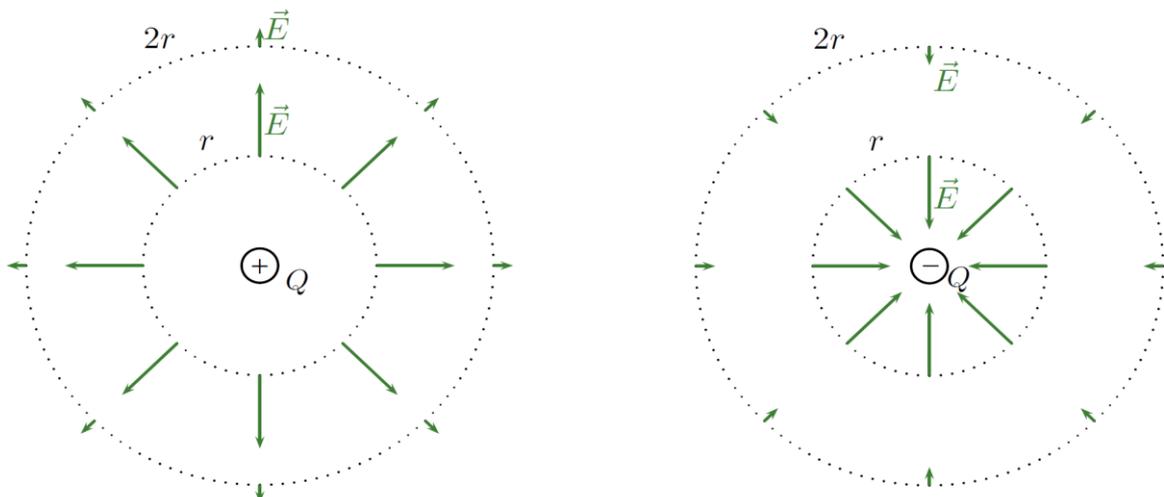
1. *Direction* : radiale, centrée sur la charge source Q
2. *Sens* : centrifuge si $Q > 0$, centripète si $Q < 0$
3. *Intensité (norme)* :

$$E = \frac{F_e}{|q|} = \frac{k \cdot \frac{|Q \cdot q|}{r^2}}{|q|} = k \frac{|Q|}{r^2}$$

$E \sim |Q|$: E est proportionnelle à la valeur absolue de la charge source

$E \sim \frac{1}{r^2}$: E est inversement proportionnel à r (loi en carré inverse)

Le champ électrique créé par la charge source Q est indépendant de la charge test q .



Représentation du champ électrique d'une source ponctuelle positive, respectivement négative

■ **As-tu-compris ?**

3. Supposons que le champ électrique à une distance de 1 m d'une charge ponctuelle a une certaine intensité. Le champ électrique à une distance de 2 m de la même charge est alors
 - A. identique
 - B. deux fois plus grande
 - C. deux fois petite
 - D. quatre fois plus grande.
 - E. quatre fois plus petite.
4. Des mesures montrent qu'il y a un champ électrique qui entoure la Terre. Son intensité vaut environ 100 N/C à la surface de la Terre et il pointe vers la Terre. Peux-tu en déduire si la Terre est chargée positivement ou négativement ?
5. Remplir les cases vides du tableau. La charge source est ponctuelle.

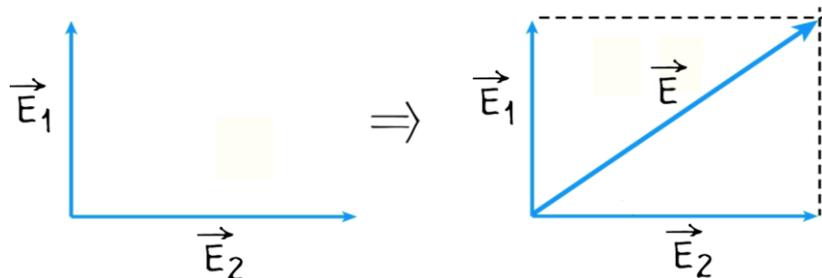
	Charge source (C)	Charge test (C)	F_e (N)	E (N/C)	Distance
a.	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	0,2		r
b.	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$		$2 \cdot 10^5$	r
c.	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	0,4		r
d.	$8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$		$4 \cdot 10^5$	r
e.	$8 \cdot 10^{-4}$		0,6		r
f.	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$		$1 \cdot 10^5$	$2r$
g.	$8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$			$2r$
h.	$8 \cdot 10^{-4}$		0,1		$2r$

3.4 Champ électrique de plusieurs charges ponctuelles

Le vecteur champ électrique \vec{E} créé en un point de l'espace par plusieurs charges ponctuelles Q_1, Q_2, Q_3, \dots est égal à la somme vectorielle des vecteurs champ électrique $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots$, créés par chacune des charges au point considéré :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

Pour déterminer le champ électrique résultant \vec{E} de plusieurs champs électriques qui n'ont pas la même direction, on peut utiliser la méthode du parallélogramme :



Exercice résolu

Énoncé : Les points A , B et C forment les sommets d'un triangle équilatéral de longueur de côté 10 cm. En A et B sont placées deux charges ponctuelles $Q = +20 \mu\text{C}$.

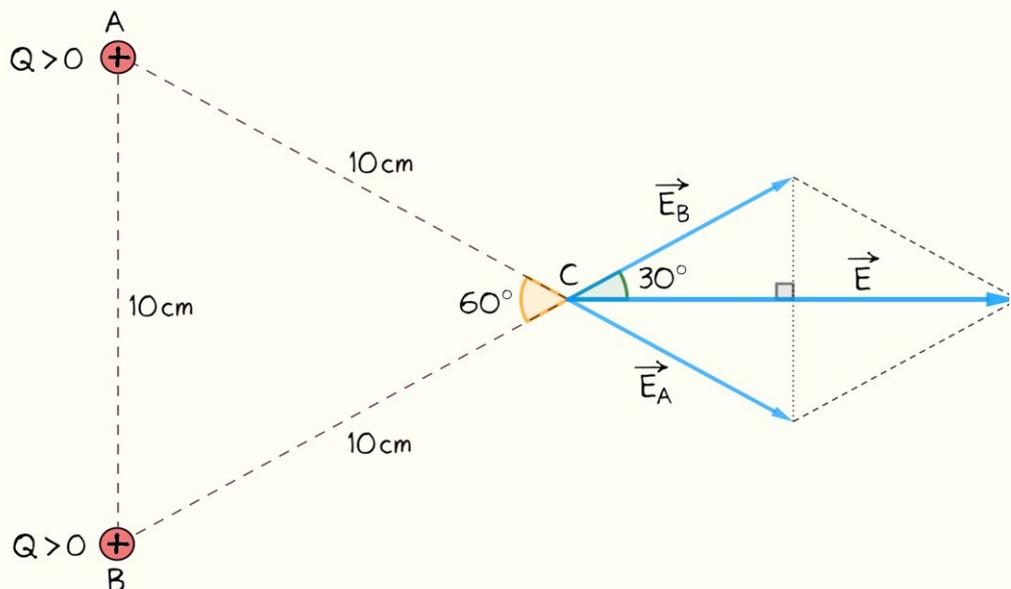
- Déterminer les caractéristiques (direction, sens et intensité) du champ électrique résultant en C .
- Calculer l'intensité de la force électrique qui agit sur un électron placé en C . Préciser la direction et le sens de cette force.

Solution :

- Intensité du champ électrique créé par la charge Q_A en C :

$$E_A(C) = k \frac{|Q_A|}{AC^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{20 \cdot 10^{-6}}{0,1^2} = 1,8 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Comme $Q_A = Q_B$ et $AC = BC$, on a $E_B(C) = E_A(C) = 1,8 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$



Par symétrie, la direction du vecteur champ électrique \vec{E} est perpendiculaire au segment $[AB]$, son sens est orienté vers la droite, et son intensité vaut

$$E(C) = 2 \cdot E_A(C) \cdot \cos(30^\circ) = 2 \cdot 1,8 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 3,1 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

- Force électrique sur un électron placé en C :

$$F_e = |q_e| E = e E = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 3,1 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ N}$$

Puisque $q_e < 0$, la force agit dans le sens opposé de \vec{E} (direction horizontale et sens vers la gauche sur la figure)

■ As-tu-compris ?

- Donner un exemple où en un point de l'espace, un champ électrique de 4 N/C et un champ électrique de 3 N/C donnent un champ résultant de 1 N/C, respectivement de 5 N/C.

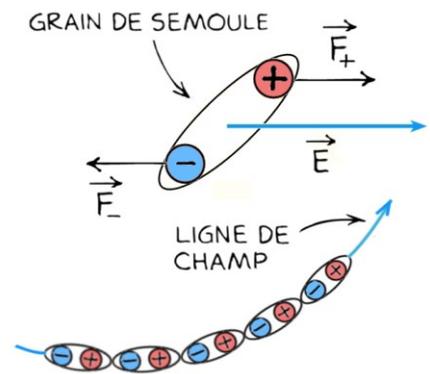
3.5 Lignes de champ et spectres électriques

Une **ligne de champ électrique** est une courbe dans l'espace à laquelle le vecteur champ électrique est tangent en tout point. La tangente en un point de la ligne de champ électrique indique également la direction de la force électrique en ce point.

- Les lignes de champ électrique ne peuvent jamais se toucher, ni se croiser, ni se subdiviser.
- Elles aboutissent perpendiculairement à la surface d'une charge source négative, et émergent perpendiculairement de la surface d'une charge source positive.
- La densité des lignes de champ électrique est proportionnelle à l'intensité du champ électrique.

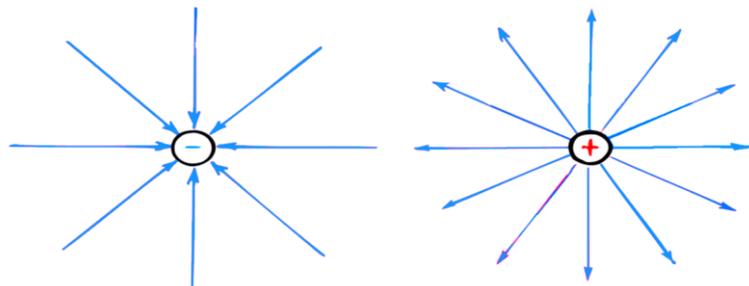
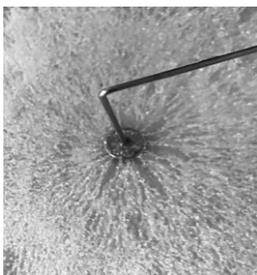
L'ensemble des lignes de champ qui représentent un champ électrique est appelé **spectre électrique**.

On peut visualiser le spectre électrique d'une configuration de charges électriques à l'aide d'une suspension de grains de semoule dans un liquide isolant, p.ex. de l'huile. Les grains de semoule sont polarisés lorsqu'ils sont placés dans le champ électrique intense et constituent dès lors des dipôles électriques induits. Chaque grain de semoule subit des forces électriques à ses extrémités qui ont même direction que celle du champ. Les grains de semoule s'alignent et s'orientent ainsi dans la direction du champ électrique. Il en résulte des chaînes de grains de semoule qui matérialisent les lignes de champ.



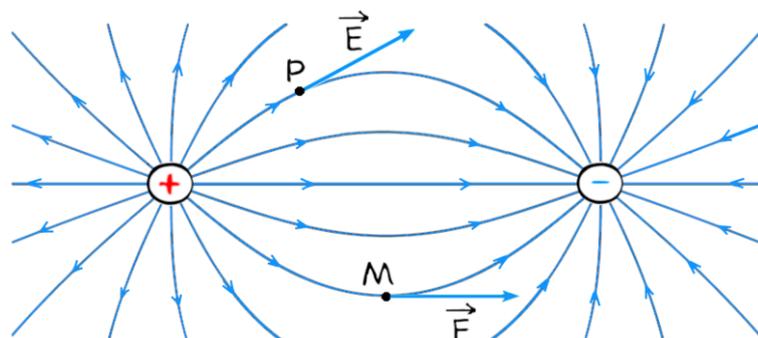
3.5.1 Charge ponctuelle isolée

Le champ électrique d'une charge ponctuelle isolée est **radial**. Il est *centripète* (recherchant le centre) pour une source ponctuelle négative et *centrifuge* (fuyant le centre) pour une source ponctuelle positive.



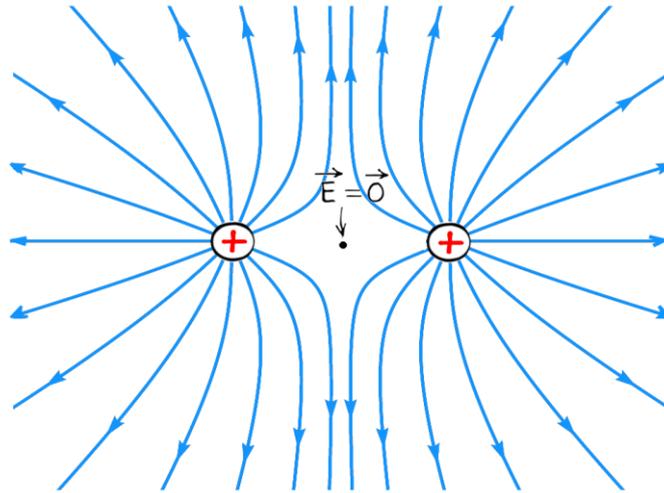
3.5.2 Deux charges ponctuelles de signe opposé, mais égales en valeur absolue

Les lignes de champ électrique émergent de la charge positive et aboutissent sur la charge négative. La direction du vecteur champ électrique en un point (p.ex. P ou M) est celle de la tangente à la ligne de champ en ce point.



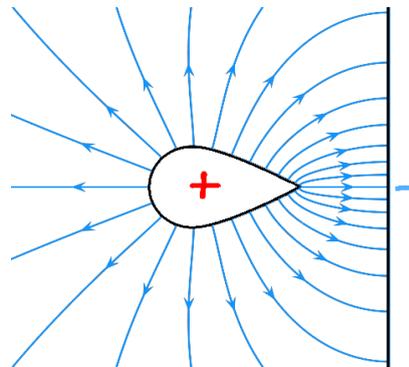
3.5.3 Deux charges ponctuelles de même signe et égales en valeur

Les champs électriques de deux charges ponctuelles de même signe et égales en valeur sont répulsifs entre les charges. Le champ électrique résultant est nul au milieu entre les deux charges.



3.5.4 Champ électrique autour d'une pointe

Au voisinage d'une pointe le champ électrique est particulièrement intense. C'est l'**effet de pointe**. Le champ électrique peut devenir tellement intense que l'air devient conducteur et qu'une décharge électrique éclate dans l'entourage de la pointe. Une application de l'effet de pointe est le paratonnerre.



La décharge d'une pointe peut aussi être partielle et continue, sans qu'elle produise un arc électrique. La pointe est alors entourée d'une lueur bleuâtre qu'on appelle feu de Saint-Elme en langage populaire.



Feu de Saint-Elme et aigrettes lumineuses apparaissant aux extrémités des mâts d'un navire lors d'un orage.

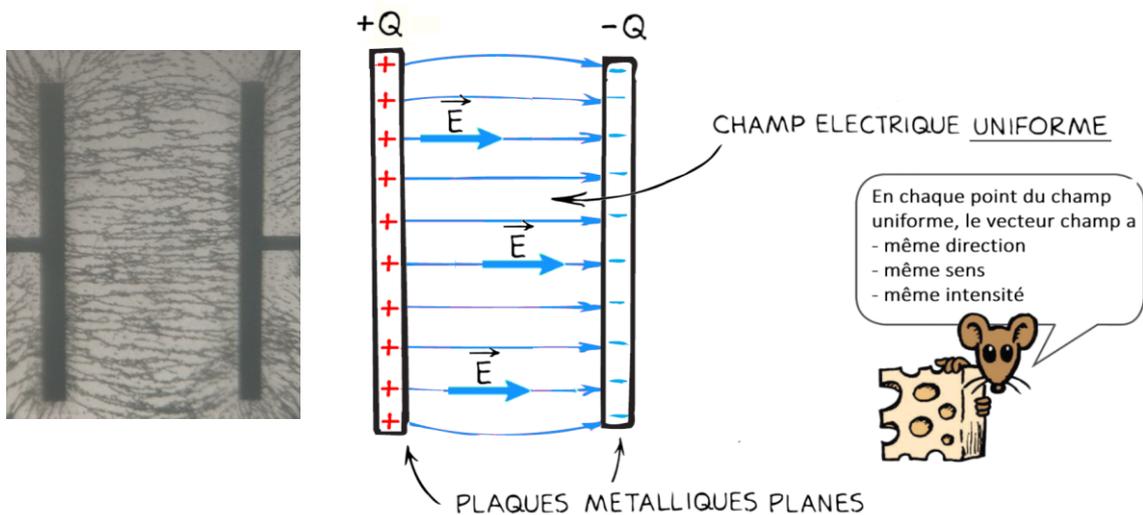
(Feu de Saint-Elme sur un bateau (G. Hartwig) dans The Aerial World, 1886.)

3.6 Champ électrique uniforme

Un champ électrique est uniforme dans une région de l'espace, si, en tout point de cette région, il a même direction, même sens et même intensité : $\vec{E} = \overrightarrow{\text{const}}$

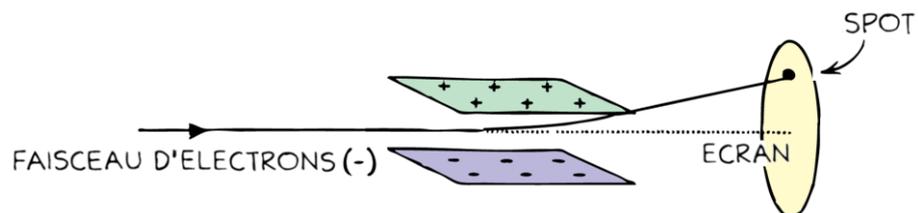
Les lignes d'un champ électrique uniforme sont des droites parallèles et équidistantes.

Le champ électrique entre deux plaques métalliques planes et parallèles, portant des charges opposées mais de même valeur absolue, est, à l'exception des régions de bords, uniforme. Le système ainsi réalisé forme un **condensateur plan**. L'effet de bord négligé, le vecteur champ électrique à l'intérieur d'un condensateur plan est constant, perpendiculaire aux plaques et dirigé de la plaque positive vers la plaque négative.



Exemple

Un faisceau d'électrons passe à travers le champ électrique uniforme qui règne entre deux plaques conductrices de charges opposées. Les électrons sont déviés vers le haut par la force électrique et frappent un écran translucide. Lorsque les charges de plaques sont inversées le champ électrique pointe vers le haut et les électrons sont déviés vers le bas de l'écran.

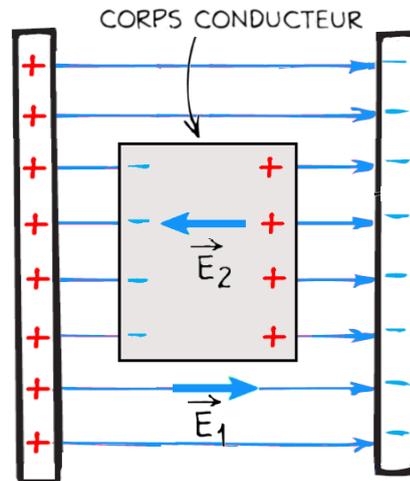


■ As-tu-compris ?

7. Comment les lignes de champ électrique indiquent-elles l'intensité du champ électrique ?
8. Comment les lignes de champ électrique indiquent-elles la direction du champ électrique ?

3.7 Écrantage d'un champ électrique ; cage de Faraday

L'écrantage d'un champ de gravitation est impossible, parce que la force de gravitation est toujours attractive. L'écrantage d'un champ électrostatique est en revanche simple : il suffit d'envelopper le corps à blinder d'une surface conductrice. Considérons un corps conducteur qui est placé dans un champ électrique uniforme d'un condensateur plan chargé :



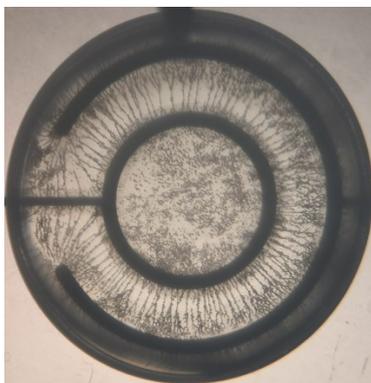
Dû au phénomène d'influence électrique, il se crée un excès d'électrons au côté gauche du corps conducteur et un défaut d'électrons à son côté droit.

Le champ électrique \vec{E}_2 , qui est créé entre les côtés chargés du corps, se superpose au champ électrique \vec{E}_1 , qui est créé par les plaques seules. Les champs \vec{E}_1 et \vec{E}_2 sont de même direction, mais de sens opposé. Puisque l'accumulation des charges influencées s'arrête tôt ou tard, les champs doivent tôt ou tard avoir même intensité et s'annuler mutuellement à l'intérieur du corps conducteur.

Les charges influencées sur les surfaces du corps conducteur isolent l'intérieur du corps conducteur contre le champ électrique extérieur (effet d'écrantage). C'est le **principe de la cage de Faraday** :

Aucun champ électrique n'existe à l'intérieur d'un corps conducteur lorsqu'il est placé dans un champ électrique extérieur.

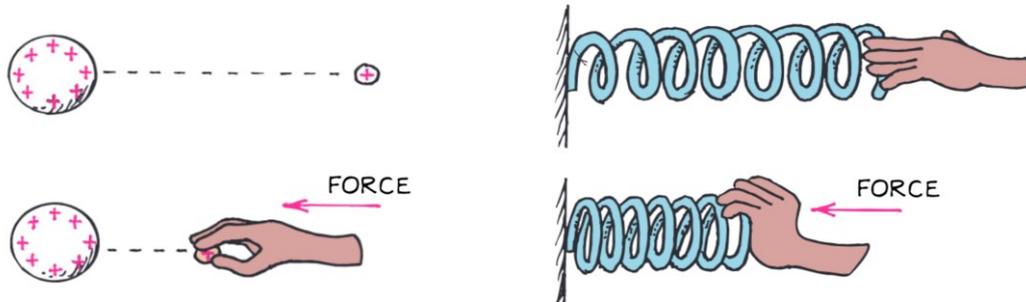
En pratique, la cage de Faraday consiste en une enveloppe conductrice (p.ex. un grillage métallique) qui rend l'intérieur étanche face à tout champ électrique :



Aucun champ électrique ne règne à l'intérieur du cylindre creux et conducteur. La carrosserie d'une voiture constitue une cage de Faraday.

4 Énergie potentielle électrique

Considérons une petite charge positive (charge témoin) située à une certaine distance d'une charge source positive. Si on rapproche la charge témoin de la charge source, on doit fournir du travail pour vaincre la répulsion électrique. Ce travail augmente l'énergie potentielle du système des deux charges.

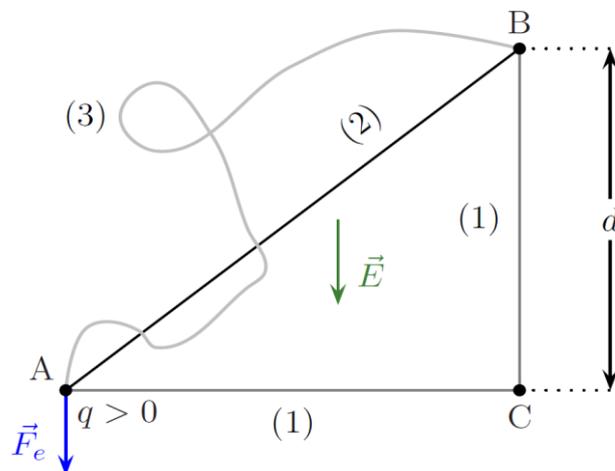


Du travail est effectué pour vaincre la répulsion électrique, respectivement la tension élastique.

4.1 Définition

L'énergie potentielle électrique E_p d'un système composé d'une charge source et d'une charge témoin est l'énergie qu'il possède du fait de la position de la charge témoin dans le champ électrique de la charge source. Elle est exprimée en joules (J).

Considérons une charge électrique q positive qui se déplace dans un champ électrique **uniforme** d'un point A vers un point B le long d'un chemin curviligne (3) :



Le travail de la force électrique ne dépend pas du chemin choisi

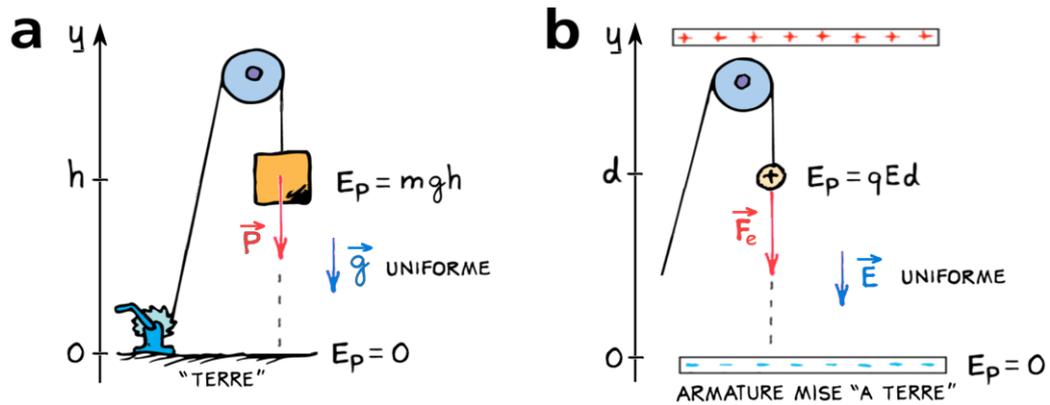
Puisque le travail de la force électrique entre les deux points A et B est indépendant du chemin suivi, on a :

$$\Delta E_p = -W_{AB}(\vec{F}_e) = -\vec{F}_e \cdot \vec{AB} = -q \vec{E} \cdot (\vec{AC} + \vec{CB}) = -q \vec{E} \cdot \vec{CB} = q E d$$

où d désigne la distance – mesurée dans la direction du champ – entre les points A et B .

En convenant que l'énergie potentielle électrique est nulle au point de départ (point de référence) :

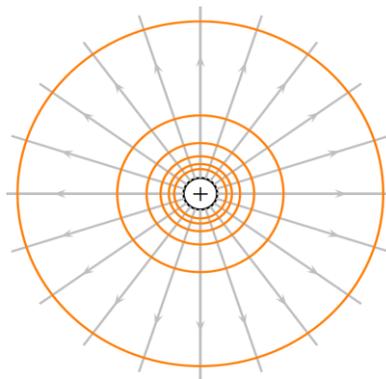
$$E_p = q E d$$



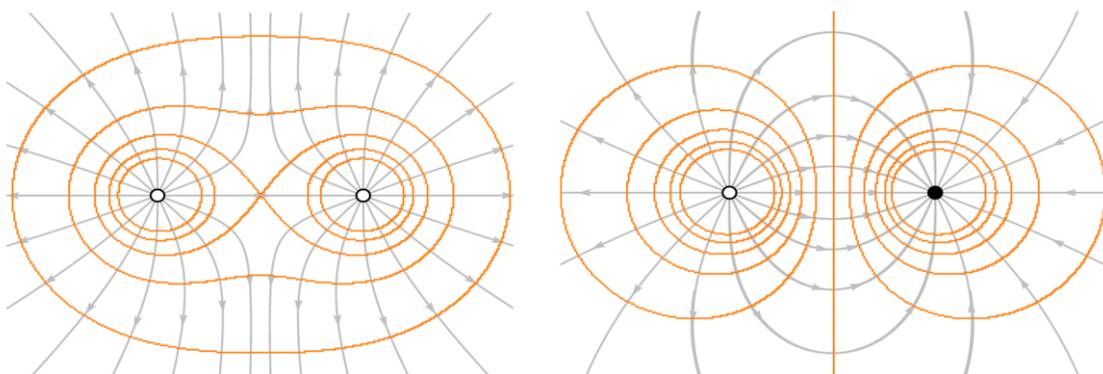
Analogie entre énergies potentielles de pesanteur (a) et électrique (b)

4.2 Surfaces et lignes équipotentielles

Lorsqu'on déplace une charge perpendiculairement aux lignes de champ, la force électrique n'effectue aucun travail puisque la force est perpendiculaire au déplacement. L'énergie potentielle électrique de la charge ne change pas. Les surfaces et lignes équipotentielles du champ électrique sont donc dirigées perpendiculairement aux lignes de champ.



Champ radial : Les lignes et surfaces équipotentielles (en orange) sont respectivement des cercles et des sphères concentriques centrés sur la charge source ponctuelle.



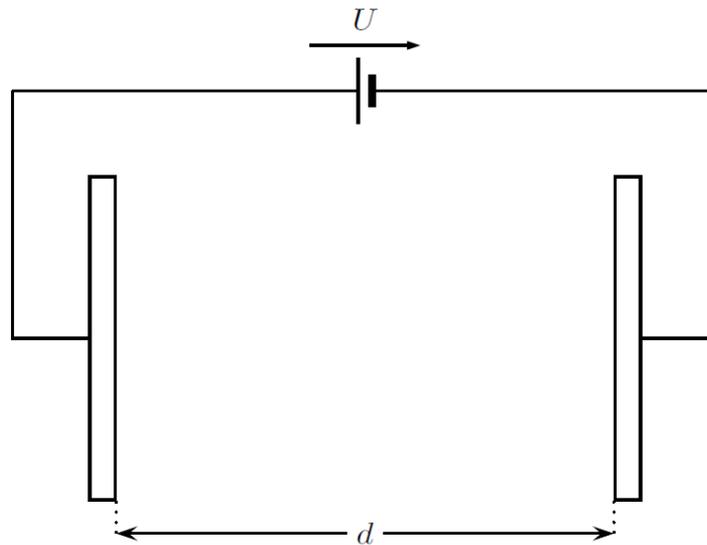
Lignes de champ et lignes équipotentielles pour deux charges identiques (à gauche), respectivement deux charges égales en valeur, mais de signe opposé (à droite)

Puisqu'aucun champ électrique ne peut exister à l'intérieur d'un conducteur hors circuit, l'énergie potentielle d'une charge y est la même en tout point. L'espace occupé par un conducteur est ainsi une région équipotentielle. De même :

La surface d'un conducteur constitue une surface équipotentielle

■ **As-tu-compris ?**

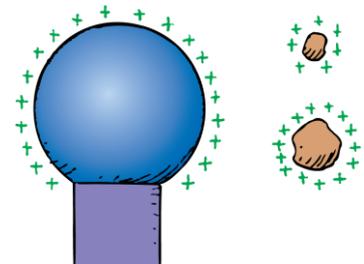
9. Rajouter quelques lignes de champ et quelques lignes équipotentielle pour le champ électrique uniforme du condensateur plan. Préciser également la polarité des armatures.



4.3 Potentiel électrique et différence de potentiel

En un endroit donné dans le champ électrique, l'énergie potentielle électrique d'une charge est proportionnelle à la quantité de charge.

Le rapport $\frac{E_p}{q}$ est donc constant. La constante de proportionnalité, notée V , est appelée **potentiel électrique**.



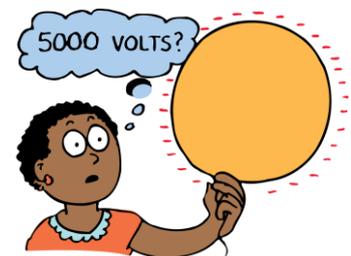
Le **potentiel électrique** V_A en un point A d'un champ électrique indique l'énergie potentielle électrique en ce point, par unité de charge :

$$V_A = \frac{E_p}{q}$$

Unité SI : $[V_A] = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} = 1 \text{ volt} = 1 \text{ V}$

Le potentiel $V_A = 0 \text{ V}$ peut être fixé arbitrairement. Souvent il est attribué à la Terre.

Un ballon frotté peut être chargé à un potentiel électrique très élevé, pouvant atteindre plusieurs milliers de volts. Un potentiel élevé signifie beaucoup d'énergie par unité de charge. Or, la charge électrique d'un ballon frotté est en général inférieure à un microcoulomb ($\mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$). Par conséquent, la quantité d'énergie associée au ballon chargé est très petite.



À l'aide du potentiel électrique, l'énergie potentielle électrique d'une charge q en un point A s'écrit :

$$E_p(A) = q V_A$$

L'ensemble des points d'une surface qui ont même potentiel forment une **surface équipotentielle**.

L'ensemble des points d'une ligne qui ont même potentiel forment une **ligne équipotentielle**.

Lorsqu'une charge positive est lâchée sans vitesse initiale dans un champ électrique, elle est accélérée dans la direction et le sens du champ électrique. Son énergie cinétique augmente et son énergie potentielle diminue. On en déduit :

Le champ électrique est toujours dirigé dans le sens des potentiels décroissants.

Le travail qui est exercé par la force électrique entre deux points A et B est égal à l'opposé de la variation de l'énergie potentielle électrique entre ces points :

$$W_{AB}(\vec{F}_e) = -\Delta E_p = -(E_p(B) - E_p(A)) = E_p(A) - E_p(B)$$

En divisant par la charge q sur laquelle s'exerce la force électrique, il vient :

$$\frac{W_{AB}(\vec{F}_e)}{q} = \frac{E_p(A)}{q} - \frac{E_p(B)}{q} = V_A - V_B = U_{AB}$$

La grandeur U_{AB} est indépendante de la charge considérée. On l'appelle **tension électrique** entre A et B ou encore **différence de potentiel électrique** entre A et B .

La tension électrique entre deux points A et B (symbole : U_{AB}) est égale à la différence des potentiels électriques entre A et B :

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

En d'autres mots, la tension électrique entre deux points est numériquement égale à la différence d'énergie potentielle électrique entre ces points, par unité de charge.

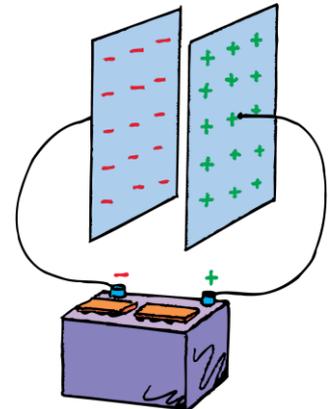
Dans le cas d'un **condensateur plan** dont les armatures sont séparées d'une distance d on trouve :

$$U = |V_A - V_B| = \frac{|\Delta E_p|}{q} = \frac{qEd}{q} = Ed$$

L'intensité du champ électrique créé par un condensateur plan s'écrit :

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

On peut donc calculer l'intensité du champ électrique uniforme entre les armatures d'un condensateur en mesurant la tension électrique U entre les plaques et la distance d entre les deux plaques.



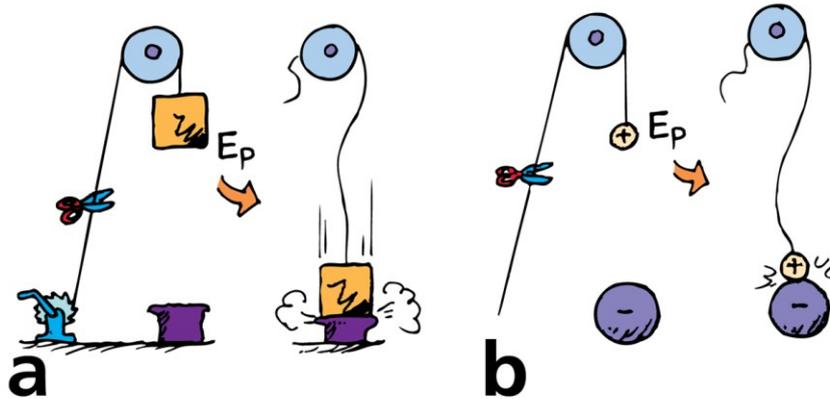
On en déduit une autre unité pour l'intensité de champ électrique : $[E] = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ m}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$

■ As-tu-compris ?

10. Une charge de 2 mC est déplacée d'un point de potentiel 1 V vers un point de potentiel 5 V. De combien varie son énergie potentielle électrique ?
11. Une charge négative, qui est lâchée dans un champ électrique, est-elle accélérée dans le sens des potentiels croissants ou décroissants ?

4.4 L'électronvolt

Une charge électrique qui est lâchée dans un champ électrique quelconque est accélérée et de l'énergie potentielle électrique est transformée en énergie cinétique.



Analogie de la transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique dans le champ de pesanteur (a) et le champ électrique (b).

D'après le TEC :

$$\Delta E_c = W_{AB}(\vec{F}_e) = q U_{AB}$$

Exemple

Un proton est accéléré depuis le repos par une tension électrique de 1V. Son énergie cinétique vaut alors

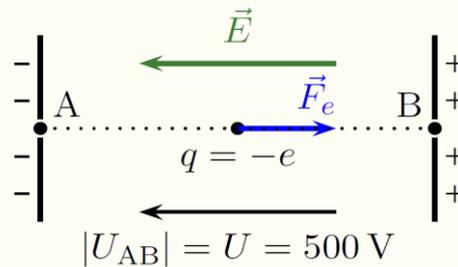
$$\begin{aligned} E_c &= |q| U \\ &= 1e \cdot 1V \\ &= \mathbf{1 \text{ eV}} \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} \\ &= \mathbf{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \end{aligned}$$

1 électronvolt = 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J est l'énergie cinétique d'un proton (ou d'un électron) accéléré depuis le repos par une tension de 1V.

L'électronvolt est une unité d'énergie très petite qui est utilisée dans le domaine des particules élémentaires. On utilise souvent le keV = 10^3 eV, le MeV = 10^6 eV et le GeV = 10^9 eV.

Exercice résolu

Énoncé : Un électron ($q_e = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$) entre avec une vitesse négligeable au point A de l'armature négative d'un condensateur plan. Il est accéléré sous une tension de 500 V qui règne entre les armatures, puis sort par le point B de l'armature positive.



- Calculer l'énergie cinétique (en eV et en J) de l'électron lorsqu'il sort en B.
- Calculer la valeur de la vitesse de l'électron lorsqu'il sort en B.

Solution : a. TEC :

$$\begin{aligned}\Delta E_c &= W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) \\ E_c(B) - \underbrace{E_c(A)}_0 &= |q_e| \cdot U \\ E_c(B) &= e \cdot U\end{aligned}$$

A.N. :

$$\begin{aligned}E_c(B) &= e \cdot 500 \text{ V} \\ &= 500 \text{ eV} \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 500 \text{ V} \\ &= 8,0 \cdot 10^{-17} \text{ J}\end{aligned}$$

- b. Expression de l'énergie cinétique :

$$E_c(B) = \frac{1}{2} m_e v_B^2$$

Isolons la vitesse v_B :

$$v_B = \sqrt{\frac{2 E_c(B)}{m_e}}$$

A.N. : Il faut faire attention à calculer avec la valeur de l'énergie cinétique en J !

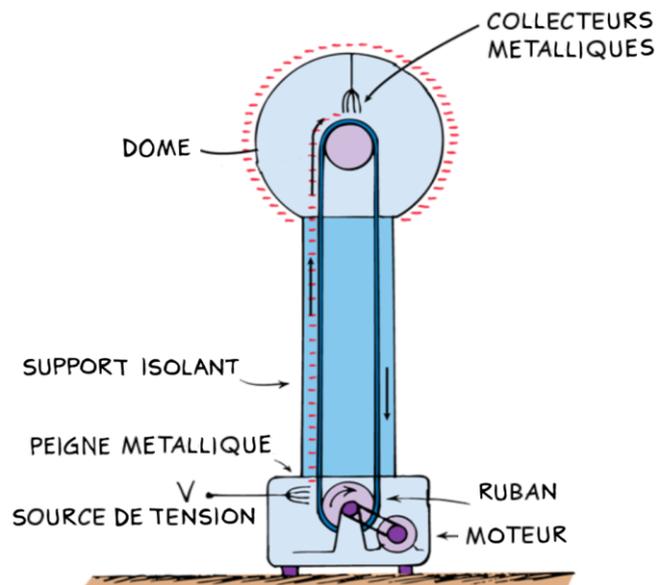
$$\begin{aligned}v_B &= \sqrt{\frac{2 \cdot 8,0 \cdot 10^{-17}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \\ &= 1,3 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}\end{aligned}$$

La valeur de la vitesse des électrons en B est égale à 4,4 % de la vitesse de la lumière ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

5 Pour en savoir plus

Générateur Van de Graaff

Un dispositif pour créer de hauts voltages est le générateur Van de Graaff. Dans ce dispositif, un ruban en plastique déplace des électrons depuis la source de tension vers une large sphère conductrice (le dôme) qui est fixée sur un support isolant. Le ruban passe à côté d'un peigne métallique qui est maintenu à un potentiel électrique élevé. Un flux continu d'électrons est déposé sur le ruban par décharge électrique aux pointes du peigne. Les électrons sont transportés par le ruban vers la sphère métallique. Les électrons fuient alors sur des collecteurs métalliques attachés à la surface intérieure du dôme. À cause de leur répulsion mutuelle, les électrons se déplacent vers la surface extérieure du dôme. Sa surface intérieure est donc capable de recevoir plus d'électrons. Le champ électrique à l'intérieur du dôme est toujours nul, de sorte que les électrons suivants transportés par le ruban ne sont pas repoussés par la charge électrique qui se trouve à la surface extérieure du dôme. La charge du dôme augmente jusqu'à un potentiel électrique très élevé qui peut atteindre des millions de volts.



Stockage d'énergie électrique

Le champ électrique d'un condensateur peut stocker de l'énergie électrique :

- Les mémoires informatiques utilisent de très minuscules condensateurs pour stocker les 1 et les 0 du code binaire.
- Les condensateurs des appareils de photo stockent de plus grandes quantités d'énergie et la libèrent rapidement lors du flash.
- D'énormes quantités d'énergie sont stockées dans des condensateurs qui alimentent des lasers géants dans des laboratoires.
- Un condensateur stocke l'énergie dans un défibrillateur qui permet d'appliquer de courtes rafales d'énergie à une victime d'une crise cardiaque.

L'énergie stockée dans un condensateur correspond au travail fourni par le générateur lors de sa charge. La charge d'un condensateur est terminée lorsque la tension entre ses plaques est égale à la tension entre les bornes du générateur auquel elles sont connectées. Plus la tension du générateur est élevée et plus les plaques sont grandes et proches, plus la charge électrique sur les plaques est importante.



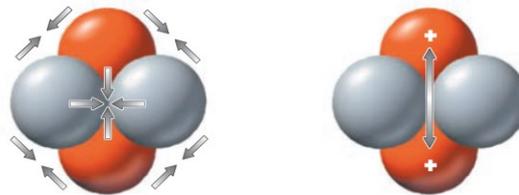
En pratique, les plaques peuvent être de fines feuilles métalliques séparées par une fine feuille de papier. Ce "sandwich de papier" est ensuite enroulé pour gagner de la place et peut être inséré dans un cylindre.

Interaction forte et interaction faible

Il y a quatre interactions fondamentales qui gouvernent notre Univers. L'interaction gravitationnelle et l'interaction électromagnétique en sont deux. Les deux autres sont l'interaction forte et l'interaction faible dont nous allons donner un bref aperçu ci-dessous.

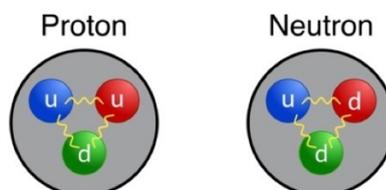
a. Interaction forte

Le noyau atomique est formé de protons, chargés positivement, et de neutrons, électriquement neutres. Les protons se repoussent mutuellement, à cause de la force électrique répulsive qui s'exerce sur deux charges de même signe.



Bien que soumis à des forces électriques répulsives intenses, les protons ne s'écartent pas l'un de l'autre. La force de gravitation, toujours attractive, est beaucoup trop faible pour les tenir en place. Il doit donc exister un autre type de force, qui est encore beaucoup plus forte que la force électrique : l'interaction forte. L'interaction forte ne décrit non seulement la liaison entre nucléons³, mais aussi des liaisons à l'intérieur des nucléons. En effet, un nucléon présente une structure interne : il est constitué de trois particules, appelées quarks, qui sont liées entre elles par interaction forte. Des expériences ont montré qu'il existe encore nombre de particules, en plus des nucléons, qui sont constituées de deux ou trois quarks. On appelle ces particules de façon générique hadrons.

QUARKS

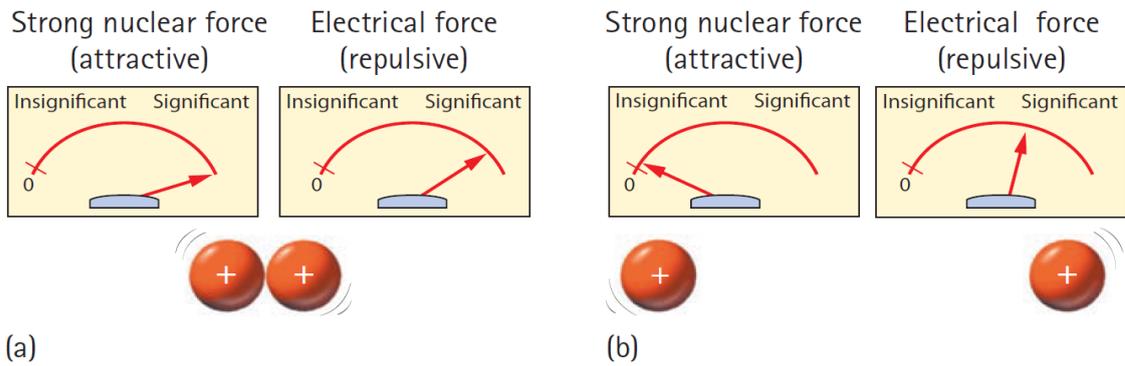


*Un proton est formé de deux up-quarks et d'un down-quark
Un neutron est formé de deux down-quarks et d'un up-quark*

L'interaction forte est la plus forte des interactions fondamentales. Elle est 100 fois plus intense que l'interaction électromagnétique. Sa portée est limitée approximativement au diamètre d'un nucléon

³ Protons et neutrons sont désignés de façon générique par le terme nucléon.

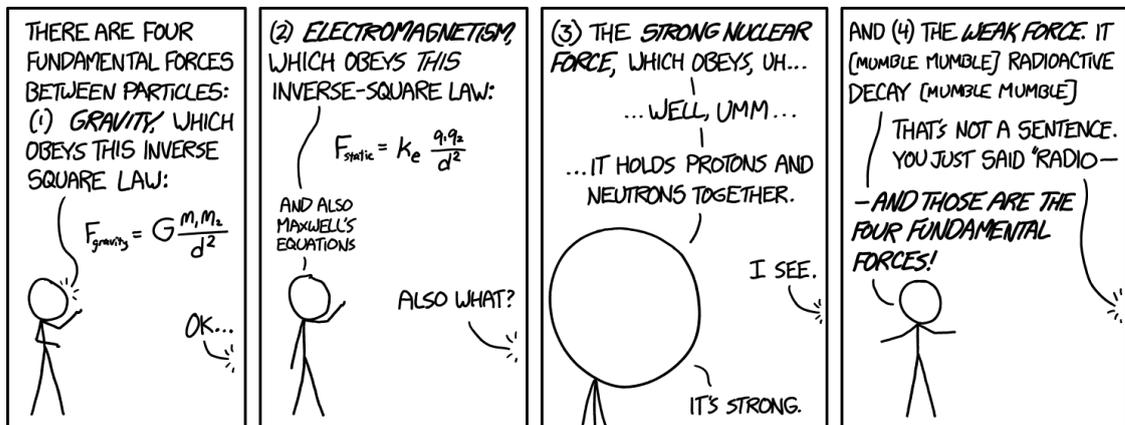
($< 2 \cdot 10^{-15}$ m). L'interaction forte assure, à l'intérieur des hadrons, la liaison entre quarks et, à l'intérieur du noyau atomique, la liaison entre nucléons.



b. Interaction faible

L'interaction faible est beaucoup plus faible que l'interaction électromagnétique. Sa portée est très limitée ($< 10^{-18}$ m). L'interaction faible est la seule interaction qui peut changer la saveur d'un quark. Elle peut par exemple changer un d -quark en un u -quark et ainsi transformer un neutron en un proton, et vice-versa. Ainsi, elle est à la base de :

- la radioactivité bêta, un des trois types de la radioactivité, ou un neutron d'un noyau atomique instable est transformée en un proton (ou vice-versa) avec émission d'un rayonnement ;
- la désintégration du neutron libre en un proton ;
- la fusion d'atomes d'hydrogène en atomes d'hélium, qui constitue la source d'énergie principale de la plupart des étoiles, et en particulier du Soleil, et qui serait impossible sans la transformation de protons en neutrons.



Interactions fondamentales par Alex R. Howe sous licence CC BY-NC 2.5

6 Exercices

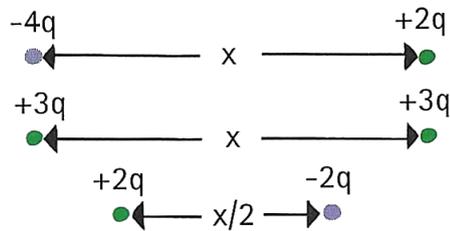
Force électrique et influence

1. Une différence entre la loi de la gravitation universelle de Newton et la loi de Coulomb est que seulement l'une des deux lois
 - A. est une loi fondamentale de la nature.
 - B. contient une constante de proportionnalité.
 - C. inclut la loi en carré inverse.
 - D. décrit des forces répulsives et des forces attractives.
2. Que signifie le fait que la constante K dans la loi de la gravitation universelle de Newton soit un nombre très petit et la constante k dans la loi de Coulomb soit un nombre très grand (lorsque les deux constantes sont exprimées en unités SI) ?
3. Un électron qui se trouve à une certaine distance d'une charge électrique est attiré par une certaine force électrique. Que devient la force d'interaction lorsque
 - a. l'électron se trouve deux fois plus loin de la charge électrique ?
 - b. la distance entre l'électron et la charge électrique triple ?
 - c. l'électron se trouve à moitié de la distance initiale de la charge ?
 - d. la distance entre l'électron et la charge ne vaut qu'un tiers de la distance initiale ?
 - e. la distance entre l'électron et la charge ne vaut qu'un quart de la distance initiale ?
4. Deux charges électriques $q_A = q_B = q > 0$ se trouvent respectivement aux points A et B, distants de r . Répondre par vrai ou faux.

	Affirmation	Vrai	Faux
1	Les intensités des forces électriques exercées par A sur B et par B sur A sont identiques		
2	L'intensité du champ électrique créé par A au milieu du segment $[AB]$ vaut le double de celle de A au point B.		
3	Les vecteurs champs électriques créés par A et B sont égaux au milieu du segment $[AB]$.		
4	Le champ électrique au milieu du segment $[AB]$ est nul.		
5	La force électrique subie par une charge se situant au milieu du segment $[AB]$ est nulle quelle que soit la valeur de la charge.		

5. Il est relativement facile d'arracher des électrons de la couche extérieure d'atomes lourds comme l'uranium (qui devient alors un ion d'uranium), mais il est très difficile d'arracher des électrons des couches intérieures. Pourquoi ?
6. Deux ballons d'hélium sphériques dont les centres sont distants de 1 m se repoussent avec une force électrique de 1N. En sachant que les deux ballons portent des charges électriques négatives identiques, déterminer la valeur de cette charge et le nombre d'électrons en excès sur chacun des ballons.

7. Supposons que l'on puisse donner une charge totale à la Terre et la même charge à la Lune. Pour quelle valeur de la charge la répulsion électrostatique entre la Terre et la Lune serait-elle égale à leur attraction gravitationnelle ? ($m_T = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$; $m_L = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$; $d = 380000 \text{ km}$)
8. Considérer les trois paires de charges électriques ponctuelles (on suppose que les deux charges d'une paire n'interagissent qu'entre elles). Ranger, par ordre décroissant, l'intensité de la force électrique entre les charges.



9. Deux protons sont respectivement en deux points A et B distants de r et se repoussent avec une force électrostatique F_e . Indiquer l'affirmation qui est correcte :
- a. Il existe aussi une force d'attraction gravitationnelle F_g entre les 2 protons. On a :
- A. $F_g \ll F_e$
 - B. $F_g < F_e$
 - C. $F_g = F_e$
 - D. $F_g > F_e$
 - E. $F_g \gg F_e$
- b. Lorsque les deux protons sont remplacés par 2 électrons, alors pour la nouvelle force électrique F'_e on a :
- A. $F'_e \ll F_e$
 - B. $F'_e < F_e$
 - C. $F'_e = F_e$
 - D. $F'_e > F_e$
 - E. $F'_e \gg F_e$
- c. Lorsque que la distance entre les deux protons est réduite à $r - x$ ($x > 0$), alors l'intensité de la nouvelle force répulsive vaut :
- A. $F'_e = F_e \cdot \left(1 + \frac{x}{r-x}\right)^2$
 - B. $F'_e = F_e \cdot \left(1 - \frac{x}{r+x}\right)^2$
 - C. $F'_e = F_e \cdot \left(1 + \frac{r-x}{x}\right)^2$
 - D. $F'_e = F_e \cdot \left(\frac{x}{r-x}\right)^2$
 - E. $F'_e = F_e \cdot \left(\frac{r-x}{x}\right)^2$

10. Trois charges ponctuelles sont situées sur une droite de la manière suivante :

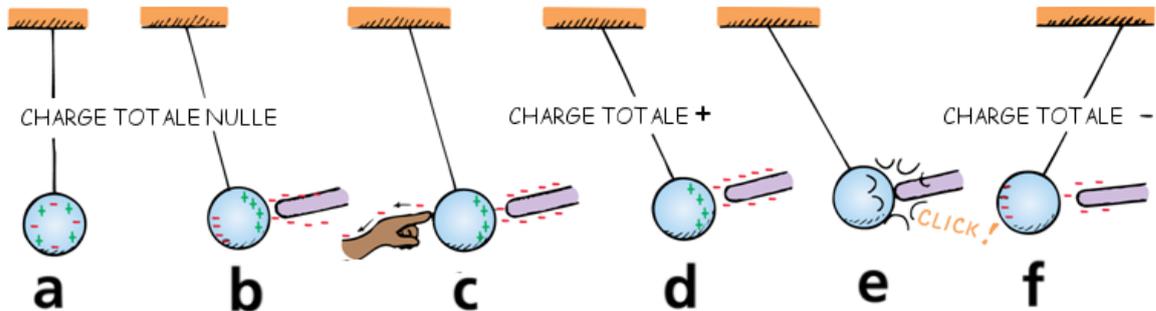


Déterminer l'intensité et le sens de la force électrique exercée par ...

- a. q_1 sur q_3
 - b. q_2 sur q_3
 - c. q_1 et q_3 sur q_2 (force résultante).
11. Deux boules identiques, de charge Q et de masse 2 g, sont suspendues à des fils de longueur 1 m. À cause de la répulsion électrique des deux boules, les fils font un angle de 15° par rapport à la verticale. Déterminer la charge Q .
12. Est-il nécessaire de toucher la boule métallique d'un électroscope avec un objet chargé pour que la tige en papier alu se redresse ? Expliquer.



13. Expliquer les étapes de l'expérience illustrée sur les figures a-f.

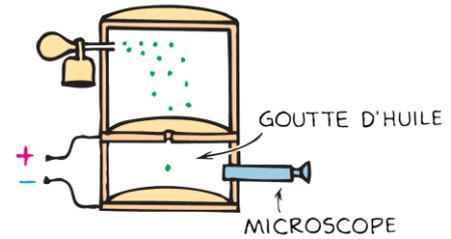


Champ et potentiel électriques

14. Pourquoi le champ électrique est-il une grandeur vectorielle ?
15. Un champ électrique \vec{E} ne permet pas de
- A. Mettre un proton en mouvement
 - B. Dévier un électron en mouvement
 - C. Accélérer un neutron
 - D. Augmenter l'énergie cinétique d'un proton
 - E. Freiner une particule chargée
16. Une charge ponctuelle Q crée un champ électrique de 40 N/C à 30 cm de la charge. Quelle serait l'intensité du champ électrique à une distance de
- a. 30 cm d'une charge source de $2Q$?
 - b. 60 cm d'une charge source de $2Q$?
 - c. 1,5 m d'une charge source de $0,5Q$?

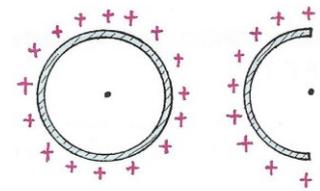
17. Suppose que le champ électrique à une distance de 1 m d'une charge ponctuelle a une certaine intensité. Le champ électrique à une distance de 2 m de la même charge est alors
- identique
 - deux fois plus grande
 - deux fois petite
 - quatre fois plus grande.
 - quatre fois plus petite.
18. Des mesures montrent qu'il y a un champ électrique qui entoure la Terre. Son intensité vaut environ 100 N/C à la surface de la Terre et il pointe vers la Terre. Est-ce que la Terre est chargée positivement ou négativement ?
19. Les charges $Q_1 = -25 \mu\text{C}$ et $Q_2 = +50 \mu\text{C}$ sont distantes de 10 cm.
- Calculer l'intensité du champ électrique au point P situé entre les deux charges, à 2 cm de Q_1 .
 - Calculer l'accélération d'un électron situé en P. Indiquer sur une figure le sens du champ électrique et le sens du vecteur accélération.
20. Comparer les normes des forces électriques qui agissent sur un électron libre et un proton libre lorsqu'ils sont placés au même endroit dans un champ électrique. Comparer également leurs accélérations et leurs sens de déplacement.
21. Une charge ponctuelle positive est placée (au repos) dans un champ électrique uniforme. Donner l'équation horaire de la vitesse de la charge, en fonction de sa masse et de sa charge.
22. Pourquoi le champ électrique est-il nul au milieu de deux charges ponctuelles identiques ?
23. Un dipôle électrique est un ensemble formé de deux charges électriques ponctuelles $q_A = q$ et $q_B = -q$, égales en valeur absolue et de signes opposés, situées en deux points A et B qui sont séparés d'une faible distance $AB = 2a$. Déterminer le champ électrique :
- au milieu O du dipôle AB
 - en un point M situé tel que $MA = MB = 2a$
24. Imaginer un proton au repos à une certaine distance d'une plaque chargée négativement. Le proton accélère et entre en collision avec la plaque. Imagine maintenant un électron au repos à la même distance d'une plaque qui porte la même charge électrique, mais positive. Dans quel cas la particule va avoir la plus grande vitesse d'impact sur la plaque ? Justifier.
25. Une charge ponctuelle $Q = -5 \mu\text{C}$ est située à l'origine d'un repère cartésien. Déterminer l'intensité et la direction (angle par rapport à l'horizontale) du champ électrique aux points de coordonnées (8m, -2m) et (-2m, 5m).
26. On considère un triangle isocèle KLM ($KL = KM = 6 \text{ cm}$), dont l'angle \hat{K} est égal à 50° . En chacun des points L et M on place une charge de 1 nC. Déterminer le champ électrique résultant en K sur base d'une figure soignée.
27. Deux charges $q = 10 \text{ mC}$ sont situées en deux sommets opposés d'un carré de côté $a = 5 \text{ cm}$. Le troisième sommet porte la charge $-q$. Déterminer le champ électrique créé par ces trois charges au quatrième sommet du carré sur base d'une figure soignée.
28. En 1909, Robert Millikan fut le premier à déterminer la charge d'un électron à l'aide d'une fameuse expérience. De petites gouttes d'huile sont chargées négativement par frottement lors de leur injection dans un champ électrique uniforme qui règne entre deux plaques horizontales de charges

opposés. Les gouttelettes sont observées avec un microscope et l'intensité du champ électrique est réglée de manière qu'une goutte d'huile reste suspendue. Dans ce cas, le poids de la goutte est exactement compensé par la force électrique. Millikan a mesuré la charge d'un très grand nombre de gouttes et a trouvé que les valeurs étaient des multiples entiers de $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, soit la charge d'un électron (en valeur absolue). Cette découverte lui a valu le prix Nobel.

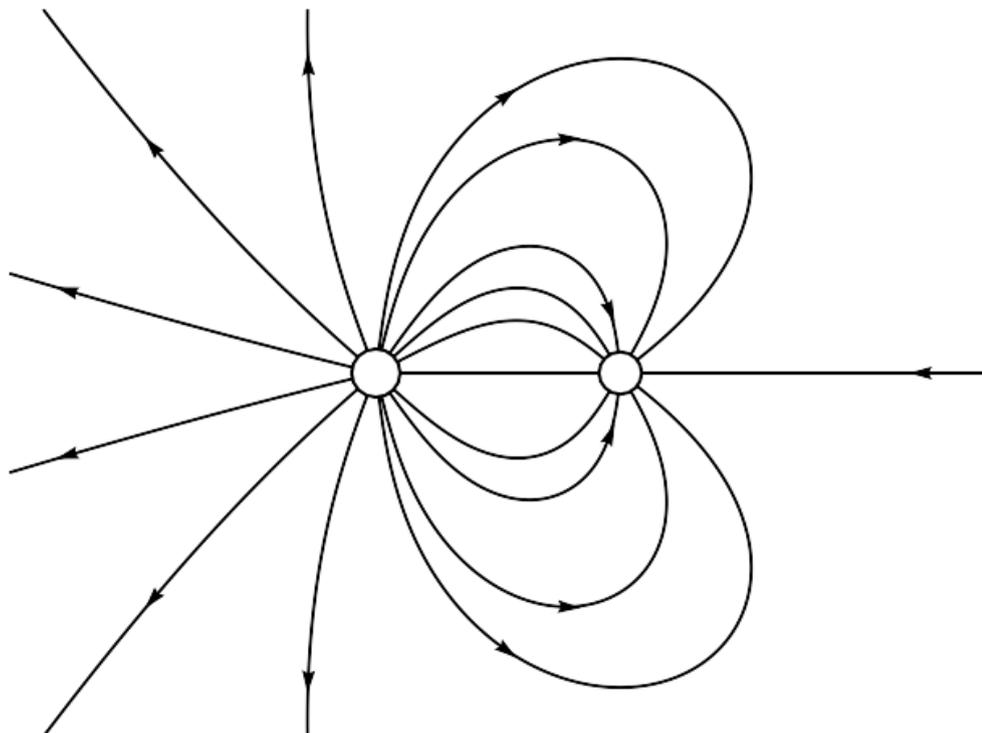


- a. Si une goutte de masse $1,1 \cdot 10^{-14} \text{ kg}$ reste suspendue en équilibre dans un champ électrique d'intensité $1,68 \cdot 10^5 \text{ N/C}$, quelle est la charge de la goutte ?
- b. Quel excès d'électrons se trouve sur cette goutte d'huile ?

29. Deux pièces métalliques, un anneau et un demi-anneau, ont le même rayon et la même densité de charge électrique. Dans quel cas le champ électrique au centre est-il le plus intense. Justifie.

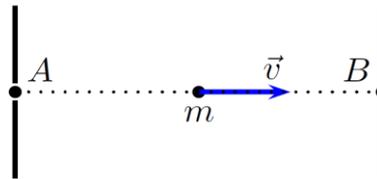


30. Qu'est-ce qui arrive au champ électrique à l'intérieur la sphère conductrice lorsqu'elle est chargée ?
- A. L'intensité du champ électrique augmente au fur et à mesure que la charge de la sphère augmente.
 - B. L'intensité du champ électrique diminue au fur et à mesure que la charge de la sphère augmente.
 - C. Rien du tout, le champ électrique y est toujours nul.
 - D. Aucune de ces réponses.
31. La figure ci-dessous montre les lignes de champs électriques de deux charges ponctuelles q_1 (à gauche) et q_2 (à droite) :



- a. Expliquer ce que l'on entend par une ligne de champ électrique.
- b. Indiquer trois propriétés des lignes de champ électrique.
- c. Déterminer le signe des deux charges.
- d. En faisant des mesures appropriées, déterminer le rapport $\frac{q_1}{q_2}$ entre les deux charges.

32. Un ion Cl^+ de masse $5,902 \cdot 10^{-26}$ kg pénètre en un point A avec une vitesse négligeable dans un condensateur plan dont les plaques sont soumises à une tension de 2 kV :



- a. Indiquer la polarité des plaques, ainsi que la direction et le sens des vecteurs champ et force subis par l'ion, pour qu'il soit accéléré jusqu'au point B , sur une figure.
 - b. Calculer la vitesse de l'ion lorsqu'il sort du condensateur en B .
 - c. Calculer l'intensité du champ électrique du condensateur sachant que les plaques sont distantes de 10 cm.
33. Un proton pénètre en un point A avec une vitesse négligeable dans un condensateur plan dont les plaques sont soumises à une tension de 2 kV :
- a. Indiquer la polarité des plaques, ainsi que la direction et le sens des vecteurs champ et force subis par l'ion, pour qu'il soit accéléré jusqu'au point B , sur une figure.
 - b. Calculez l'énergie cinétique finale du proton en eV.
 - c. Calculer la vitesse du proton lorsqu'il sort du condensateur en B .
34. Des particules α sont accélérées entre les plaques du condensateur de A vers B . Les particules α pénètrent en A avec une vitesse initiale $v_A = 2 \cdot 10^5$ m/s.
- a. Déterminer la polarité des deux plaques.
 - b. Indiquer sur une figure le champ électrique entre les plaques du condensateur.
 - c. Calculer l'énergie cinétique initiale en eV.
 - d. Calculez la variation d'énergie cinétique, ainsi que l'énergie cinétique finale des particules α en eV, si la tension accélératrice vaut 1kV.
 - e. Calculer la vitesse des particules a en B.
35. Un électron pénètre en A à l'intérieur d'un condensateur avec une vitesse $v_A = 2,0 \cdot 10^7$ m/s. L'électron ensuite freiné entre les plaques du condensateur de sorte que sa vitesse en B soit nulle.
- a. Indiquer la polarité des plaques, ainsi que la direction et le sens des vecteurs champ et force subis par l'électron, pour qu'il soit freiné jusqu'au point B , sur une figure.
 - b. Calculer l'énergie cinétique initiale de l'électron en eV.
 - c. Calculer la tension de freinage nécessaire.

Révision

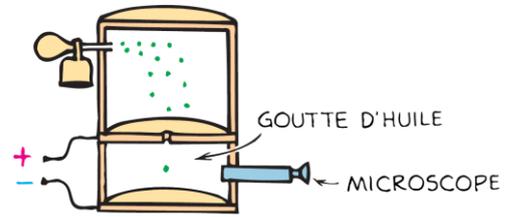
A. Répondre par vrai ou faux.

	Affirmation	Vrai	Faux
1	L'intensité de la force électrique entre deux charges ponctuelles quadruple quand la charge de chaque particule est doublée.		
2	L'intensité de la force électrique entre deux charges ponctuelles quadruple quand la distance entre les deux charges est doublée.		
3	La force électrique exercée dans l'atome d'hydrogène par le proton sur l'électron est plus grande que celle exercée par l'électron sur le proton.		
4	Un corps chargé peut, par influence, repousser un isolant neutre.		
5	Le champ électrique est une grandeur vectorielle.		
6	Le champ électrique créé par une particule de charge q dépend de sa masse m .		
7	L'énergie potentielle électrique d'une particule chargée dépend de la masse de la particule.		
8	L'intensité du champ électrique est en tout point entre les plaques d'un condensateur constante.		
9	Un électron mis en mouvement par un champ électrique se déplace toujours dans le sens du champ électrique.		
10	Un neutron ne subit aucune force électrique lorsqu'il se déplace dans un champ électrique.		

B. Une goutte d'huile de masse égale à $2,0 \cdot 10^{-11}$ g est immobile entre les plaques d'un condensateur chargé. Les plaques sont distantes de 25 mm et la tension aux bornes du condensateur vaut 200 V. Quelle affirmation est correcte ?

a. La goutte d'huile

- A. Est neutre
- B. Est chargée positivement
- C. Est chargée négativement
- D. Peut être chargée positivement ou négativement
- E. Aucune des réponses



b. Le poids de la goutte

- A. Peut être négligé par rapport à la force électrique
- B. Est plus petit que la force électrique
- C. A même intensité que la force électrique
- D. Est plus grand que la force électrique
- E. Est la seule force agissant sur la goutte d'huile

c. L'intensité du champ électrique du champ électrique entre les plaques du condensateur vaut

- A. $800 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
- B. $5000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
- C. $8000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
- D. $50000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
- E. $80000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$

d. La force électrique exercée sur la goutte

- A. A même sens que le champ électrique en ce point
- B. Est de sens opposé au champ électrique en ce point
- C. Est colinéaire à la ligne équipotentielle en ce point
- D. Est perpendiculaire au champ électrique en ce point
- E. Est colinéaire aux plaques du condensateur

e. La charge de la goutte d'huile vaut

- A. $2,45 \cdot 10^{-14}$ C
- B. $2,45 \cdot 10^{-15}$ C
- C. $2,45 \cdot 10^{-18}$ C
- D. $2,45 \cdot 10^{-17}$ C
- E. Aucune des réponses

Crédits Photos

- © Andrey Semenov / Shutterstock.com (1198178257) – **p.0** (page titre)
- © Sandrino Savini – **p.9** (champ électrique d'une charge ponctuelle, photo milieu de page)
- © Wikimedia Commons / MikeRun – **p.9** (champ électrique de 2 charges ponctuelles de signe opposé, photo bas de page ; sous licence CC BY-SA 4.0)
- © Wikimedia Commons / MikeRun – **p.10** (champ électrique autour d'une pointe ; sous licence CC BY-SA 4.0)
- © Gilles Frising – **p.11** (champ électrique uniforme)
- © Gilles Frising – **p.12** (absence de champ électrique à l'intérieur d'un cylindre creux et conducteur, photo de gauche)
- © Wikimedia Commons / Martin Apolin – **p.12** (cage de Faraday, photo de droite ; sous licence CC BY-SA 3.0)
- © ETAP / Shutterstock.com (520712602) – **p.20** (condensateurs)

Crédits Illustrations

- © G. Hartwig / The Aerial World (1886) – **p.10** (Feu de Saint-Elme sur un bateau; domaine public)
- © aiyoshi597 / Shutterstock.com (1994461613) – **p.20** (quarks)
- © Alex R. Howe – **p.21** (interactions fondamentales sous licence CC BY-NC 2.5)

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

- © HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson
- © HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson