Chapitre 1.3 – La définition du champ électrique

Le champ électrique

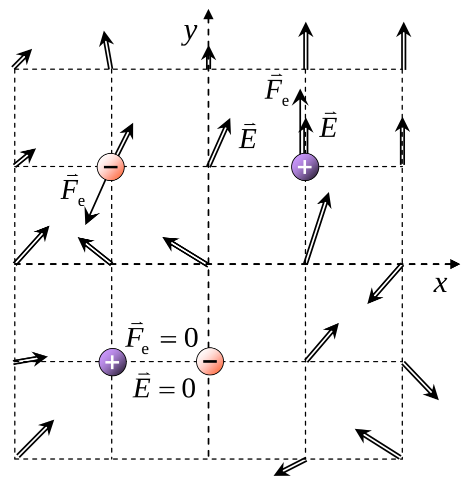
Au milieu du 19e siècle, le physicien et chimiste anglais Michael Faraday introduit la notion de champ électrique afin d'expliquer le comportement à distance de la force électrique. Selon Faraday, une **charge électrique** pouvait **subir** une **force électrique** uniquement si celle-ci était **située** à un **endroit** où **régnait** un **champ électrique**. Puisque c'est l'interaction de deux charges électriques qui produit la force électrique, Faraday affirma que le **champ électrique** mesuré en un point de l'espace était **généré** par l'ensemble des **charges avoisinantes**. Ainsi, la source du champ électrique est la charge électrique elle-même.

Michael Faraday
(1791-1867)

Toute particule chargée électriquement proclame sa présence en générant autour d'elle un champ électrique pouvant appliquer des forces électriques à distance sur les autres particules chargées.

Mathématiquement, la force électrique $\vec{F}_{\mathrm{e}}$ est le produit de la charge électrique q qui subit la force électrique avec le champ électrique $\vec{E}$ évalué à l'endroit où la charge est située. C'est le signe de la charge q qui dictera le sens de la force :

$$\vec{F}_{\mathrm{e}} = q\vec{E}$$

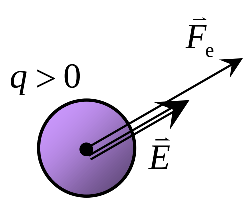
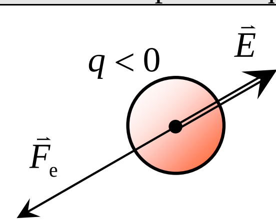


Champ électrique dans un plan *xy* qui applique des forces sur des particules chargées. Ce champ électrique est généré par les particules illustrées ainsi que par plusieurs particules non illustrées.

où $\vec{F}_{\mathrm{e}}$: Force électrique appliquée sur la charge q par le champ électrique $\vec{E}$ en newton (N)

q : Charge électrique subissant la force électrique et située dans le champ $\vec{E}$ en coulomb (C)

$\vec{E}$: Champ électrique produit par les charges avoisinantes à la charge q (N/C)

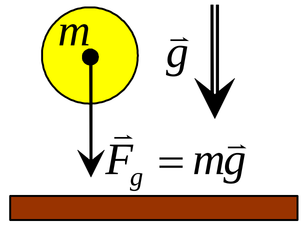
Charge q positive (attraction du champ électrique $\vec{E}$)	Charge q négative (répulsion du champ électrique $\vec{E}$)
	

<u>Remarque :</u> Lorsqu'on évaluer le module de la force électrique, on ne se préoccupe pas du signe de la charge q et l'on utilise l'expression scalaire de la force électrique : $F_e = |q|E$

Analogie avec le champ gravitationnel $\vec{g}$

En mécanique, nous avons donné la définition suivante à la force gravitationnelle avec le concept de champ gravitationnel :

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

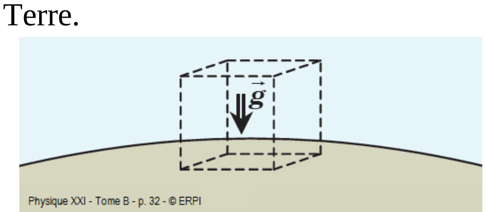
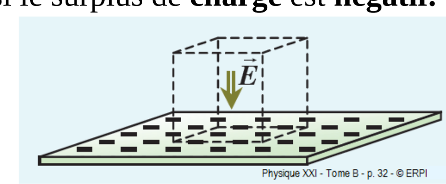


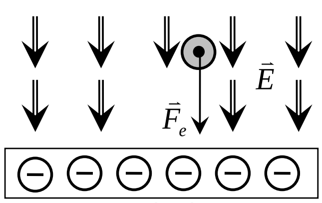
où $\vec{F}_g$: Force appliquée par la Terre sur la masse (N)

$\vec{g}$: Champ gravitationnel produit par la Terre (N/kg)

m : Masse qui subit la force gravitationnel et masse (kg)

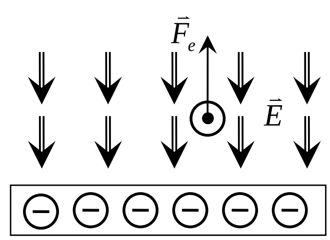
On réalise que cette définition de la force gravitationnelle est mathématiquement très comparable à la définition de la force électrique. Voici quelques points de comparaisons :

	Force gravitationnelle	**Force électrique**
Force	$F_g = G\dfrac{mM}{r^2}$	$F_e = k\dfrac{\lvert qQ\rvert}{r^2}$ (force de Coulomb, voir 1.2)
Force et champ	$\vec{F}_g = m\vec{g}$	$\vec{F}_e = q\vec{E}$
Charge subissant la force	Masse m	Charge électrique q
Signes des charges	Positive	Positive, Négative
Interaction	Attraction	Attraction, Répulsion
Champ constant	Dans une région située à proximité de la surface de la Terre, on peut considérer le champ gravitationnel comme uniforme et orienté vers la Terre. 	Une plaque très grande avec un surplus de charges produira un champ électrique uniforme orienté perpendiculairement vers à la plaque si le surplus de **charge** est **négatif.** 



plaque chargée négativement

Un proton est attiré par les charges négatives (donc par les plaques chargées négativement).



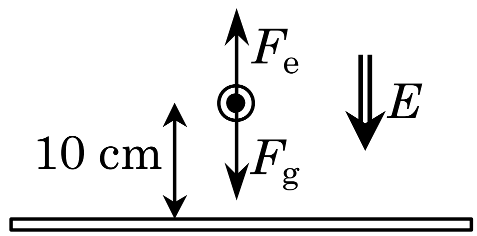
plaque chargée négativement

Un électron est repoussé par les charges négatives (donc par les plaques chargées négativement).

Situation 3 : ***Une bille en équilibre dans un champ électrique et un champ gravitationnel.*** Dans un laboratoire terrestre, une petite bille dont la masse vaut 0,002 kg et la charge vaut -25 µC flotte à 10 cm au-dessus d'une plaque horizontale uniformément chargée. On désire déterminer le signe de la charge de la plaque ainsi que le champ électrique généré par la plaque à l'endroit où se trouve la bille.

Nous pouvons faire les remarques suivantes afin de nous guider dans la rédaction de notre solution :

- Le poids de la bille est vers le bas.
- Pour avoir l'équilibre, il faut une force électrique orientée vers le haut.
- La bille est repoussée par la plaque.
- Puisque la bille possède une charge négative, la **plaque** est **chargée négativement**.



Avec la 2^e loi de Newton, évaluons le module du champ électrique :

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_g = 0 \quad \Rightarrow \quad F_e - F_g = 0 \qquad \text{(Décomposer en } y\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad F_e = F_g \qquad \text{(Isoler } F_e\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad |q|E = mg \qquad \text{(Remplacer } F_e = |q|E \text{ et } F_g = mg\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad E = \frac{mg}{|q|} \qquad \text{(Isoler } E\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad E = \frac{(0{,}002)(9{,}8)}{\left|-25\times10^{-6}\right|} \qquad \text{(Remplacer valeurs numériques)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{E = 784 \ \text{N/C}} \qquad \text{(Évaluer } E\text{)}$$

N.B. Puisque le champ électrique généré par la plaque est uniforme, la distance de 10 cm n'est pas utilisée dans le calcul de E.

Les deux types de champ électrique

La contribution des charges électriques au champ électrique s'effectue à l'aide de deux processus que l'on attribue à deux types de champ. Le champ électrique correspond ainsi au champ total tel que

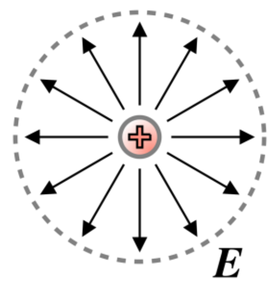
$$\vec{E} = \vec{E}_{\mathrm{C}} + \vec{E}_{\mathrm{ind}}$$

<u>Le champ coulombien :</u> $\vec{E}_{\mathrm{C}}$

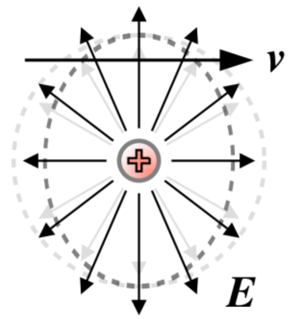
Le champ coulombien $\vec{E}_{\mathrm{C}}$ est la composante du champ électrique $\vec{E}$ correspondant à la position des particules. Si les particules qui génèrent le champ électrique sont immobiles, on parle alors de champ électrostatique.

Si elles sont en mouvement à vitesse constante, ce champ est déformé en fonction de l'orientation et du module de la vitesse en raison d'effet relativiste.

Cette partie du champ électrique permet d'effectuer un travail conservatif[1].



Champ coulombien avec charge immobile



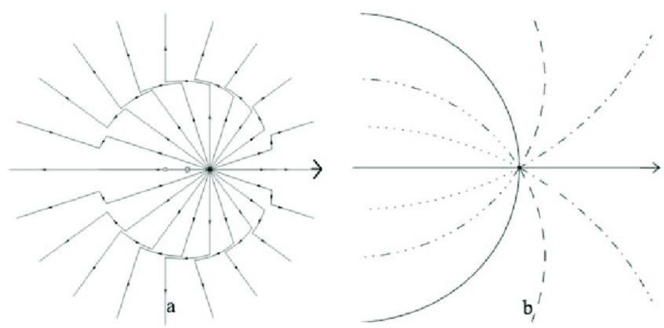
Champ coulombien avec charge en mouvement à vitesse constante

https://www.pngegg.com/en/search?q=lorentz+Force

<u>Le champ électrique induit :</u> $\vec{E}_{\mathrm{ind}}$

Le champ électrique induit $\vec{E}_{\mathrm{ind}}$ est une conséquence de l'accélération des particules qui contribuent à générer le champ électrique $\vec{E}$. Cette composante du champ électrique est beaucoup plus complexe à calculer, car elle nécessite la compréhension du champ magnétique $\vec{B}$. C'est cette composante qui est responsable de la production des ondes électromagnétiques.

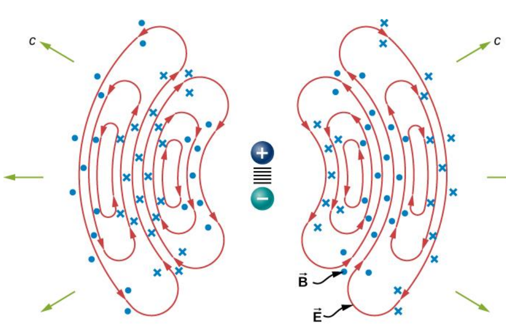
Cette partie du champ électrique n'est pas conservatif.



https://www.researchgate.net/figure/a-The-electric-field-lines-generated-by-a-charge-after-an-instantaneous-velocity_fig1_319198017

L'image (a) représente le champ d'une particule accélérée de façon spontanée.
L'image (b) représente le champ d'une particule accéléré uniformément (MUA).

Dans le cas d'un système à charge totale nulle, mais avec oscillation, il est possible de produire des ondes électromagnétiques comme il est illustré sur le schéma ci-contre.



https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-2-plane-electromagnetic-waves

Illustration du champ électrique induit par l'oscillation de deux charges positives et négatives.

[1] La notion de travail conservatif sera discutée dans le chapitre 2.

La loi de Coulomb en électrostatique


Charles A. Coulomb
(1736-1806)

Dans les années 1780, avant l'introduction du champ électrique, le physicien français Charles-Augustin de Coulomb découvre expérimentalement l'expression décrivant le module de la **force électrique** que s'exercent **deux charges électriques immobiles** disposées sur des **sphères**. De nos jours, nous savons que la loi de Coulomb s'applique à toutes les particules pouvant être considérées comme étant ponctuelles. Coulomb réalise que le module de la force électrique dépend des paramètres suivants :

$F_{\mathrm{e}} \propto q_1 q_2$: La force électrique est proportionnelle au produit des deux charges q_1 et q_2 en attraction ou en répulsion.

$F_{\mathrm{e}} \propto 1/r^2$: La force électrique est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges.

$F_{\mathrm{e}} \propto k$: La force électrique est proportionnelle à une constante afin d'évaluer la force électrique en newton.

Voici l'expression scalaire de la loi de Coulomb en électrostatique[2] :

La loi de Coulomb	La loi de Coulomb et le champ électrique
$F_{\mathrm{e}} = k\dfrac{\lvert q_1 q_2\rvert}{r^2}$	$F_{\mathrm{e}} = \lvert q_1\rvert E_2$ tel que $E_2 = k\dfrac{\lvert q_2\rvert}{r^2}$

où F_{e} : Force électrique en newton (N)

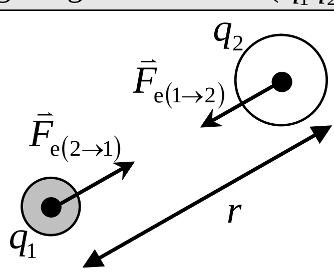
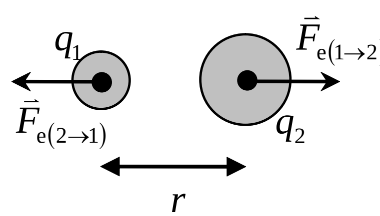
E_2 : Le champ électrique généré par la charge #2 sur la charge #1 (N/C)

q_1 : Charge #1 qui applique la force électrique sur la charge #2 en coulomb (C)

q_2 : Charge #2 qui applique la force électrique sur la charge #1 en coulomb (C)

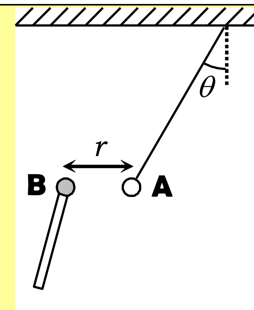
r : Distance entre les deux charges ponctuelles en mètre (m)

k : Constante de la loi de Coulomb, $k = 9{,}00\times 10^{9}\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}$

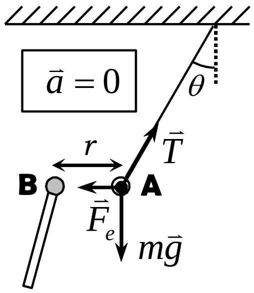
Attraction Charges signes contraires ($q_1 q_2 < 0$)	**Répulsion** Charges signes semblables ($q_1 q_2 > 0$)
	

[2] La loi de Coulomb tel que présentée s'applique uniquement à deux regroupements de charges immobiles et porte le nom de loi de Coulomb en électrostatique.

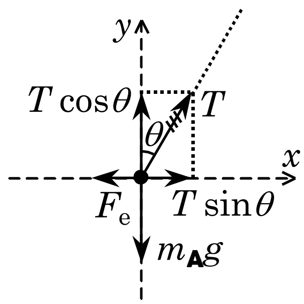
Chapitre 1.2 - Situation 2 : ***Une bille chargée en équilibre.*** Une petite bille chargée **A** est suspendue au plafond par une corde de 25 cm de longueur dont la masse est négligeable. On place une petite bille **B** dont la charge est égale à +5 μC à l'extrémité d'une baguette en bois et on l'approche de la bille **A**. On obtient la situation d'équilibre illustrée sur le schéma ci-dessous : la corde fait un angle de 30° avec la verticale et la bille **B** est à 10 cm à droite de la bille **A**, à la même hauteur. On désire déterminer la charge de la bille **A**, sachant que sa masse est égale à 0,004 kg.



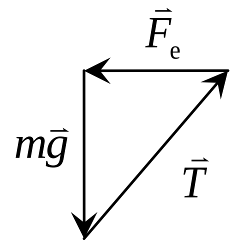
Voici le schéma des forces de la situation :



Décomposition des forces selon l'axe *xy* :



Résolution de la 2[e] loi de Newton graphique :



Appliquons la 2[e] loi de Newton selon l'axe *y* :

$\sum F_y = T\cos(\theta) - m_A g = 0 \quad \Rightarrow \quad T = \dfrac{m_A g}{\cos(\theta)}$ (Isoler *T*)

$\Rightarrow \quad T = \dfrac{(0{,}004)(9{,}8)}{\cos(30°)}$ (Remplacer valeurs num.)

$\Rightarrow \quad \boxed{T = 0{,}0453\ \text{N}}$ (Évaluer *T*)

Appliquons la 2[e] loi de Newton selon l'axe *x* :

$\sum F_x = -F_e + T\sin(\theta) = 0 \quad \Rightarrow \quad F_e = T\sin(\theta)$ (Isoler F_e)

$\Rightarrow \quad F_e = (0{,}0453)\sin(30°)$ (Remplacer valeurs num.)

$\Rightarrow \quad \boxed{F_e = 0{,}02265\ \text{N}}$ (Évaluer F_e)

Avec la définition de la force électrique, nous pouvons évaluer la charge de la bille A :

$F_e = |q_A| E_B = |q_A| \left(k\dfrac{|q_B|}{r^2} \right) \quad \Rightarrow \quad |q_A| = \dfrac{F_e r^2}{k|q_B|}$ (Isoler $|q_A|$)

$\Rightarrow \quad |q_A| = \dfrac{(0{,}02265)(0{,}1)^2}{(9\times 10^9)|5\times 10^{-6}|}$ (Remplacer valeurs num.)

$\Rightarrow \quad |q_A| = 5\times 10^{-9}\,\text{C}$ (Évaluer $|q_A|$)

$\Rightarrow \quad \boxed{q_A = -5\times 10^{-9}\,\text{C}}$ (Attraction et $q_B > 0$)

La constante électrique

La loi de Coulomb peut être évaluée à partir de la constante électrique dans le vide

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}\,\mathrm{C^2 N^{-1} m^{-2}}$$

qui correspond à la relation

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} \qquad \text{et} \qquad k = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \quad .$$

Historiquement, cette constante portait également le nom de *permittivité du vide*. Cette constante est utilisée pour simplifier d'autres expressions mathématiques en lien avec la force électrique comme le champ électrique généré par une plaque uniformément chargée[3].

[3] Cette notion sera présentée au chapitre 1.9.