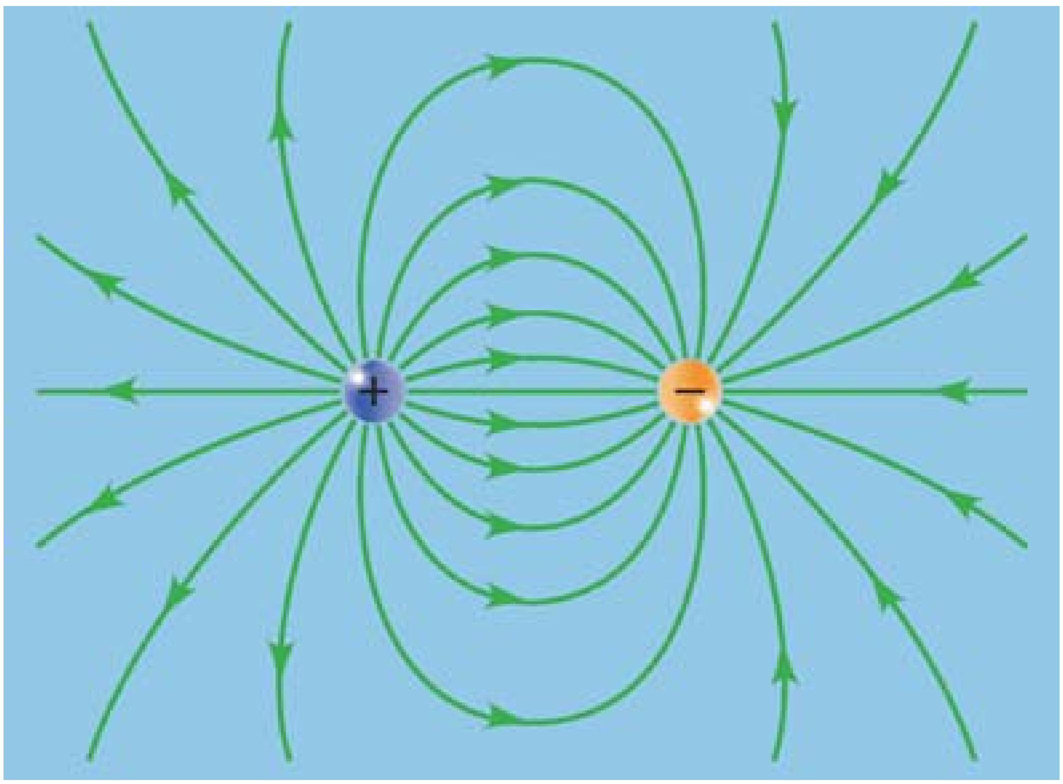
MODULE 3

LE CHAMP ÉLECTRIQUE

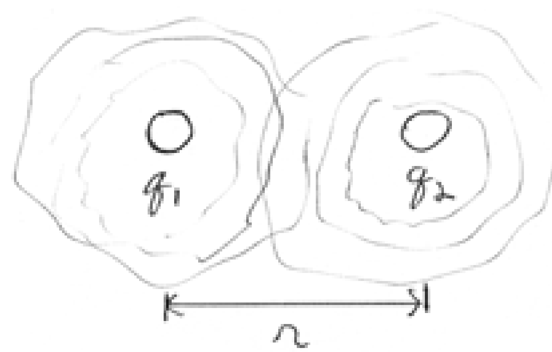


Représentation du champ électrique entre deux charges de signes opposés

3.1 CHAMP ÉLECTRIQUE

Nous avons vu au module 1.4 que la loi de Coulomb faisait intervenir la notion d'action à distance. Elle fait état d'une interaction entre des particules chargées distantes les unes des autres, mais n'explique pas le mécanisme par lequel les forces agissent sur ces particules sans qu'il n'y ait de contact physique entre elles. C'est la notion de champ électrique qui le fera.

On dit qu'une charge électrique crée un champ électrique dans l'espace qui l'entoure (limitons-nous pour l'instant à ″quelques choses de flou″ autour des charges…). La charge q_1 n'interagit pas directement avec la charge q_2, mais plutôt par l'intermédiaire de leur champ électrique dans lequel elles se trouvent. Le champ électrique joue donc le rôle d'intermédiaire entre les particules chargées.



Nous verrons au cours des prochains modules que le champ électrique présent dans un environnement donné permet en fait de prédire le comportement des charges électriques dans cette région. Le champ électrique est également défini comme étant la force électrique par unité de charge agissant sur une particule chargée en un point donné de l'espace.

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}_E / q \qquad \textbf{Champ électrique (3.1)}$$

où : **E** = champ électrique (vectoriel) (N/C)

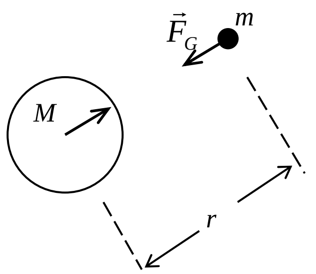
$\mathbf{F}_E$ = force électrique (vectoriel) (N)

q = charge électrique (scalaire) (C)

Pour vous aider à mieux saisir la notion de champ électrique, voyez la comparaison suivante entre le champ gravitationnel (que vous connaissez déjà en principe …) et le champ électrique.

Champ gravitationnel

La masse M (la Terre par exemple) influence une masse m placée près de celle-ci.

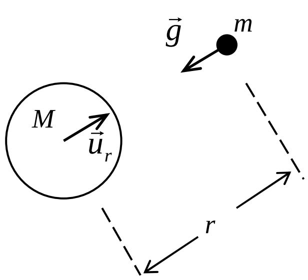


Force gravitationnelle : $F_G = GMm/r^2$

Champ gravitationnel : $g = \dfrac{F_G}{m} = \dfrac{GM}{r^2}$

Le champ gravitationnel est indépendant de m.

Le champ gravitationnel est vectoriel : $\vec{F}_G = m\vec{g}$

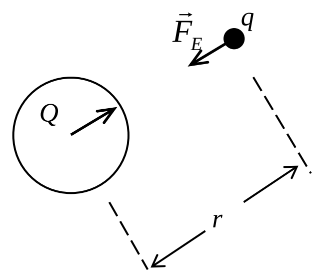


$$\vec{g} = -\frac{GM}{r^2}\vec{u}_r$$

Le champ $\vec{g}$ est produit par M seulement. La masse m n'influence pas la production du champ.

Champ électrique

La charge électrique Q influence une charge q placée près de celle-ci.

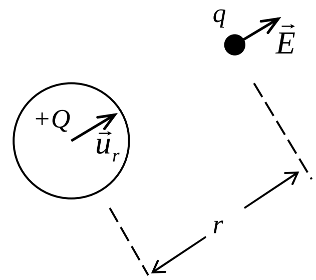


Force électrique : $F_E = k|Qq|/r^2$

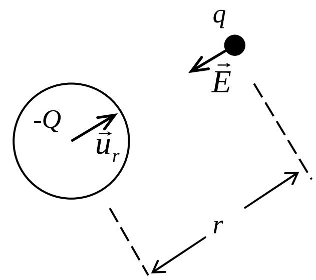
Champ électrique : $E = \dfrac{F_E}{q} = \dfrac{kQ}{r^2}$

Le champ électrique est indépendant de q.

Le champ électrique est vectoriel : $\vec{F}_E = q\vec{E}$



$$\vec{E} = \frac{kQ}{r^2}\vec{u}_r$$



Le champ $\vec{E}$ est produit par Q seulement. La charge q n'influence pas la production du champ.

Dans la comparaison précédente, le champ électrique $E = kQ/r^2$ (d'une charge ponctuelle Q) a été obtenu en remplaçant la grandeur de la force électrique $F_E = k\,|Qq| / r^2$ (loi de Coulomb donnant la force électrique entre deux particules ponctuelles) dans l'équation $E = F_E / q$. Si on considère maintenant la nature vectorielle du champ électrique et de la force électrique, on voit effectivement que ce sont deux vecteurs de même direction, mais qui diffèrent seulement d'un facteur q.

Le champ électrique est créé par la charge Q, alors que la charge q est celle d'une particule qui est présente dans l'environnement de Q (mais qui ne contribue pas ici à la création du champ électrique E). Une force électrique est alors présente entre la particule de charge q et celle de charge Q.

Notez qu'à la figure ci-contre, les forces $\mathbf{F}_1$ et $\mathbf{F}_2$ sont présentes (en plus des champs $\mathbf{E}_1$ et $\mathbf{E}_2$) puisqu'il y a des charges aux points 1 et 2. Si les charges q_1 et q_2 étaient absentes, les champs électriques $\mathbf{E}_1$ et $\mathbf{E}_2$ seraient identiques à la situation précédente, mais il n'y aurait pas de forces $\mathbf{F}_1$ et $\mathbf{F}_2$.

$E = k\,|Q| / r^2$ **Champ électrique (charge ponctuelle) (3.2)**

où : E = grandeur du champ électrique (N/C)

k = constante de la loi de Coulomb = $9{,}00 \times 10^9$ N·m^2 / C^2

Q = charge électrique ponctuelle (C)

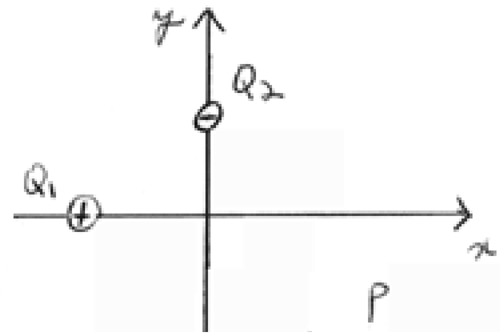
r = distance entre un point de l'espace et la charge Q (m)

Dans les prochains modules, nous chercherons en fait à déterminer le champ électrique de différentes configurations de charges électriques (pas seulement pour les charges ponctuelles). Par contre, dans le présent module nous nous limiterons aux charges ponctuelles ou à différentes associations de celles-ci.

Avant de passer à l'exemple qui suit, rappelons simplement que le principe de superposition (vu au module 1.4 B)) s'applique de la même manière pour le champ électrique que pour les forces électriques. Nous pourrons donc déterminer le champ électrique créé par plusieurs charges ponctuelles.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \ldots + \mathbf{E}_N \qquad \textbf{Principe de superposition (3.3)}$$

Exemple 3.1 : Déterminez le champ électrique résultant au point P (2 ; -3) m généré par la distribution de charges suivante (Q_1 = 5 μC est au point P_1 (-2 ; 0) m et Q_2 = -7 μC est au point P_2 (0 ; 2)) :



① $r_1 = \sqrt{x^2 + y^2}$

$r_1 = \sqrt{(4)^2 + (3)^2}$

$\boxed{r_1 = 5\ m}$

$r_2 = \sqrt{(2)^2 + (5)^2}$

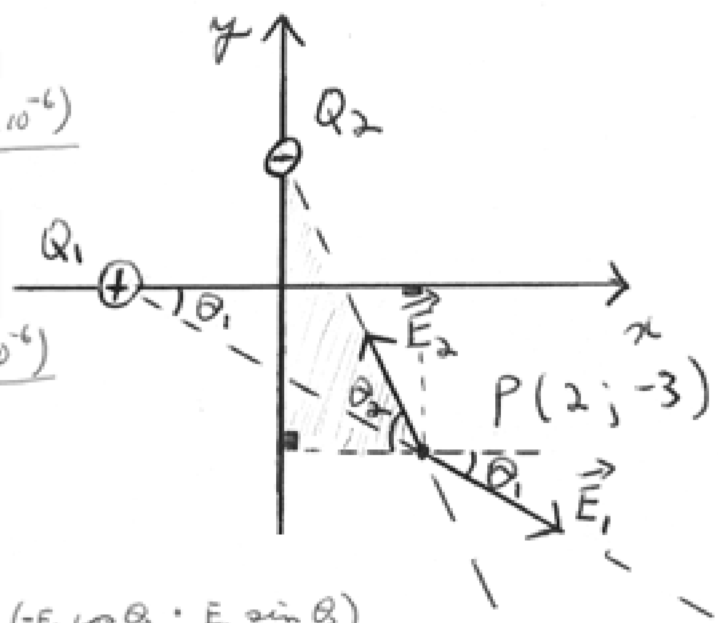
$\boxed{r_2 = \sqrt{29}\ m} \approx 5,39\ m$

③ $\tan\theta_1 = \frac{3}{4}$

$\boxed{\theta_1 = 36,87°}$

$\tan\theta_2 = \frac{5}{2}$

$\boxed{\theta_2 = 68,20°}$



② $E_1 = \frac{k|Q_1|}{r_1^2} = \frac{(9,0\times10^9)(5\times10^{-6})}{(5)^2}$

$\boxed{1,8\times10^3\ N/C = E_1}$

$E_2 = \frac{k|Q_2|}{r_2^2} = \frac{(9,0\times10^9)(7\times10^{-6})}{(\sqrt{29})^2}$

$\boxed{2,2\times10^3\ N/C = E_2}$

④ $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$

$= (E_1\cos\theta_1 ; -E_1\sin\theta_1) + (-E_2\cos\theta_2 ; E_2\sin\theta_2)$

$= (1,8\times10^3\cos 36,87° ; -1,8\times10^3\sin 36,87°) + (-2,2\times10^3\cos 68,20° ; 2,2\times10^3\sin(68,20°))$

$\boxed{\vec{E} = (6,23 ; 9,63)\times10^2\ N/C}$ ou $\vec{E} = [6,23\times10^2\,\hat{\imath} + 9,63\times10^2\,\hat{\jmath}]\ N/C$

Note : Pour déterminer le sens des vecteurs champ électrique, il suffit de placer une charge test (imaginaire et toujours positive) au point considéré et déterminer si elle serait attirée ou repoussée par chacune des charges.

3.2 LIGNES DE CHAMP

Les lignes de champ sont utilisées pour représenter le champ électrique. Elles indiquent l'orientation du champ électrique en tout point de l'espace d'une configuration donnée. Si nous plaçons une charge test (positive) à plusieurs endroits autour d'une charge ponctuelle positive (afin d'obtenir la configuration totale du champ électrique généré par la charge ponctuelle), chacun des vecteurs champ électrique serait radial à la charge ponctuelle et s'éloignerait d'elle (+ et + se repoussent).

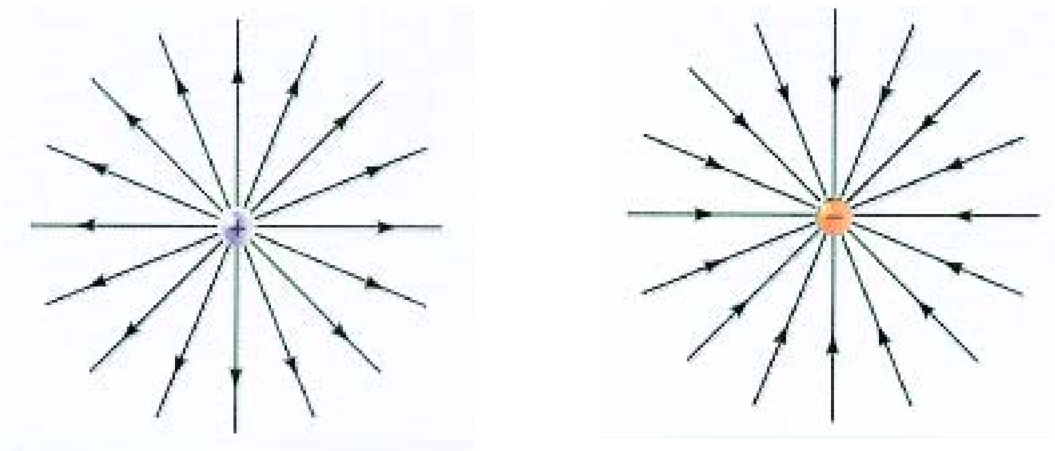


Figure 3.1 Configurations des lignes de champ d'une charge ponctuelle positive et négative.

Si nous combinons maintenant ces deux configurations de base, c'est-à-dire que si nous considérons deux charges de signes contraires, nous obtiendrions les champs électriques représentés à la figure 3.2 pour les trois premiers points analysés avec la charge test.

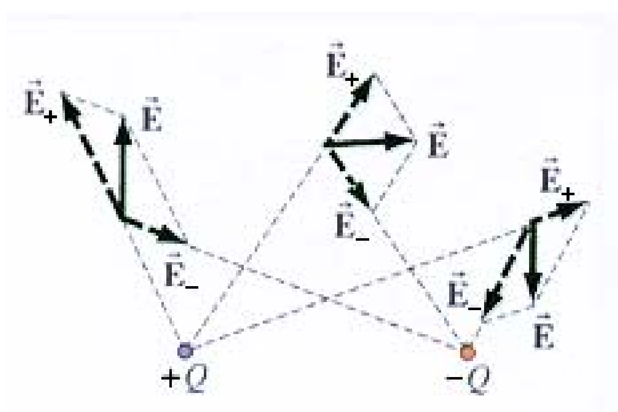


Figure 3.2 Champ électrique créé en quelques points par deux charges ponctuelles.

La figure 3.3 illustre un plus grand nombre de points, mais surtout le fait que les vecteurs champ électrique sont tangents en tout point aux lignes de champ. Donc, si nous connaissons la représentation des lignes de champ d'une configuration donnée, nous pouvons représenter graphiquement le vecteur champ électrique en tout point de cette configuration. De plus, cela nous permet de prédire le comportement d'une charge quelconque qui serait présente dans cet environnement (elle suivrait les lignes de champ vers la charge positive ou vers la charge négative selon sa propre charge).

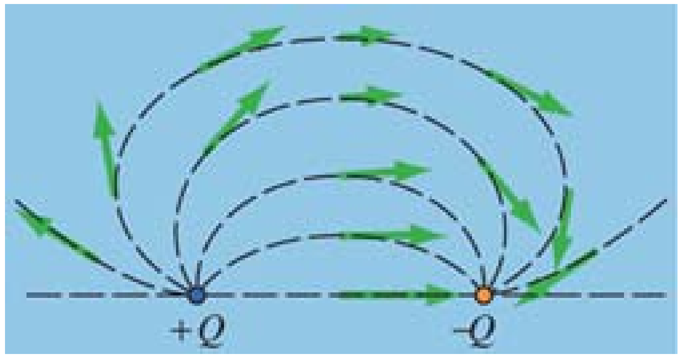
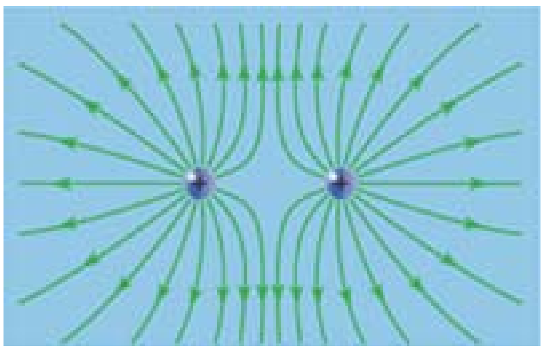


Figure 3.3 Le champ électrique est tangent aux lignes de champ.



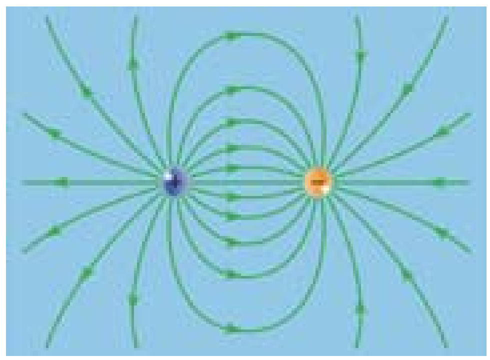


Figure 3.4 Configurations des lignes de champ produites par deux charges ponctuelles de mêmes signes et de signes contraires.

<u>Propriétés des lignes de champ électrique</u>

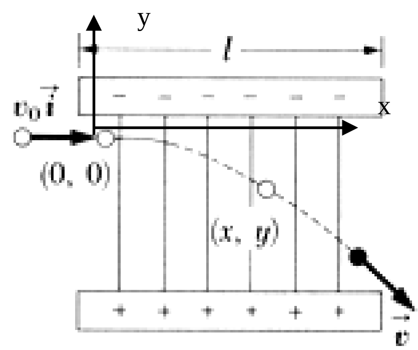
1. Elles vont toujours des charges positives (+) vers les charges négatives (-).
2. Le nombre de lignes qui arrivent à une charge ou qui en partent est proportionnel à la grandeur de la charge.
3. La direction du champ en un point quelconque est toujours tangente à la ligne de champ.
4. L'intensité du champ est proportionnelle à la densité des lignes de champ. Plus les lignes sont rapprochées, plus le champ électrique est grand.
5. Les lignes de champ ne se coupent jamais (sinon, le champ aurait deux directions différentes au même endroit !!!)

3.3 CHARGES EN MOUVEMENT DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE UNIFORME

Les charges ayant été immobiles jusqu'à présent dans le module 3, nous allons maintenant regarder le cas de particules chargées en mouvement dans un champ électrique uniforme. L'étude du mouvement des particules élémentaires comme les protons ou les électrons se déplaçant dans un champ électrique peut être réalisée en négligeant la force gravitationnelle agissant sur elles, puisqu'elle est très petite comparativement à la force électrique (voir exemple 2.1 du Benson). Nous pourrons donc considérer que la seule force agissant sur ces particules sera la force électrique donnée par l'équation définissant le champ électrique, soit : $\mathbf{E} = \mathbf{F}_E / q$ (ou bien $\mathbf{F}_E = q\,\mathbf{E}$). Cette force étant constante (puisque le champ est uniforme), elle causera une accélération constante sur la particule, nous permettant ainsi d'appliquer la cinématique vue en mécanique.

Nous combinerons donc ces nouvelles notions d'électricité à celles qui ont été acquises dans votre premier cours de physique pour résoudre des problèmes d'électrodynamique en utilisant les équations de la cinématique ainsi que la deuxième loi de Newton ($\Sigma\mathbf{F} = m\mathbf{a}$).

Exemple 3.2 : Un électron pénètre entre deux plaques parallèles où règne un champ électrique uniforme. Sachant que sa vitesse initiale à l'entrée des plaques est de 3 x 10^6 m/s, que le champ électrique vaut 200 N/C et que la longueur des plaques est de 10 cm, déterminez le déplacement vertical de l'électron durant son parcours dans le champ.



① $\Sigma F_y = ma$

$F_e = m a_y$

$qE = m a_y$

$a_y = \dfrac{qE}{m}$

$a_y = \dfrac{(-1,602 \times 10^{-19})(200)}{(9,1 \times 10^{-31})}$

$\boxed{a_y = -3,52 \times 10^{13}\ m/s^2}$

② $x_0 = 0\ m$
$x = 0,10\ m$
$v_{0x} = 3 \times 10^6\ m/s$
$v_x = 3 \times 10^6\ m/s$
$a_x = 0\ m/s^2$
$t = \ ?$

$y_0 = 0\ m$
$y = \ ?$
$v_{0y} = 0\ m/s$
$v_y = \ ?$
$a_y = \ ?$
$t = \ ?$

$x = x_0 + \frac{1}{2}(v_{0x} + v_x)t$

$0,10 = 0 + \frac{1}{2}(3 \times 10^6 + 3 \times 10^6)t$

$\boxed{t = 3,33 \times 10^{-8}\ s}$

$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{1}{2}a_y t^2$

$y = 0 + 0 + \frac{1}{2}(-3,52 \times 10^{13})(3,33 \times 10^{-8})^2$

$\boxed{y = -1,95\ cm}$

Le déplacement vertical subi par l'électron est donc de 1,95 cm vers la plaque positive (puisque y+ est vers le haut sur le schéma).