

Chapitre 1

Électrisation – Interactions entre charges – Loi de Coulomb

1.1 Particule et charge électrique élémentaires

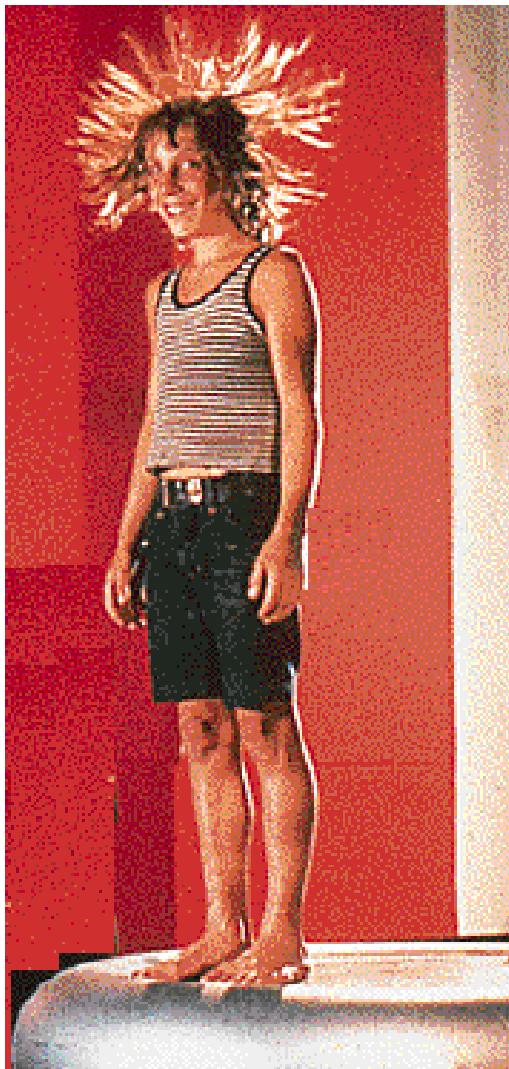
1.2 Constitution de la matière (atomistique)

1.3 Electrisation des matériaux

1.4 Distributions de charges

1.5 Interactions entre charges ponctuelles : **Loi de Coulomb**

Électrostatique : introduction et historique

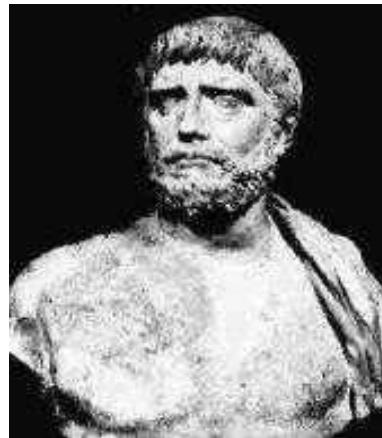


- Domaine de la physique qui étudie :
- les phénomènes d'équilibre des charges
 - les effets de ces charges immobiles sur l'espace les environnant
-
- Forces électriques exercées sur d'autres charges placées à proximité,
 - Concept de champ électrostatique traduisant les modifications de l'espace dans l'espace environnant les charges

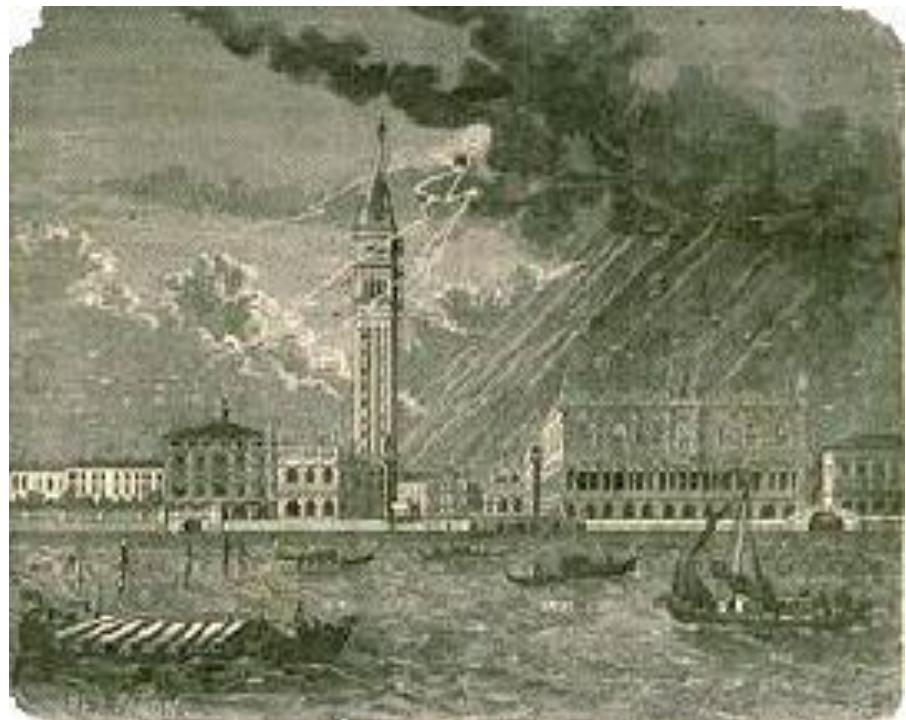
Un peu d'histoire...

Manifestations naturelles de l'électricité statique connues et observées depuis l'antiquité souvent attribuées à un pouvoir surnaturel ou divin.

foudre, propriétés attractives ou répulsives de certaines substances ..



Thalès de Milet, (600 av J.C.) observe que l'ambre jaune, une fois frotté, est capable d'attirer des brins de paille ou de la poussière: l'ambre, doué d'une âme, attire les corps légers « comme par un souffle ».



William Gilbert (1540-1603) médecin Reine Elisabeth

Magnétisme : pierre d'aimant, ambre jaune

Corps mêmes propriétés que l'ambre : le saphir, le diamant, le rubis, l'algue marine, le cristal de roche, le soufre, le mastic, l'arsenic etc.



A la suite, Stephen Gray tente, en vain, d'électriciser les métaux en les frottant.

Mais découvre la possibilité de transmettre la *vertu électrique* d'un tube en verre à un objet métallique, à condition de ne pas relier ce dernier à la terre.

Classification des corps en deux catégories :
conducteurs : ceux qui laissent passer les *effluves électriques*
isolants : ceux qui les conservent à leur surface

Essais de transmission du fluide électrique sur des cordes de différentes natures : 252 mètres sur une corde en soie

1.1 Particule et charge électrique élémentaires

Données générales

- électricité : effet du déplacement de particules chargées → toujours liée à la matière
- la matière est constituée d'atomes électriquement neutres
- à toute particule de matière (électrons, protons, neutrons) charge q associée
 - $q > 0$: proton, cation (Na^+)
 - ou $q < 0$: électron, anion (Cl^-)
 - ou $q = 0$: neutron, NaCl

q : quantifiée

mais toujours : $q = N.e$

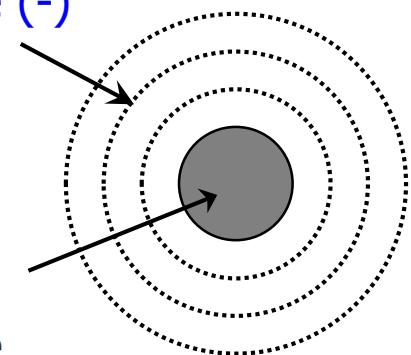
nombre entier
 $(|q| \geq e)$

charge de l'électron

$e = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ C (Coulomb)}$

NUAGE ÉLECTRONIQUE (-)

NOYAU (+)
très stable



La charge électrique d'un corps est quantifiée

1.2 Structure électronique de la matière

- noyau :

A particules, dense, chargé +

Z protons $m_p = 1.672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$q = +e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

A - Z neutrons : $m_n = 1.674 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$q = 0$

Z = numéro atomique

Z : numéro atomique

A : masse atomique

A = nombre de masse



17
Cl
35

- électrons :

$m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

$q = -e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

La cohésion de la matière est assurée par les interactions électriques (liaisons)

Electricité statique :

- globalement : matière neutre

- systèmes chargés par ajout ou enlèvement d 'e -

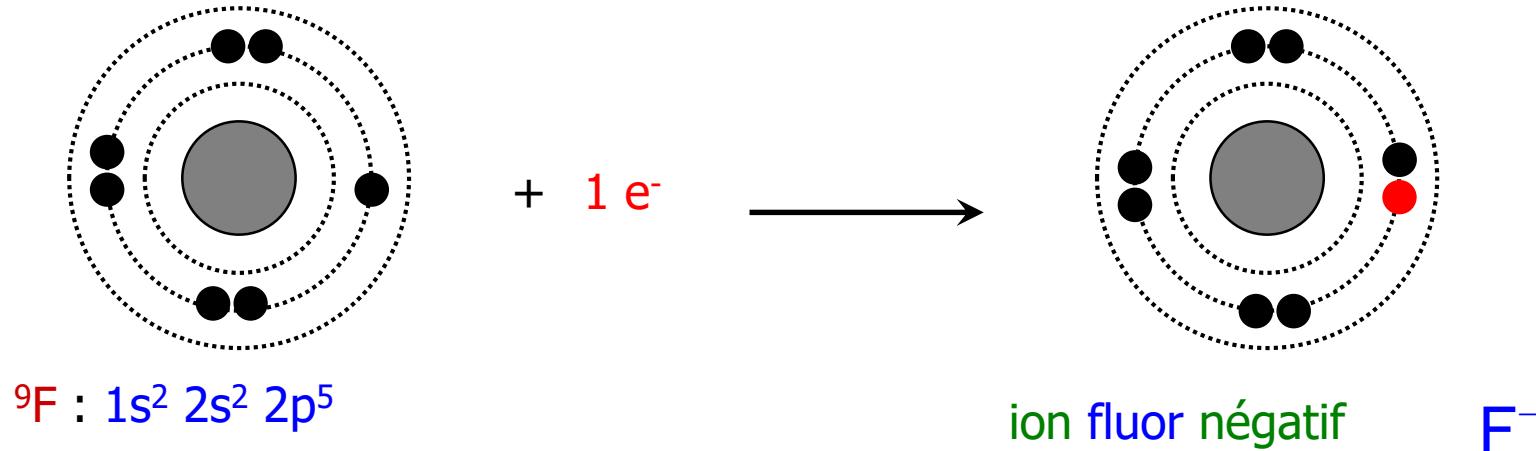
ajout d 'e - : ions -

enlèvement d 'e - : ions +

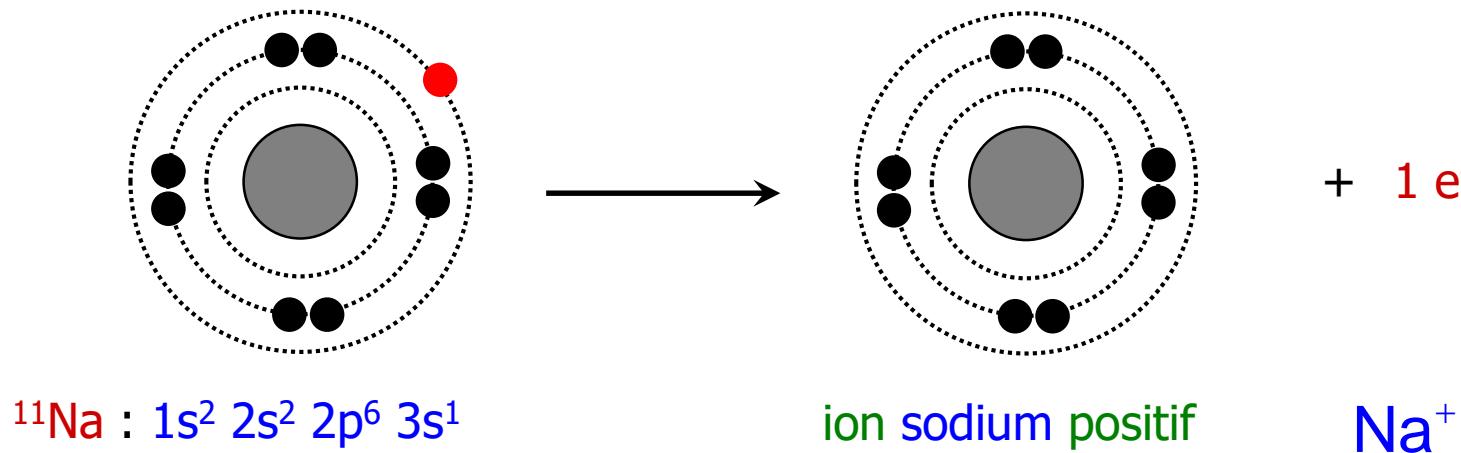
1.2 Structure électronique de la matière

Couches de valence

★ élément électronégatif



★ élément électropositif



1.2 Structure électronique de la matière

Classification des différents matériaux

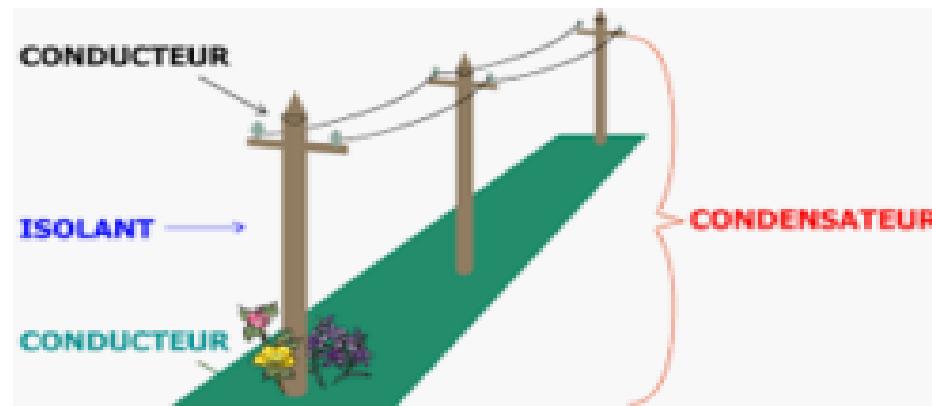
- ★ Un **conducteur** possède des charges électriques qui peuvent se déplacer: électrons libres.

2 types de conducteurs :

métaux : e^- mobiles / état solide ou liquide

electrolytes : ions mobiles / état liquide

- ★ Un **isolant** (ex. verre, caoutchouc) n'a **pas d'électrons libres**. Chaque e^- est fortement lié à un atome ou une molécule. Le frottement crée une **charge électrique localisée**.



1.3 Electrisation de la matière

★ a. Electrisation par frottement:

Frottement \Rightarrow électrisation (*charge électrique*)

\Rightarrow existence de *forces électrostatiques*

ex : plastique frotté par un drap

perte d 'e⁻ (+)

gain d 'e⁻ (-)



Tous les corps sont électrisables par frottement

★ Un corps qui n'a ni défaut ni excès de charges est neutre.

mais 2 catégories :

Conducteurs :

- les charges se déplacent facilement à la surface

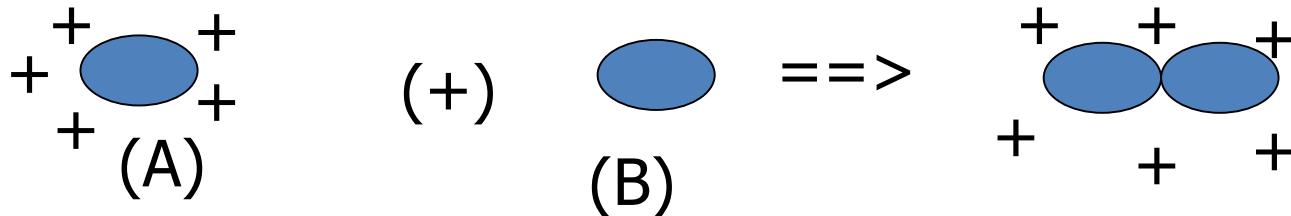
Isolants (diélectriques) :

- électrisation localisée

- 2 charges de *même signe* se repoussent \Rightarrow *réculsion*
- 2 charges de *signe différent* s'attirent \Rightarrow *attraction*

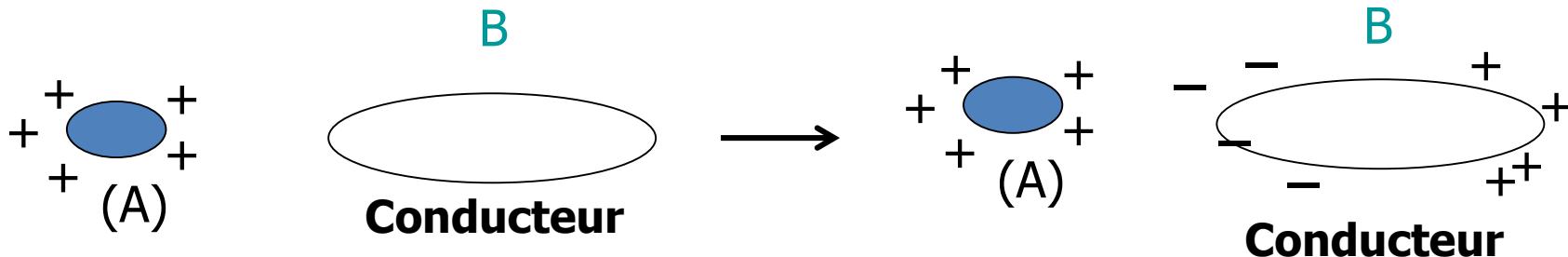
★ b - électrisation par contact

- charges sur A et B : même signe
- si B = isolant : charges localisées
- si B = conducteur : charges réparties



★ c - électrisation par influence

- B : conducteur, initialement neutre

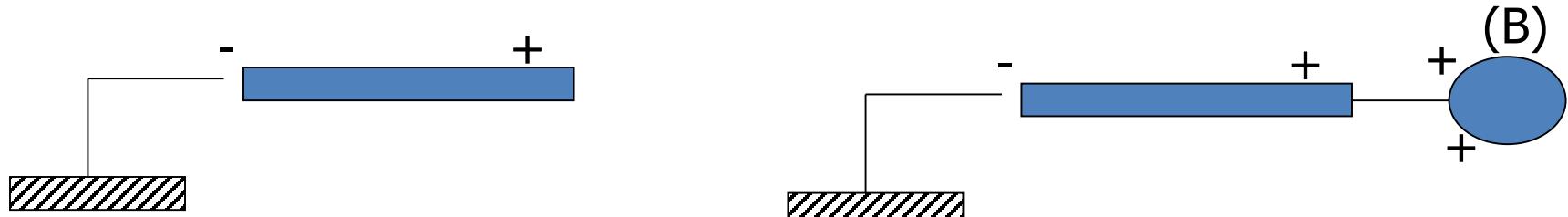


Les charges + de (A) attirent les charges - et repoussent les charges + de (B).

→ *forces électrostatiques*

L'électrisation par influence n'est possible que pour un matériau conducteur

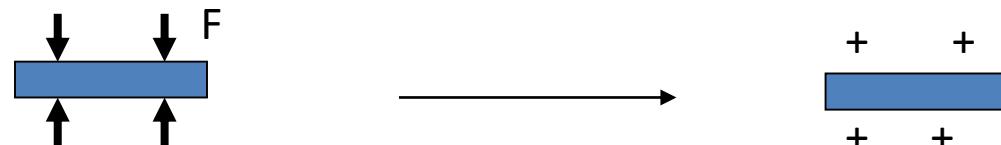
d - électrisation par liaison avec une source électrique



Générateurs électriques : piles, accumulateurs, dynamos,

e - autres méthodes :

- piezo-électricité (ex : quartz)



effet réversible
(électrisation --> déformation)
utilisation : briquet, microphones, ...

- pyro-électricité : par chauffage de certains corps

- ionisation des gaz par irradiation (rayons X, UV, ...)

Électrisation des corps : Synthèse

L'**électrisation** d'un corps est caractérisée par :

- Sa **charge totale** : somme algébrique de toutes les charges élémentaires (différence entre le nombre de charges positives et négatives)
- La **répartition de ces charges** à la surface ou dans le volume du corps chargé

- **Un corps électrisé modifie les propriétés de l'espace qui l'entoure**
 - Si on place un autre corps chargé dans cet espace, il sera attiré ou repoussé : existence de **forces électrostatiques**
 - Cette modification de l'espace sera modélisée par l'existence d'un **champ électrostatique** créé par le corps chargé (**Chapitre 2**)

1.4 Les différentes distributions de charge

➤ Charge élémentaire = charge de l'électron : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

➤ Charge $Q = Ne$ généralement très grande

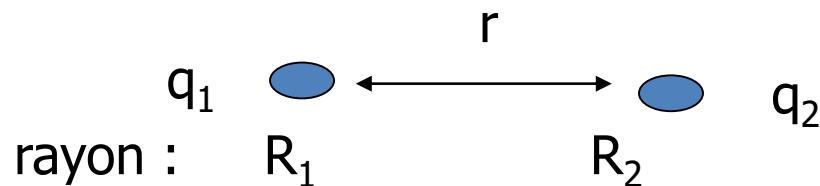
une charge occupe toujours un certain volume (même un e^- !!!)

mais ce qui compte : distance à la charge (cf masse volumique)

➤ Concept de charge ponctuelle

– la charge Q occupe une région de l'espace dont les trois dimensions sont **très faibles** par rapport à la distance à laquelle sont observés les effets électrostatiques,

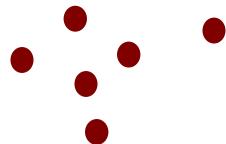
– On peut assimiler cette charge à une **charge ponctuelle, localisée en un point de l'espace**



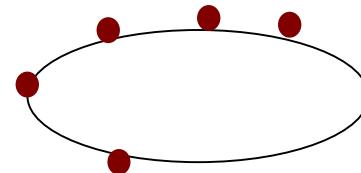
si $R_1, R_2 \ll r : \leftrightarrow$ charges ponctuelles

➤ Charge d'un corps de dimension finie

1 - Distribution discontinue :



ou



vide

Support isolant

$$q = \sum q_i$$

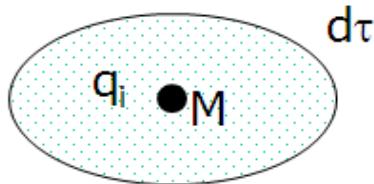
2 - Concept de distribution continue de charges :

- **linéique** : distribuée continûment sur une ligne
- **surfacique** : distribuée continûment sur une surface d'épaisseur nulle
- **volumique** : distribuée continûment dans un volume

Les différentes distributions continues de charge

a - Distribution volumique de charge

- A notre échelle d'observateur, un petit volume $d\tau$ de matériau entourant un point M contient un très grand nombre N de charges élémentaires q_i .
- La charge dq contenue dans $d\tau$ est égale à :



$$dq = \sum_{i=1}^N q_i$$

- On définit :
r : densité volumique de charge en Coulomb/m³

continue en tout point M de l'espace, telle que :

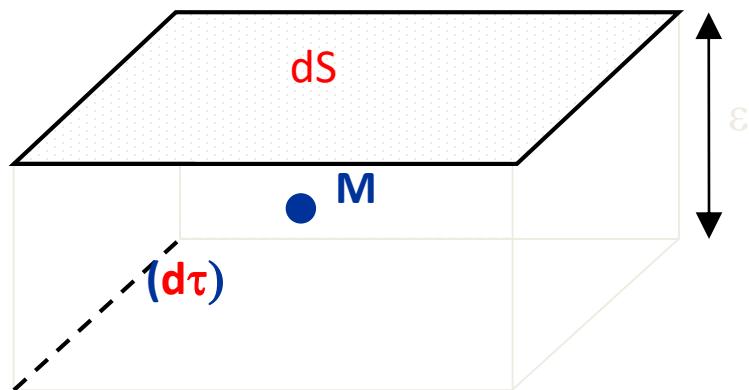
$$dq = \rho(M) d\tau$$

- La charge totale Q contenue dans un volume t fini est alors :

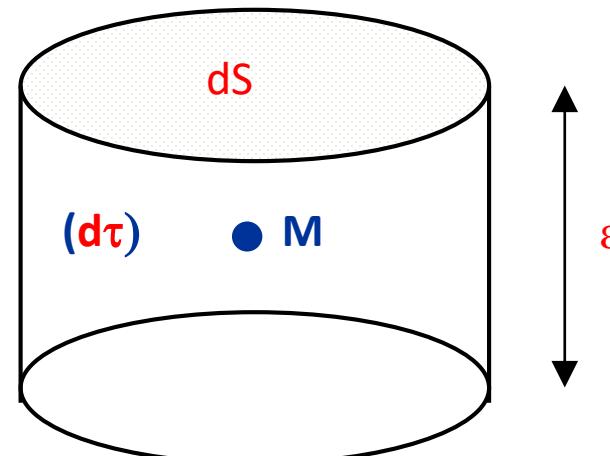
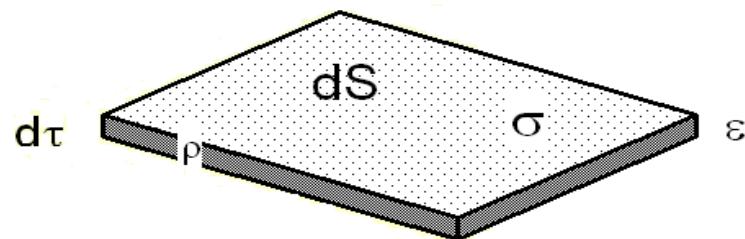
$$Q = \iiint_{(\tau)} \rho(M) d\tau$$

Notions de distributions surfacique et linéique de charge

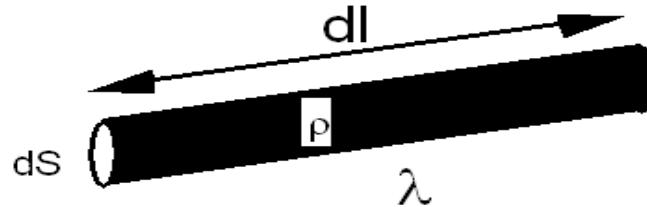
- Considérons un volume $d\tau$ de matériau entourant un point M et chargé avec une densité volumique de charge ρ sous la forme d'un cylindre ou d'un parallélépipède de section dS et d'épaisseur ε



Épaisseur ε tend vers 0 :
concept de **surface chargée**



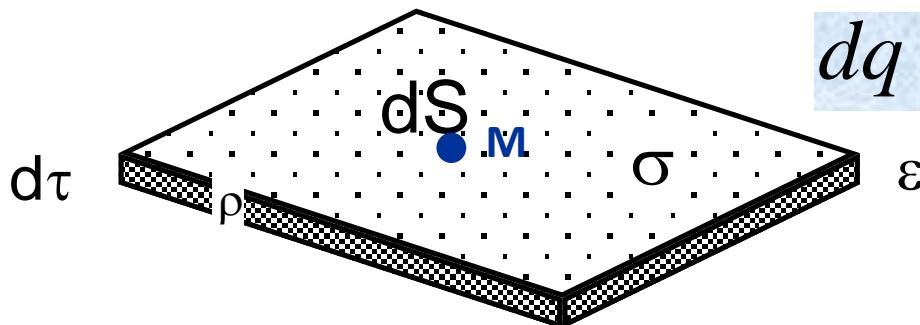
Section dS tend vers 0 :
concept de **ligne chargée**



Notions de distributions surfacique et linéique de charge

b - Distribution surfacique de charge

- Si le volume chargé a une épaisseur très faible, on peut alors considérer une surface chargée.



$$dq = \rho d\tau = \rho dS \varepsilon = (\rho \varepsilon) dS$$

$$\sigma = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\rho \varepsilon)$$

- On définit :
 σ : densité surfacique de charge en Coulomb/m²

continue en tout point M de la surface

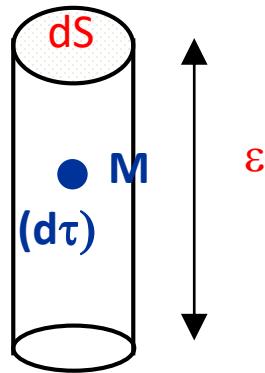
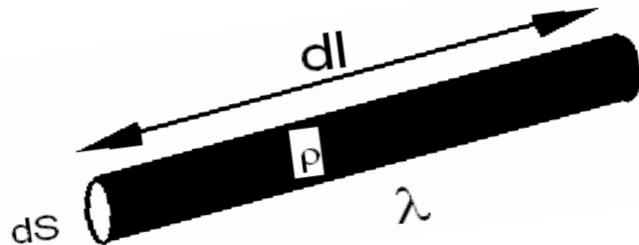
- La charge totale Q contenue sur la surface (S) de dimensions finies est alors :

$$Q = \iint_{(S)} \sigma ds$$

Notions de distributions surfacique et linéique de charge

c - Distribution linéique de charge

- Si le volume chargé a une section très faible, on peut alors considérer une distribution linéaire chargée (fil).



$$dq = \rho d\tau = \rho dS dl \\ = (\rho dS) dl$$

$$\lambda = \lim_{dS \rightarrow 0} (\rho dS)$$

- On définit :
 λ : densité linéique de charge en Coulomb/m

continue en tout point M du fil

- La charge totale Q contenue dans le fil (C) de longueur finie est alors :

$$Q = \int_{(C)} \lambda dl$$

Les distributions continues de charge

Remarque importante

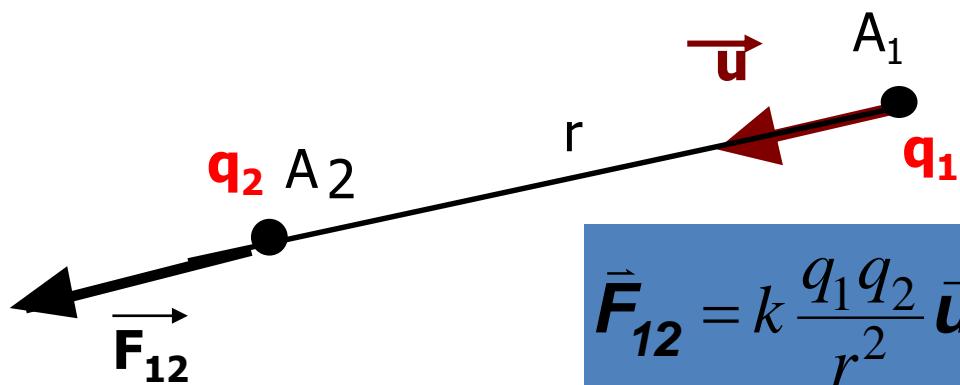
- Seule la distribution **volumique** de charges a une signification physique.
- Les charges **ponctuelles** et les distributions **surfaciques** et **linéiques** n'ont pas d'existence physique réelle
 - une surface a toujours une épaisseur si petite soit-elle
 - une ligne a toujours une section si petite soit-elle.

Conséquences :

Pour ces dernières distributions, il ne sera pas possible de décrire les grandeurs électrostatiques au niveau des charges.

Intéractions entre charges ponctuelles – Forces électrostatiques – Loi de Coulomb

Loi de Coulomb



$$r = A_1 A_2$$

\vec{u} vecteur unitaire tel que :
 $\vec{A}_1 \vec{A}_2 = r \vec{u} = \vec{r}$

avec $k = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} = 9 \times 10^9$

Loi de Coulomb

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}$$

avec

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \times 10^9} = 8,85 \times 10^{-12} F/m$$

dans le vide
ou l'air sec

Permittivité
diélectrique du vide

$$\epsilon_0 \mu_0 C^2 = 1$$

Loi de Coulomb

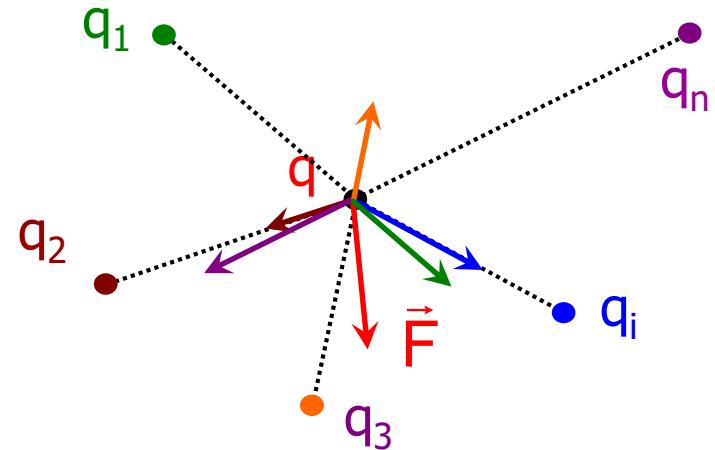
- ★ unités: $F(N) = k \frac{q_1(C) \cdot q_2(C)}{r^2(m^2)}$
- ★ La loi de Coulomb est valable pour $r > 10^{-12} m$.
- ★ \vec{F} est une force électrostatique dirigée suivant la droite (q_1q_2)

→ Principe de superposition

→ q_1, q_2, \dots, q_i charges ponctuelles agissant sur la charge q .

$$\vec{F}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_i}{r_i^2} \vec{u}_i$$

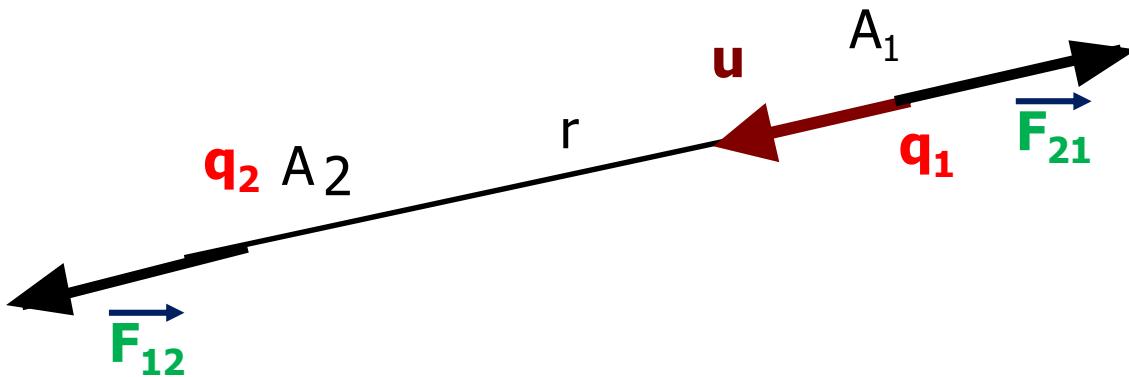
$$\boxed{\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{qq_i}{r_i^2} \vec{u}_i}$$



→ la force de Coulomb obéit au principe de superposition.

Intéractions entre charges ponctuelles – Forces électrostatiques – Loi de Coulomb

Principe de l'action et de la réaction



$$\vec{r} = \vec{A}_1 - \vec{A}_2$$

\vec{u} vecteur unitaire tel que :

$$\vec{\vec{A}_1 - \vec{A}_2} = \vec{r} \vec{u} = \vec{r}$$

Force exercée par q_2 sur q_1 :

$$\vec{F}_{21} = -\frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u} = -\vec{F}_{12}$$

- ★ \vec{F} obéit au principe de l'action et de la réaction.

Intéractions entre charges ponctuelles – Forces électrostatiques – Loi de Coulomb

Analogie force électrostatique – force de gravitation

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{u}$$

$$F_{12} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{u} = -F_{21}$$

- \mathbf{u} étant le vecteur unitaire dirigé du corps (1) vers le corps (2)
- l'intensité du champ varie comme $1/r^2$
- La force d'interaction électromagnétique est beaucoup *plus intense* que la force *gravitationnelle* - Exemple = proton – électron

$$F_{Coulomb} = 0,82 \times 10^{-7} \text{ N}$$

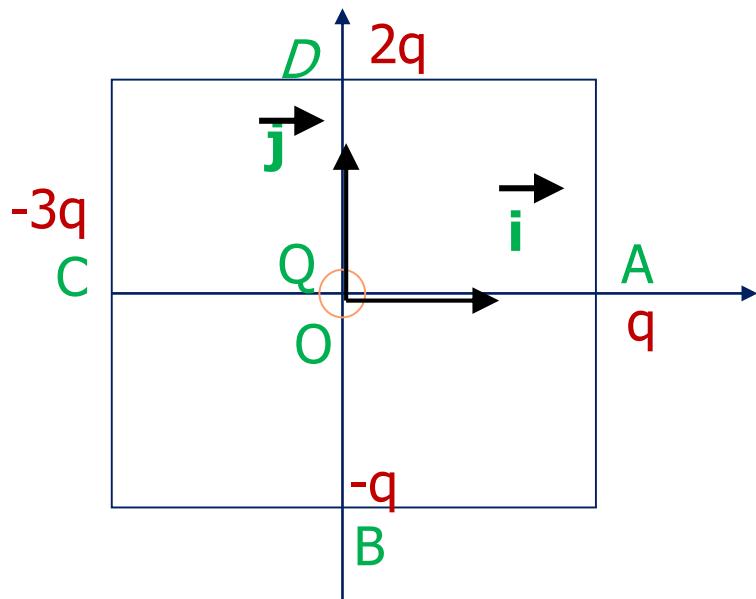
$$F_{Newton} = 3,6 \times 10^{-34} \text{ N}$$

- une *attraction* ou une *répulsion* / une *attraction* uniquement

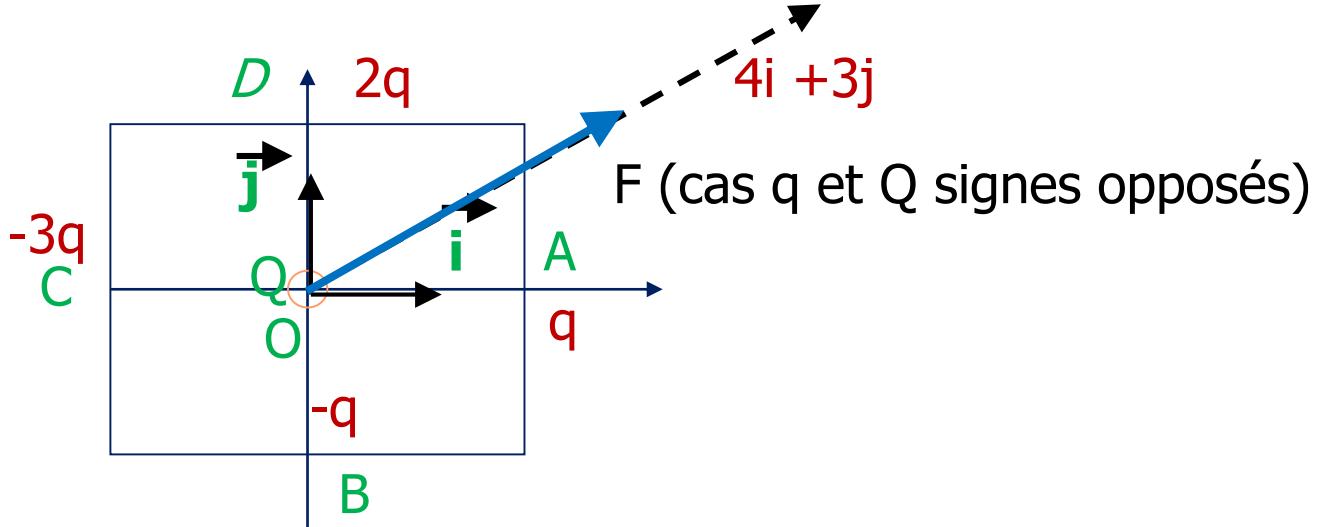
Exercice d'application

On dispose les charges q , $-q$, $-3q$ et $2q$ aux points respectifs $A(a, 0)$, $B(0, -a)$, $C(-a, 0)$ et $D(0, a)$.

On appelle \mathbf{i} et \mathbf{j} les vecteurs unitaires des axes.



- 1) Quelles sont les coordonnées et le module de la force qui s'exerce sur la charge Q placée en $O(0, 0)$?
- 2) Même question mais pour une charge $-Q$? et pour une charge $5Q$?



1) Soit \mathbf{F}_A la force exercée par la charge q placée en A sur Q en O

$$\mathbf{F}_A = -k \frac{Qq}{a^2} \mathbf{i} \text{ avec } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9$$

$$\mathbf{F}_B = k \frac{Qq}{a^2} \mathbf{j} ; \mathbf{F}_C = -k \frac{3qQ}{a^2} \mathbf{i} ; \mathbf{F}_D = k \frac{2qQ}{a^2} \mathbf{j}$$

$$\mathbf{F}_A + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_C + \mathbf{F}_D = -k \frac{Qq}{a^2} (4\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) \quad F = \|\mathbf{F}\| = 5k \frac{|qQ|}{a^2}$$

2) pour une charge $-Q$, $\mathbf{F}' = -\mathbf{F}$ et pour $5Q$, $\mathbf{F}'' = 5\mathbf{F}$