

# Chapitre 1

## Électrification – Interactions entre charges – Loi de Coulomb

1.1 Particule et charge électrique élémentaires

1.2 Constitution de la matière (atomistique)

1.3 Electrification des matériaux

1.4 Distributions de charges

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

# Électrostatique : introduction et historique



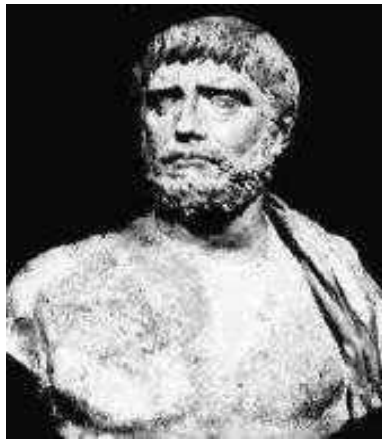
Domaine de la physique qui étudie :

- 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

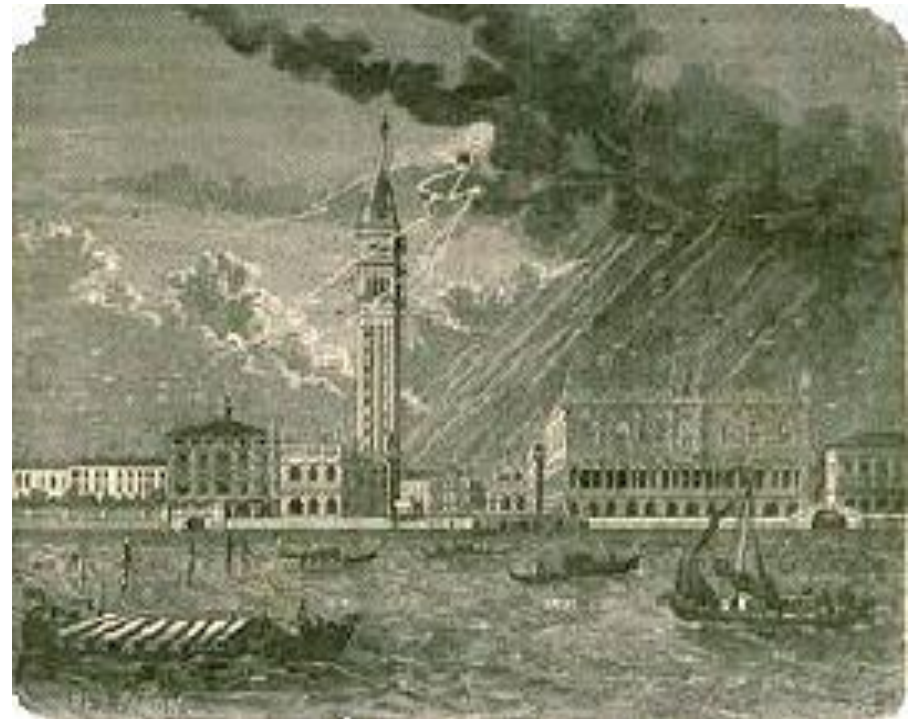
# Un peu d'histoire...

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'électrifier 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 ( $\text{Na}^+$ )
  - ou  $q < 0$  : électron, anion ( $\text{Cl}^-$ )
  - ou  $q = 0$  : neutron,  $\text{NaCl}$

Nuage électronique (-)

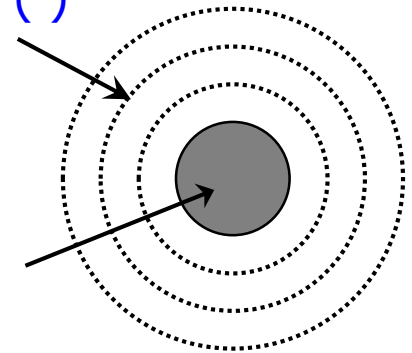
$q$  : quantifiée

mais toujours :  $q = N.e$

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

charge de l'électron

Noyau (+)  
très stable



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

La charge électrique d'un corps est quantifiée

# 1.2 Structure électronique de la matière

## - noyau :

A particules, dense, chargé +

Z protons  $m_p = 1.672.10^{-27} \text{ kg}$

$q = +e = 1.602.10^{-19} \text{ C}$

A - Z neutrons :  $m_n = 1.674.10^{-27} \text{ kg}$

$q = 0$

Z : numéro atomique

A : masse atomique

Z = numéro atomique

A = nombre de masse



17 Cl  
35

## - électrons :

$m_e = 9.109.10^{-31} \text{ kg}$

$q = -e = - 1.602.10^{-19} \text{ C}$

*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 -

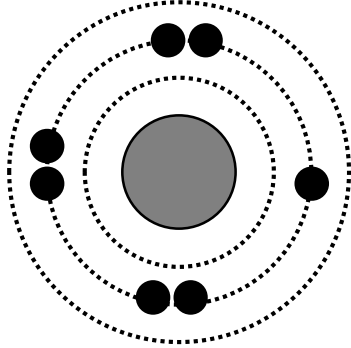
ajout d 'e - : ions -

enlèvement d 'e - : ions +

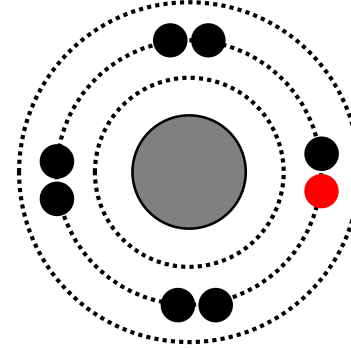
# 1.2 Structure électronique de la matière

## Couches de valence

### ★ élément électronégatif



+ 1 e<sup>-</sup>

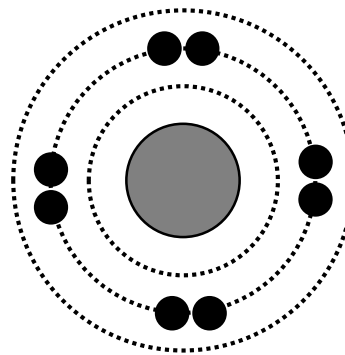
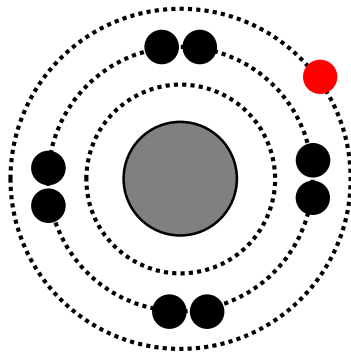


<sup>9</sup>F : 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>5</sup>

ion fluor négatif

F<sup>-</sup>

### ★ élément électropositif



+ 1 e<sup>-</sup>

<sup>11</sup>Na : 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup> 3s<sup>1</sup>

ion sodium positif

Na<sup>+</sup>

# 1.2 Structure électronique de la matière

## Classification des différents matériaux

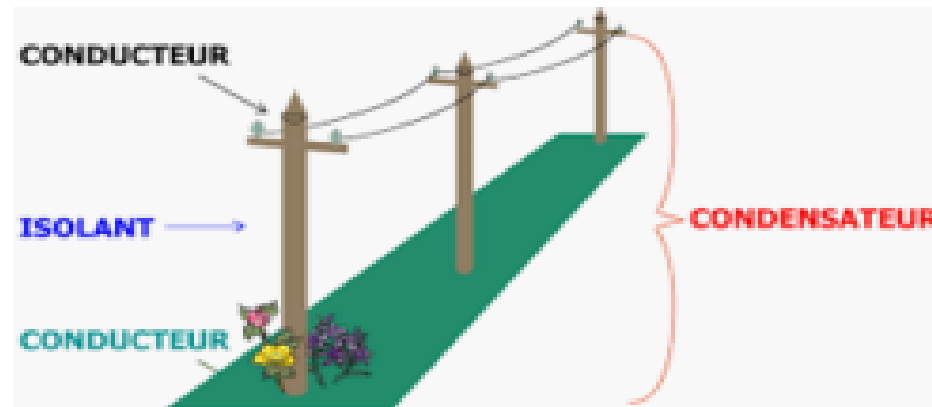
- ★ Un **conducteur** possède des charges électriques qui peuvent se déplacer: électrons libres.

2 types de conducteurs :

métaux :  $e^-$  mobiles / état solide ou liquide

électrolytes : 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. Electrification par frottement:

Frottement  $\Rightarrow$  électrification (*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):

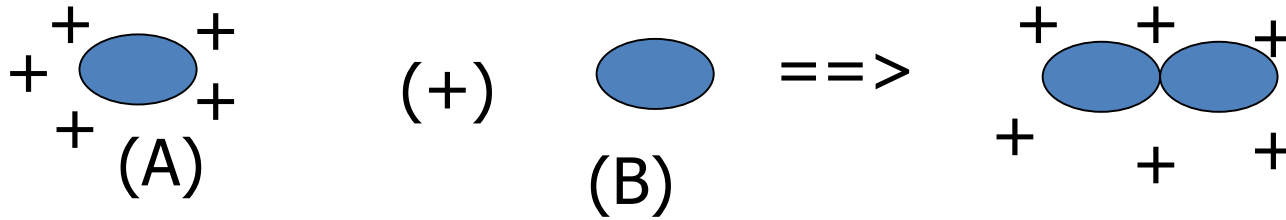
- électrification localisée

$\Rightarrow$  2 charges de *même signe* se repoussent  $\Rightarrow$  *répulsion*

$\Rightarrow$  2 charges de *signe différent* s'attirent  $\Rightarrow$  *attraction*

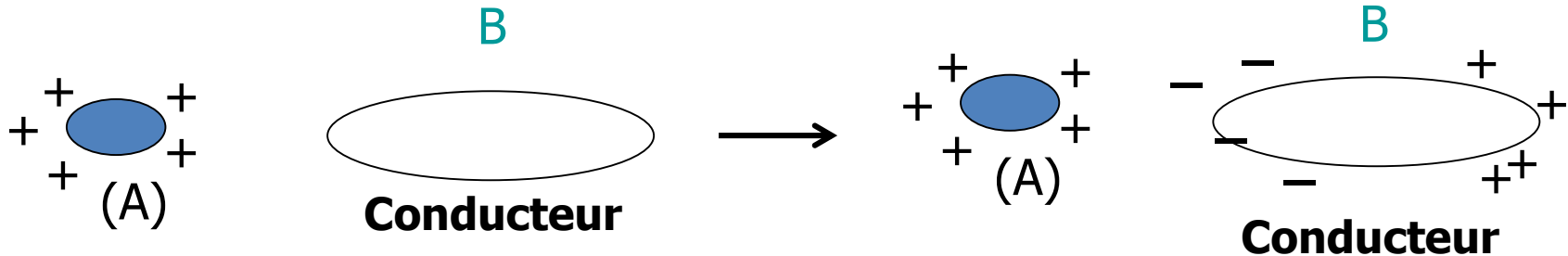
## ★ b - électrisation par contact

- 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

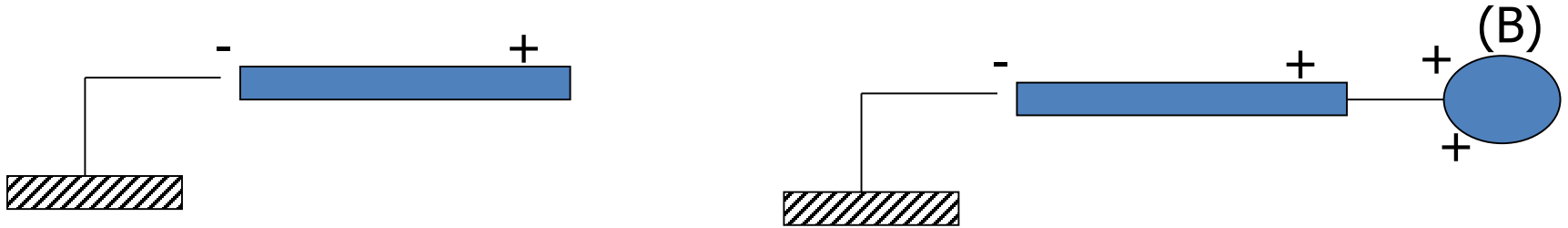


Les charges + de (A) attirent les charges - et repoussent les charges + de (B).

→ *forces électrostatiques*

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

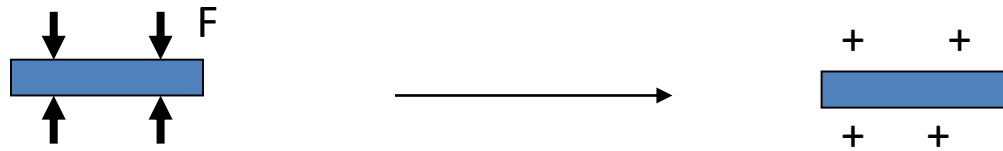
## d - électrisation par liaison avec une source électrique



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

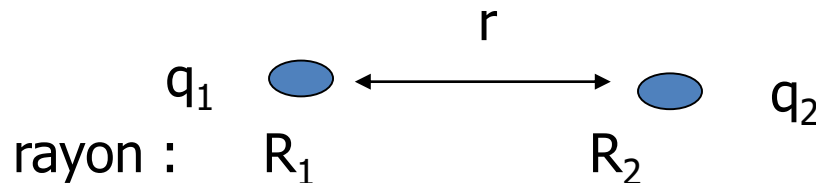
*une charge occupe toujours un certain volume (même un  $e$  !!!)*

*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,

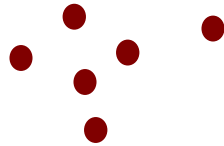
– On peut assimiler cette charge à une **charge ponctuelle, localisée en un point de l'espace**



si  $R_1, R_2 \ll r$  : --> charges ponctuelles

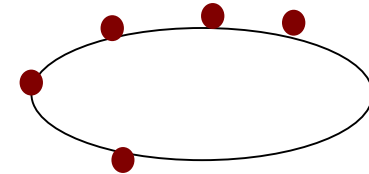
## ➤ Charge d'un corp de dimension finie

### 1 - Distribution discontinue :



vide

ou



Support isolant

$$q = \sum q_i$$

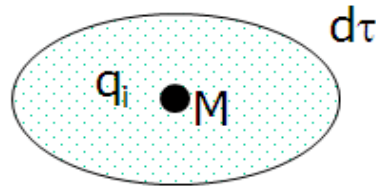
### 2 - Concept de distribution continue de charges :

- **linéique** : distribuée continûment sur une ligne
- **surfactive** : 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 :

**$\rho$  : densité volumique de charge en Coulomb/m<sup>3</sup>**

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

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

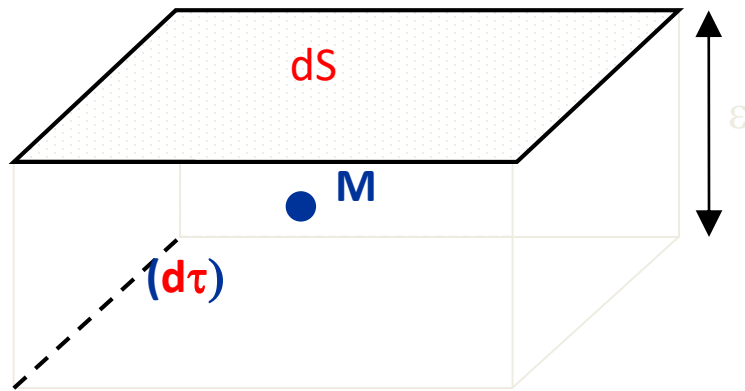
- La charge totale  $Q$  contenue dans un volume  $t$  fini est alors :

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

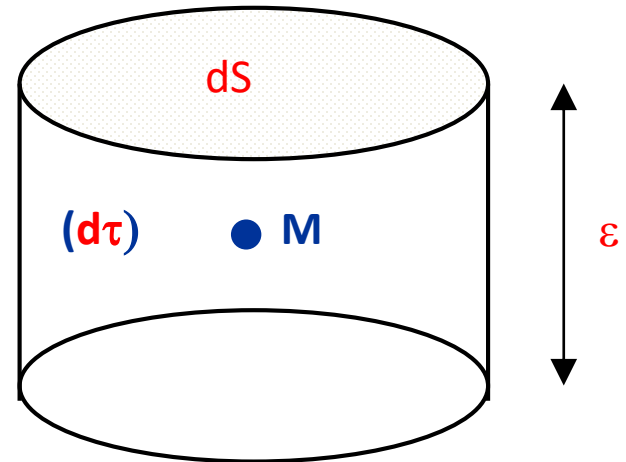
# Notions de distributions surfacique et linéique de charge

➤ Considérons un volume  $d\tau$  de matériau entourant un point M et chargé avec une densité volumique de charge  $\rho$

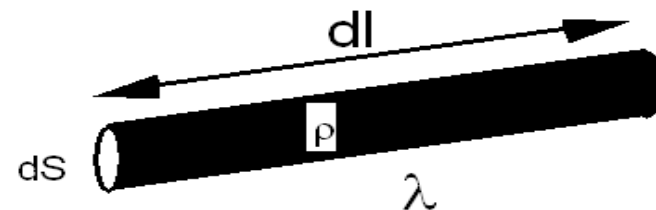
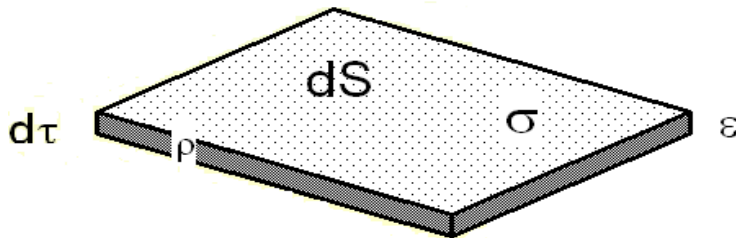
sous la forme d'un cylindre ou d'un parallélépipède de section  $dS$  et d'épaisseur  $\varepsilon$



Épaisseur  $\varepsilon$  tend vers 0 :  
concept de **surface chargée**



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

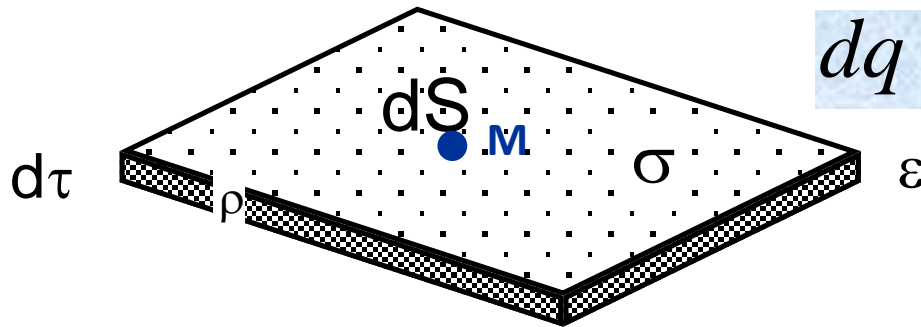




# Notions de distributions surfacique et linéique de charge

## 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 :

**$\sigma$  : densité surfacique de charge en Coulomb/m<sup>2</sup>**

continue en tout point M de la surface

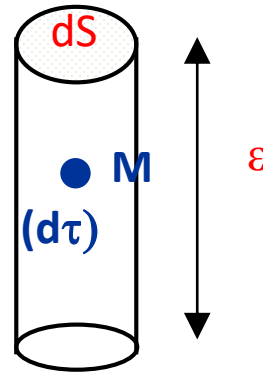
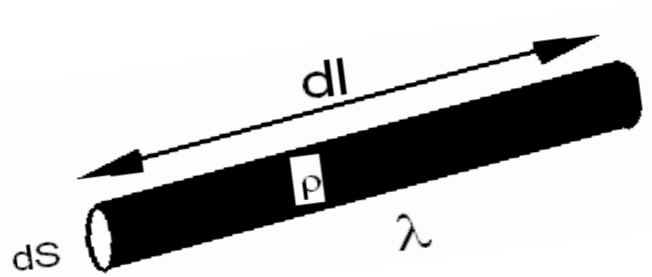
- La charge totale Q contenue sur la surface (S) de dimensions finies est alors :

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

# 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 :

**$\lambda$  : 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

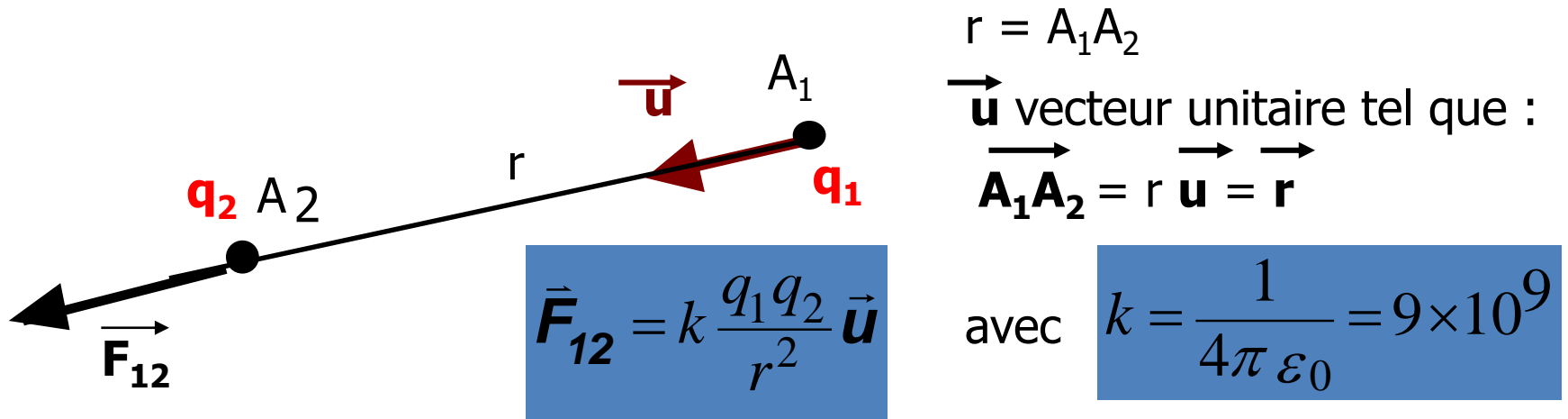
- Seule la distribution **volumique** de charges a une signification physique.
- Les charges **ponctuelles** et les distributions **surfaiques** et **linéiques** n'ont pas d'existence physique réelle
  - une surface a toujours une épaisseur si petite soit-elle
  - une ligne a toujours une section si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



## 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

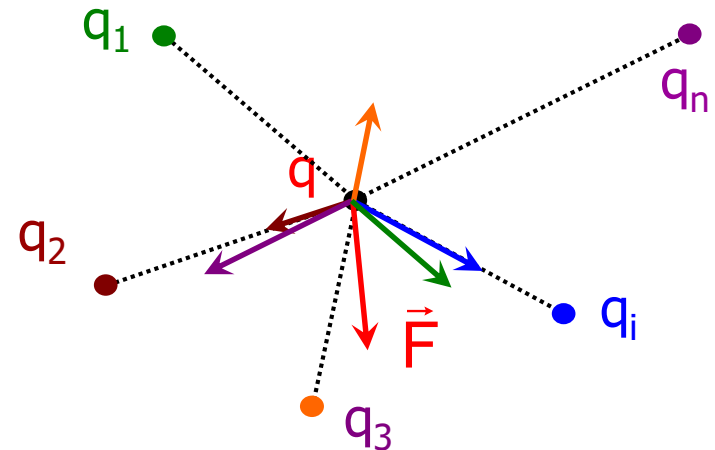
- ★ unités:  $F(N) = k \frac{q_1(C) \cdot q_2(C)}{r^2(m^2)}$
- ★ La loi de Coulomb est valable pour  $r > 10^{-12} \text{ m}$ .
- ★  $\vec{F}$  est une force électrostatique dirigée suivant la droite  $(q_1 q_2)$

## → Principe de superposition

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

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

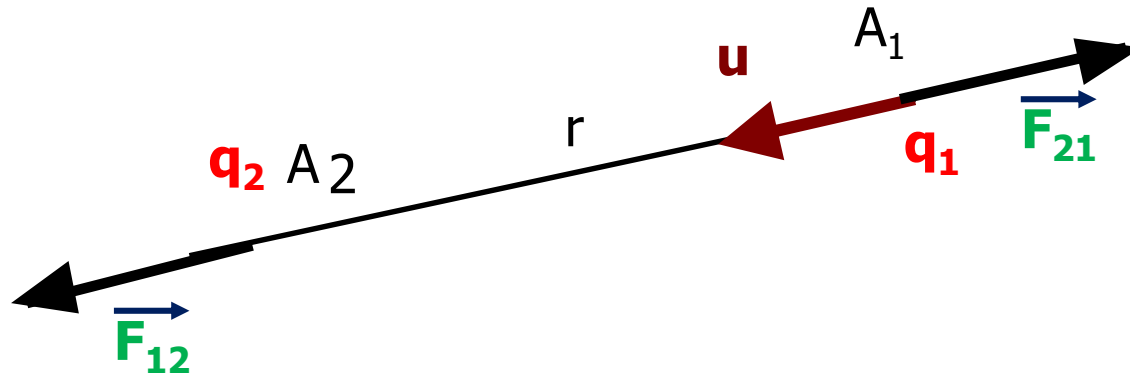
$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{qq_i}{r_i^2} \vec{u}_i$$



→ 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



$$r = A_1 A_2$$

$\mathbf{u}$  vecteur unitaire tel que :

$$\overrightarrow{A_1 A_2} = r \overrightarrow{u} = \overrightarrow{r}$$

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*

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

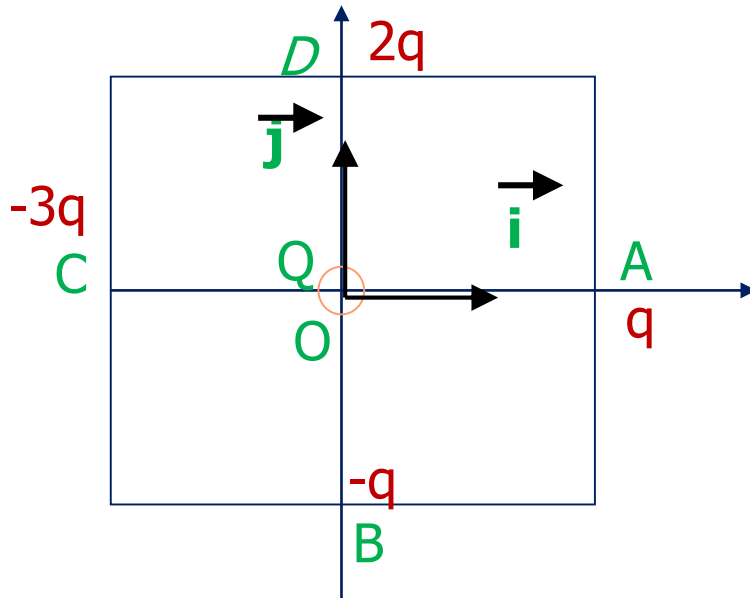
$$F_{Newton} = 3,6 \times 10^{-34} \text{ N}$$

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

# Exercice d'application

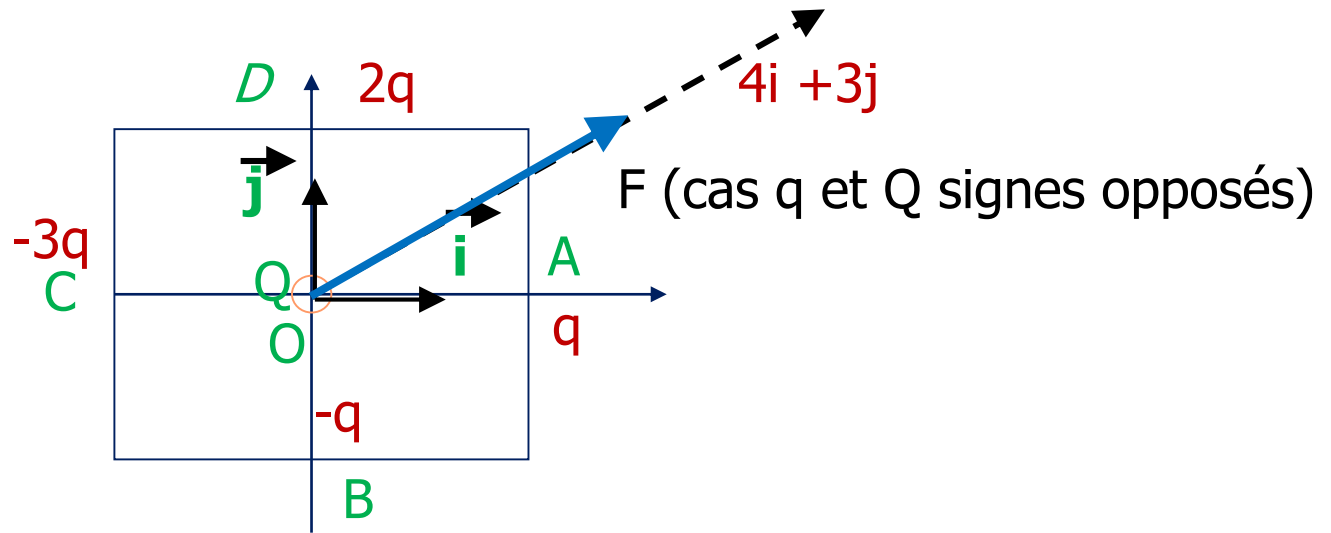
On dispose les charges  $q$ ,  $-q$ ,  $-3q$  et  $2q$  aux points *respectifs* A  $(a, 0)$ , B  $(0, -a)$ , C  $(-a, 0)$  et D  $(0, a)$ .

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  $5Q$ ,  $\mathbf{F}'' = 5\mathbf{F}$