Cours SVT_S2
Chapitre-6:
L'électromagnétisme: électrostatique

Pr. Farida Fassi
Faculté des Sciences de Rabat

Introduction: L’électromagnétisme

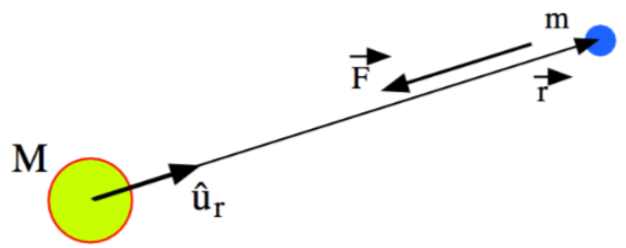
- **Introduction: L’électromagnétisme**
- L’électromagnétisme est la branche de la physique qui étudie:
  - **l’interaction des particules dotées d’une charge électrique et de l’évolution du champ électromagnétique qu’elles génèrent.**
- **L’électromagnétisme est habituellement étudiée en deux parties:**
  - **l’électricité et le magnétisme.**
- **Pourquoi l’électromagnétisme**
  - L’étude de l’électromagnétisme est très importante en physique, car l’électricité et le magnétisme sont présents dans presque tous les phénomènes qui nous entourent: Boussole, Pile électrochimique et batterie, Transport d’énergie, Télécommunication, Instruments Médicaux, Lumière, etc

L´ électrostatique: definition

- L'électrostatique : c'est l'interaction qui s'exerce entre des corps chargés
  - ***Si les corps chargés:***
    - **au repos** ➡ **électrostatique**
    - **en mouvement uniforme** ➡ **magnétostatique**
    - **en mouvement quelconque** ➡ **électromagnétique**

La force électrostatique

- **Parallèle entre la force de gravitation et la force électrostatique**
  - Par sa présence, **une masse M** est la cause d'une force de gravitation agissant sur une **autre masse m**
  - **M est donc la source de l'interaction gravifique**, tout comme l'est la masse m (3°eme loi de Newton)



$$\boxed{\vec{F}_{grav} = -G\,\frac{m\,M}{r^2}\,\hat{u}_r}$$

- La force électrostatique possède des caractéristiques similaires :
  - la cause de la force est ici des charges, dont l'unité est le Coulomb (C)

$$\vec{F}_{q'} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{Q.q'}{r^2}\,\vec{u}$$

La charge électrique

➢Constitution de la matière

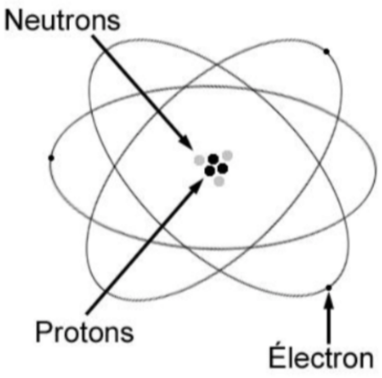
matière → atomes

1 atome → Z électrons + 1 noyau

1 noyau → (Z protons + A – Z neutrons)

	charge	Masse
Electron	$-e = -1{,}6\ 10^{-19}$ C	$9{,}1\ 10^{-31}$ kg
Proton	$+e = +1{,}6\ 10^{-19}$ C	$1{,}672\ 10^{-27}$ kg
Neutron	0	$1{,}675\ 10^{-27}$ kg

Atome



Taille de l'atome :	$\approx 10^{-10}$ m
Taille du noyau :	$\approx 10^{-15}$ m
Masse du noyau :	$\approx 99{,}97\ \%$ masse de l'atome

- **Charge totale d'un atome : nulle**
  - Si un électron est arraché (ou rajouté) à un atome, on a un ion.
  - à l'échelle macroscopique, la "charge électrique" portée par un corps correspond à un manque ou à un excès d'électrons.
  - Les charges mobiles sont, le plus souvent, des électrons.
  - Toute charge Q est un multiple entier de la charge de l'électron : $Q = \pm\ n.e$ (L'unité est le Coulomb (C).)

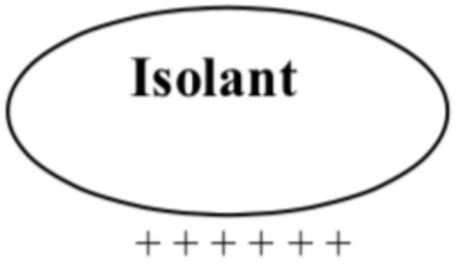
➢La charge électrique:

- ➢**La charge électrique est la propriété de la matière qui produit les phénomènes électricité et magnétisme .**
- ➢Toutes les particules qui possèdent une charge électrique peuvent subir des forces électriques et peuvent subir également des forces magnétiques si elles sont en mouvement.

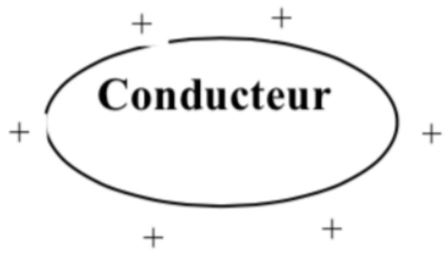
Conducteur et isolant

Definition:

- **Isolant** ou diélectrique : les e^- sont fortement liés aux atomes, il n'y a pas d'e^- libre.
- Lorsque une charge électrique est crée, elle ne peut pas se déplacer (bois, verre, papier ...).



- **Conducteur** (liaison métallique) : toute charge créé sur un matériau se répartit sur la surface.
- Les e^- libres permettent le déplacement de cette charge.



- **Remarques** :
- **Les gaz** sont formés de molécules neutres, ce sont **des isolants**. Les gaz ionisés sont conducteurs.

Répartition des charges : différentes distributions de charges

- **Charges ponctuelles**:
  - Dimensions négligeables par rapport aux distances entre les charges.
- **Distributions continues de charges:**

- **Distribution linéique** : la charge Q est répartie sur un fil de longueur L avec une densité linéique

$$\boxed{\lambda = \frac{dq}{dl} \text{ , } \lambda \text{ en C/m .}}$$

Charge totale sur le fil :

$$\boxed{dq = \lambda.dl \rightarrow Q = \int dq = \int \lambda.dl}$$

$$\text{si } \lambda = \text{cte alors } Q = \lambda.L$$

- **Distribution surfacique** : la charge Q est répartie sur une surface S avec une densité surfacique

$$\boxed{\sigma = \frac{dq}{ds}} \text{ , } \sigma \text{ en C/m}^2$$

La charge totale sur la surface :

$$\boxed{dq = \sigma.ds \rightarrow Q = \int dq = \int \sigma.ds}$$

$$\text{si } \sigma = \text{cte alors } Q = \sigma.S$$

- **Distribution volumique** : la charge Q est répartie dans un volume V avec une densité volumique

$$\boxed{\rho = \frac{dq}{dv} \text{ , } \rho \text{ en C/m}^3}$$

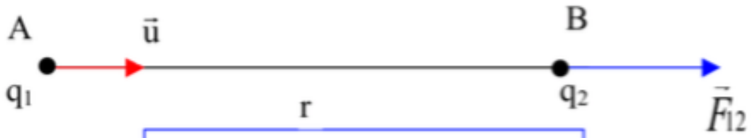
La Charge totale dans le volume V :

$$\boxed{dq = \rho dv \rightarrow Q = \int dq = \int \rho.dv}$$

$$\text{si } \rho = \text{cte alors } Q = \rho.V$$

Force électrique : Loi de Coulomb

- la loi de Coulomb exprime la force électrostatique s'exerçant entre:
  - deux charges ponctuelles q_1 et q_2, placées à la distance r
  - **L'interaction est caractérisée par une intensité et une direction**



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

c'est le produit $q_1 q_2$ qui donne le sens de $\vec{F}_{12}$

$$\vec{F}_{12} = K.\frac{q_1 q_2}{r^2}.\vec{u}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

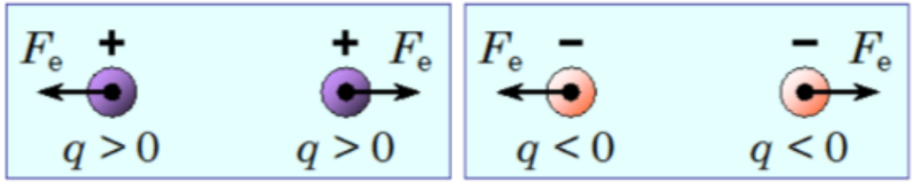
$$\vec{F}_{21} = -\ \vec{F}_{12}$$

$\vec{F}_{12}$ est la force produite par q_1 et qui agit sur q_2 :

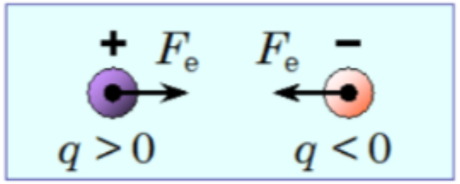
$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

ε_0 est la permittivité du vide : $1/\,4\pi\,\varepsilon_0 = 9.10^9$ SI

Répulsion charges de signes semblables



Attraction charges de signes opposés



Unités : F en Newton, q_1 et q_2 en Coulomb, r en mètre,

Intensités relatives de l'électrostatique et de la gravitation

Cas de 2 électrons en interaction :

- Force d'attraction : $F_g = G\dfrac{m_e{}^2}{r^2}$, $G = 6{,}67.10^{-11}\,\mathrm{SI}$,

- Force électrostatique : $F_e = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{e^2}{r^2}$

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 G}\frac{e^2}{m_e{}^2}$$

- **La force d'attraction est négligeable devant la force électrostatique**

$e = 1{,}610^{-19}\,\mathrm{C}$, $m_e = 9{,}1.10^{-31}\,\mathrm{Kg} \rightarrow \dfrac{F_e}{F_g} = 4.10^{42} \rightarrow \boxed{F_e = 4.10^{42} \times F_g}$

Force électrostatique: Principe de superposition

Si maintenant, en plus des deux charges électrique q_1 et q_2 dans leurs positions respectives, on ramène une troisième charge q_3 plus près. La force électrostatique agissant sur q_3 de la part de deux charges q_1 et q_2 est la somme vectorielle des deux forces $\vec{F}_{1/3}$ (la force appliquée par la charge q_1 sur q_3) et $\vec{F}_{2/3}$ (la force appliquée par la charge q_2 sur q_3), telle que :

$$\vec{F}_{1+2/3} = \vec{F}_{1/3} + \vec{F}_{2/3}$$

Un ensemble de charges q_1, q_2, q_3 … q_n exercent sur une charge q des forces :

$$\vec{F}_i = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q\,q_i}{r_i^2}\vec{u}_i$$

la résultante des forces exercées sur q sera :

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_i^2}\vec{u}_i$$

La loi de Coulomb

- Nous avons vu que deux charges ponctuelles q_1 et q_2 exercent une influence l'une sur l'autre. La force qui s'exerce sur q_2 due à q_1 est :

$$\boxed{\vec{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} . \vec{u}_{12}}$$

1 - La loi de Coulomb s'applique à **<u>2 charges ponctuelles</u>**

2 - La loi de Coulomb s'applique à 2 charges ponctuelles placées **<u>dans le vide</u>**

$\Rightarrow$ Un milieu matériel va modifier la valeur de ε_0 : ε_0:est la permittivité du vide

Air ≈ Vide	Eau	Verre	Silicium
ε_0	$79\ \varepsilon_0$	$9\ \varepsilon_0$	$12\ \varepsilon_0$

Champ électrostatique dans le vide

Champ électrostatique dans le vide

- **Définition:**
  - **on considère de nouveau le système de 2 charges q_1, q_2**

- on exprime $\vec{F}_{12}$ à l'aide d'un nouveau vecteur :

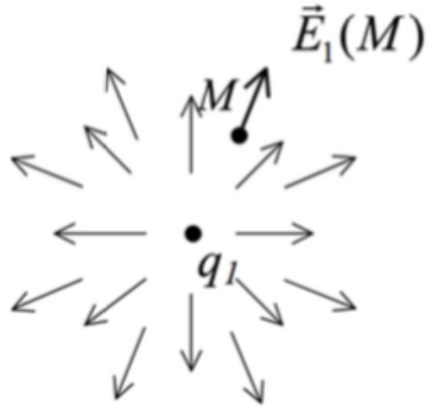
$$\boxed{\vec{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0\, r^2}.\vec{u}_{12} = q_2 . \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0\, r^2}.\vec{u}_{12} = q_2 \vec{E}_1}$$

$\vec{E}_1$ représente le champ électrique créé par la charge q_1

$$\boxed{\vec{E}_1 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0\, r^2}.\vec{u}_{12}}$$

- **La charge q_1 perturbe son environnement est :**

.le champ $\vec{E}_1$ caractérise cette perturbation



Si on place une charge q en M elle subit la force :

$$\vec{F} = q\vec{E}_1(M)$$

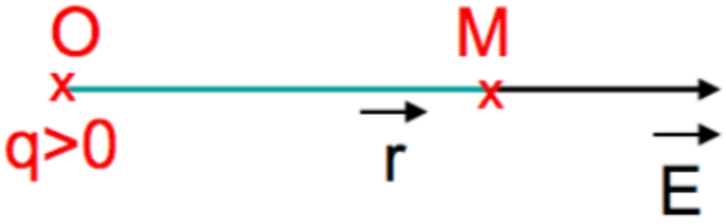
Si $q > 0$ $\vec{E}$ et $\vec{F}$ ont même direction et même sens

si $q < 0$ $\vec{E}$ et $\vec{F}$ ont même direction et de sens opposés.

Champ électrostatique crée par des charges ponctuelles

Champ crée par une charge ponctuelle

➢ **Définition du champ électrostatique créé par la charge q en un point M:**



➢ Une charge q placé en 0 crée un champ E .

➢ Plaçons en M une charge q'.

➢ Elle est soumise la force :

$$\boxed{\vec{F} : \vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq'}{r^2}\vec{u} = q'\vec{E}}$$

$\vec{u}$ vecteur unitaire de direction OM
$\vec{r} = r\,\vec{u}$, r distance OM

d'où :

$$\boxed{\vec{E}\,(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q}{r^2}\,\vec{u}}$$

champ crée en M par q

si $r \to \infty$ $\vec{E} \to 0$,

si $r \to 0$ la charge n'est plus considérée ponctuelle.

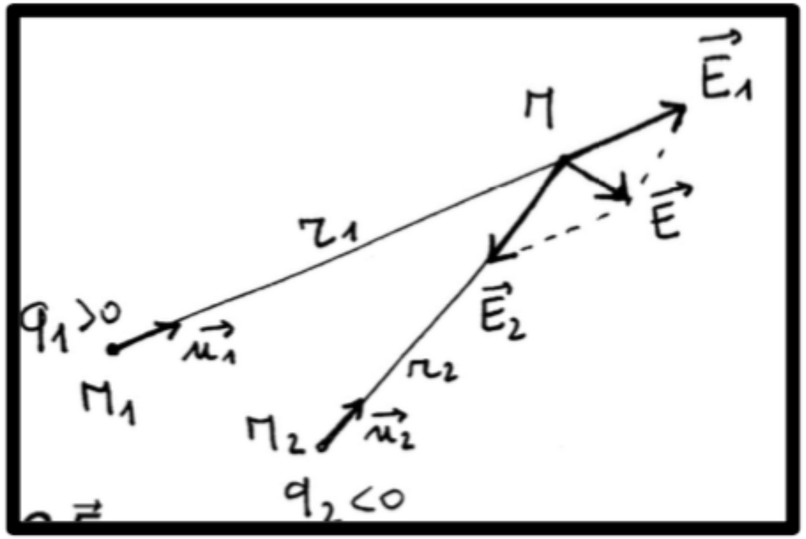
Unité SI de champ électrostatique: Volt/mètre (V/m)

Champ crée par plusieurs charges ponctuelles

- On consider un ensemble de charges $q_1, q_2, q_3, ..., q_n$
  - placées en des points $M_1, M_2, ..., M_n$

- **Chaque charge q_i placée en M_i, crée en M un champ E_i**

Distribution de charges q_i en M_i ($MM_i = r_i$), vecteur unitaire $\vec{u}$



Le champ résultant en M sera:

$$\vec{E} = \sum_i \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u_i} \right)$$

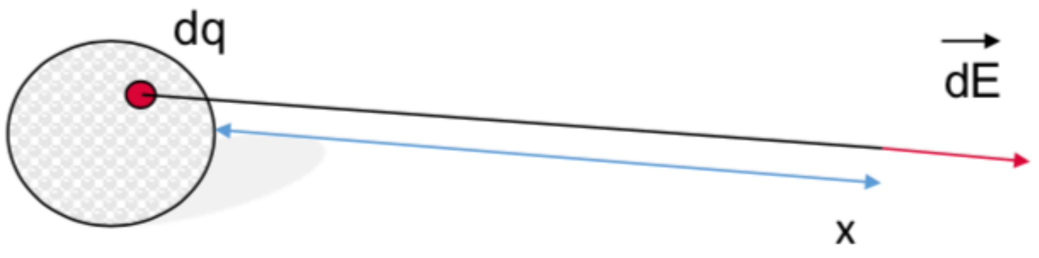
Champ électrostatique crée par une distribution de charges

Champ électrique produit par une distribution continue de charges

- Dans plusieurs situations, les champs électriques sont produits par une distribution de charges
  - Ex. : **des tiges, des sphères ou des plans chargés**
- **Comment calculer le champ électrique autour de ces objets en différents points de l'espace?**
- **Pour quelles raisons devons-nous calculer ces champs?**
  - Pour déterminer **la force électrique** exercée par ces champs sur des particules chargées et **prédire leurs mouvements** d'une part et d'autre part pour calculer **les différences de potentiel** en différents points autour de ces objets et prévoir ainsi les **effets électriques.**

Champ électrique produit par une distribution continue de charges

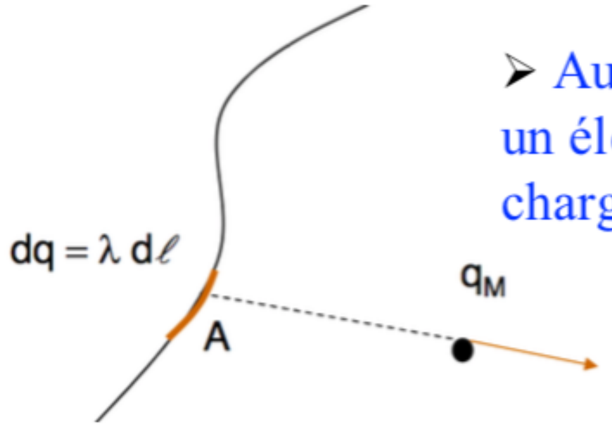
- **Pour trouver le champ électrique total nous devons procéder par calcul intégral car:**
  - Chacun des **éléments de charge dq** est considéré comme une **charge ponctuelle.**
  - **Chaque élément de charge produit un élément infinitésimal de champ $\overrightarrow{dE}$**



- **La valeur exacte du champ résultant sera la somme infinie , autrement dit, l'intégrale des champs de chacune des petites charges « dq » placées à différentes valeurs de « x »**
  - il faut faire la somme (l'intégrale) de tous les éléments dE, en tenant compte de la nature vectorielle du champ

Champ crée par une distribution de charge linéaire

- **Supposons que les charges se distribuent de manière continue sur une courbe.**



- Autour d'un point A de la distribution, un élément de longueur dl porte la charge $dq = \lambda.dl$

- **La force exercée par dq sur q_M est:**

$$\boxed{d\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_M dq}{r^2}\,\vec{u}}$$

- **$dq = \lambda.dl$ crée en M un champ**

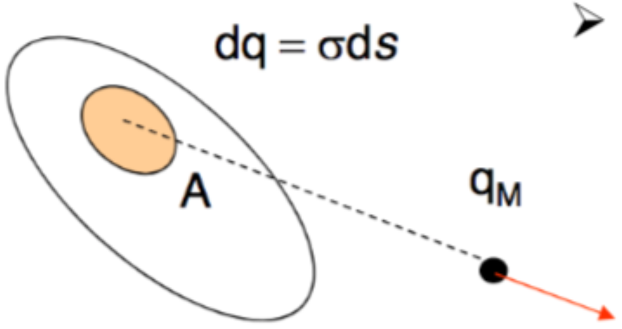
$$\boxed{d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda.dl}{r^2}\vec{u}}$$

- **Or** $\boxed{d\vec{F} = q_M d\vec{E}}$

$$\boxed{\vec{E} = \int \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda d\ell}{r^2}\,\vec{u}}$$

Champ électrostatique due à une distribution surfacique de charge

➢ **Supposons que les charges se distribuent de manière continue sur une surface.**



➢ Autour d'un point A de la distribution, un élément de surface ds porte la charge dq =σds

➢ **La force exercée par dq sur q_M est:**

$$\boxed{d\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_M dq}{r^2}\vec{u}}$$

➢ **dq =σds crée en M un champ**

$$\boxed{d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\sigma.ds}{r^2}\vec{u}}$$

➢ **Or** $\boxed{d\vec{F} = q_M d\vec{E}}$

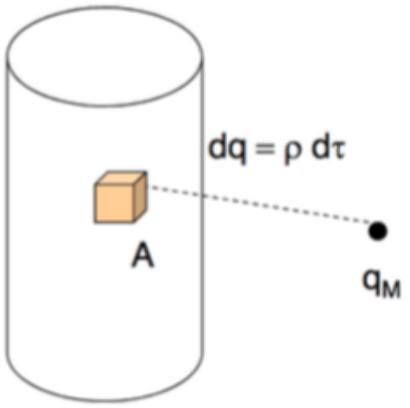
$$\boxed{\vec{E} = \iint \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\sigma ds}{r^2}\vec{u}}$$

➢ **Le champ crée par toutes les charges de la surface sera :**

$$\boxed{\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\iint_S \frac{\sigma \times ds}{r^2}\vec{u}}$$

Champ électrostatique due à une distribution surfacique de charge

- **Supposons que les charges se distribuent de manière continue à l'intérieur d'un volume (V).**



- Autour d'un point A de la distribution, un élément de volume dτ porte la charge dq =ρdτ

- **La force exercée par dq sur q_M est:**

$$\boxed{d\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_M dq}{r^2}\vec{u}}$$

- dq =ρdτ **crée en M un champ**

$$\boxed{d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}\vec{u}}$$

- **Or**

$$\boxed{d\vec{F} = q_M d\vec{E}}$$

$$\boxed{\vec{E} = \iiint \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\rho d\tau}{r^2}\vec{u}}$$

- **le champ crée par toutes les charges répartis dans le volume V:**

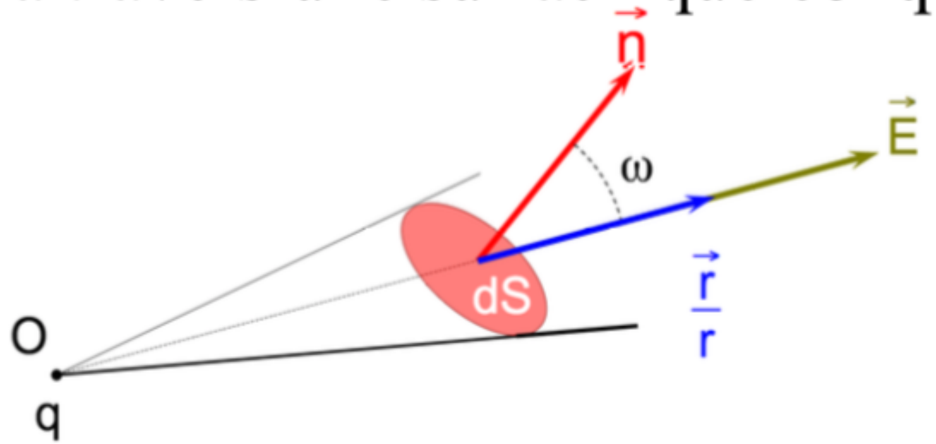
$$\boxed{\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\iiint_V \frac{\rho\times dv}{r^2}\vec{u}}$$

Théorème de Gauss

➢Notion de Flux

➢Flux du champ électrique à travers une surface quelconque

➢ **On considère une charge ponctuelle « q » en O et une surface élémentaire dS quelconque:**



Le flux élémentaire dϕ de $\vec{E}$ à travers la surface *dS* est défini par la relation :

$$\boxed{d\phi = \vec{E}.\vec{dS} = \vec{E}.\vec{n}\ dS}$$

A travers la surface entière S :

$$\boxed{\phi = \iint_S \vec{E}\ .\ d\vec{S}}$$

Théorème de Gauss

- **Le théorème de Gauss fait le lien entre**:
  - **le flux du champ électrique E et les sources de champ:**
    - il ne peut y avoir **de flux du champ E** à travers **une surface fermée** que si **la somme des charges contenues dans le volume défini par la surface fermée est non nulle.**

- **Enoncé du théorème de Gauss**
  - Le flux électrique sortant d'une surface fermée est égale au produit par $1/\varepsilon_0$ de la somme algébrique des charges intérieures. **il est indépendant de leurs position; il est indépendant des charges extérieurs.**

$$\boxed{\phi = \iint_{S\,fermée} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum q_{\text{int}}}{\varepsilon_0}}$$

Théorème de Gauss

- **Le principe de superposition permet de généraliser ce résultat à une distribution quelconque de charges :**

Le flux du champ électrique ***E*** à travers une surface fermée **quelconque** vaut $1/\varepsilon_0$ fois la charge contenue dans la surface :

$$\boxed{\oint_S \vec{E}.d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}}$$

$$\boxed{ou \quad \oint_S \vec{E}.d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_C \lambda.d\ell}$$

$$\boxed{ou \quad \oint_S \vec{E}.d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_S \sigma.dS}$$

$$\boxed{ou \quad \oint_S \vec{E}.d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_V \rho.dV}$$

- **Une surface est dite fermée lorsqu'elle délimite un volume.**
- **Le vecteur unitaire *n*, normale à la surface est alors orienté de l'intérieur vers l'extérieur du volume délimité par la surface.**

Application du théorème de Gauss

- **Le théorème de Gauss permet le calcul du champ E plus rapidement que la méthode directe. Pour cela Il faut :**
  - déterminer la symétrie de la distribution de charge,
  - choisir une surface fermée,
  - calculer le flux à travers la surface fermée,
  - appliquer le théorème de Gauss et en déduire le champ E .

• Symétrie cylindrique

➢ Dans une symétrie cylindrique, la distribution de charges est invariante dans toute translation parallèle à Oz et dans toute rotation θ autour de Oz.

En coordonnées cylindriques (ρ,θ,z) le champ électrostatique $\vec{E}$ est parallèle à $\vec{e}_\rho$ ne dépend que de ρ : $\vec{E} = E(\rho)\vec{e}_\rho$

• Symétrie sphérique

➢ La distribution de charges a symétrie sphérique est invariante par rotation autour de tous les axes passant par un point O de la distribution : O est alors un centre de symétrie.

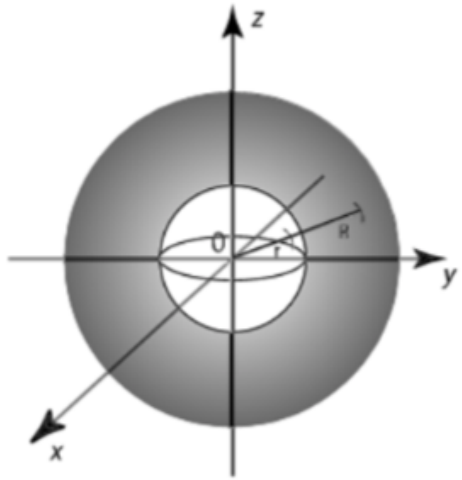
En coordonnées sphériques (r,θ,φ), le champ électrostatique $\vec{E}$ est radial et ne dépend que de r : $\vec{E} = E(r)\vec{e}_r$

Remarque : Le centre de symétrie O est l'intersection de tous les plans de symétrie : le champ $\vec{E}$ est nul en O.

Exemple 1: d’application du théorème de Gauss

Champ créé par une sphère uniformément chargée

- On considère une sphère pleine de centre O et rayon R, chargée avec une distribution volumique de charges .



- Etude de la symétrie : une sphère chargée uniformément présente une symétrie sphérique,
  - Cette distribution possédant une symétrie sphérique, le champ électrostatique qui en résulte aura la même symétrie, donc

$$\boxed{\vec{E} = E(r)\,\vec{u_r}}$$

- La surface de Gauss adaptée est simplement une sphère de rayon r et le théorème de Gauss nous fournit

$$\Phi = \oiint_S \vec{E}\cdot\vec{dS} = \oiint_S E(r)dS = E(r)\,4\pi r^2$$

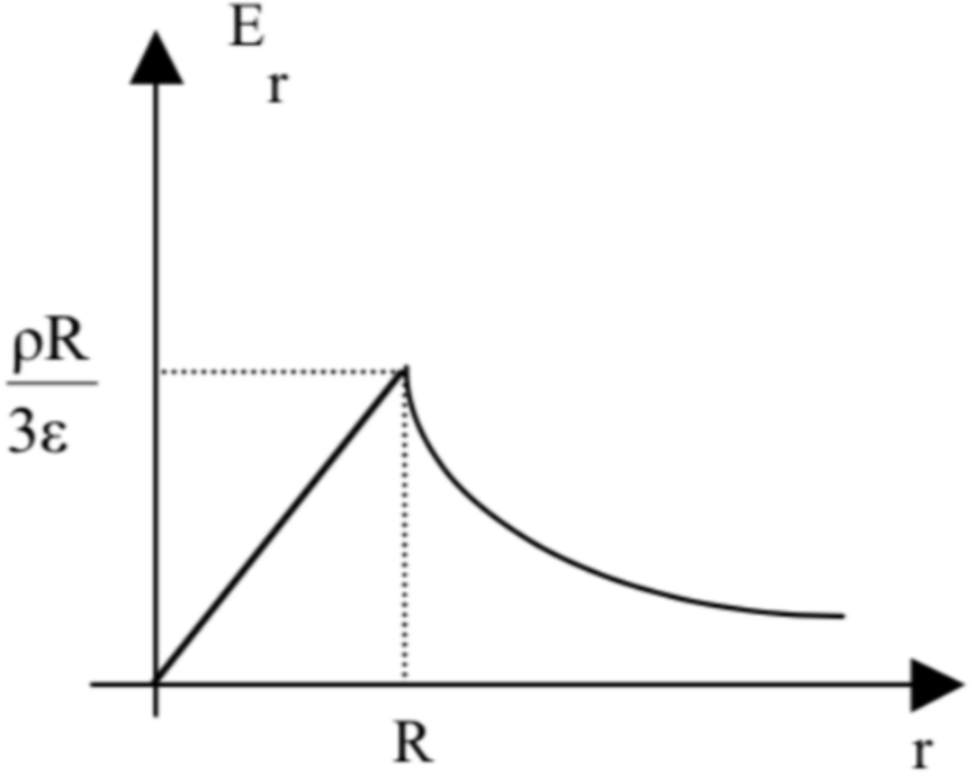
$$= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\varepsilon_0}\iiint_V \rho\, d\mathcal{V}$$

r<R $\quad E = \dfrac{\frac{4}{3}\pi r^3\rho}{4\pi r^2\varepsilon_0} = \dfrac{\rho}{3\varepsilon_0} r$

r>R $\quad E = \dfrac{\frac{4}{3}\pi R^3\rho}{4\pi r^2\varepsilon_0} = \dfrac{\rho}{3\varepsilon_0}\dfrac{R^3}{r^2} = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$

$$\vec{E} = \frac{\rho.r}{3\varepsilon_0}\,\vec{u_r} \qquad \vec{E} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\,\vec{u_r}$$

<u>Remarque</u> : le champ est continu à la traversée de la surface de la sphère chargée en volume : $\vec{E}(r = R^-) = \vec{E}(r = R^+)$.



Backup

Intensités relatives de l’électrostatique et de la gravitation

Forces de gravitation

la plus familière et la plus visuelle
longue portée ($1/r^2$), faible intensité
toujours attractive

Forces électromagnétiques

longue portée ($1/r^2$), forte intensité
(10^{40} fois plus que la gravitation)
attractive ou répulsive

Symmetries de distributions de charges

- En électrostatique, les symétries des distributions de charges se retrouvent dans le champ
- Les symétries envisagées sont des transformations géométriques qui laissent les distributions de charges invariantes

- **Symétrie par rotation**
  - Si la distribution de charge est invariante dans toute rotation θ autour de Oz alors le champ E ne dépend pas de θ
  - L'axe Oz est un axe de symétrie (symétrie de révolution)
  - Tout plan contenant cet axe est un plan de symétrie
  - E est porté par l'axe de symétrie