



جامعة باتنة 2  
الشهيد مصطفى بن بولعيد

UE F212  
Cours Physique 2  
Électrostatique



Dr L. Abdelhamid

# Programme F212

## Chapitre I Electrostatique

**I-1** Rappel mathématique

**I-1-1** Notion sur le gradient

**I-1-2** Notion sur la divergence

**I-1-3** Notions sur le rotationnel

**I-1-4** Eléments de longueur et de volume dans les différents  
Systèmes de coordonnées

**I-2** Champ et force électrostatique

**I-2-1** notions de charges électriques

**I-2-2** Interaction élémentaire : Loi de Coulomb

**I-2-3** Champ électrostatique créé par une charge ponctuelle

**I-2-4** Champ électrostatique créé par un ensemble de charges :

**I-2-4-a** Cas d'une distribution discrète de charges

**I-2-4-b** Cas d'une distribution continue de charges



# ***Programme F212***

## ***I-3 Potentiel électrostatique***

***I-3-1 Potentiel électrostatique crée par une charge ponctuelle***

***I-3-2 potentiel électrostatique crée par un ensemble de charges***

***I-3-2-a Cas d'une distribution discrète de charges***

***I-3-2-b Cas d'une distribution continue de charges***

***I-4 APPLICATIONS***

I-5 Dipôle électrostatique

I-5-1 Potentiel créé par un dipôle à grande distance

I-6 Théorème de Gauss

*I-6-1 Énoncé*

I-6-2 Exemples d'application

*I-6-2-a Sphère chargée en volume*

*I-6-2-b Sphère chargée en surface*

*I-6-3-a Cylindre chargée en surface*

*I-6-3-b Sphère chargée en volume*

I-7 Conducteurs en équilibre électrostatique

*I-7-1 Équilibre électrostatique*

*I-7-2 Champ au voisinage d'un conducteur (Théorème de Coulomb)*

*I-7-3 Pression électrostatique*

## Chapitre II Magnétostatique

II-1 Définition du champ magnétique

II-2 Force de Lorentz

II-3 Loi de Laplace

II-4 Loi de Biot et Savart

*II-4-a Énoncé de la loi de Biot & Savart*

*II-4-b Cas du fil rectiligne infini*

## Chapitre III Electrocinétique

III-1 Intensité du courant électrique

III-2 Loi des nœuds - Loi des mailles

*III-2-a Loi des nœuds*

*III-2-b Loi des mailles*

III-3 Loi d'Ohm

III-4 Relation entre le champ électrique et la densité de courant

III-5 Association série et parallèle

*III-5-1 Association série*

*III-5-2 Association parallèle*

III- 6APPLICATIONS

III-7 Théorème de Thévenin

*III-7-1 Énoncé du théorème de Thévenin*

III-7-2. Détermination de la tension équivalente  $E$  et de la résistance équivalente  $r$

- L'importance de l'analyse vectorielle provient de son utilisation intensive en physique et dans les sciences de l'ingénieur L'analyse vectorielle est une branche des mathématiques qui étudie les champs de scalaires et de vecteurs. Dans ce cadre, un champ de vecteurs associe à chaque point de l'espace un vecteur, tandis qu'un champ scalaire y associe un réel. Le gradient, la divergence et le rotationnel sont les trois principaux opérateurs différentiels linéaires du premier ordre.

L'opérateur nabla est défini en coordonnées cartésiennes par :

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$$

## Notion sur le gradient

Le gradient est un opérateur qui s'applique à un champ de scalaires et décrit un champ de vecteurs qui représente la variation de la valeur du champ scalaire dans l'espace

En coordonnées cartésiennes le gradient est donné par :

$$\overrightarrow{\text{grad}} f = \vec{\nabla} f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial z} \end{pmatrix} .$$

Simplement appliqué à un champ scalaire  $f(x,y,z)$ , l'opérateur nabla donne le gradient du champ. Le gradient obtenu est lui un champ vectoriel.

## Notion sur la divergence

Le produit scalaire entre l'opérateur nabla et un champ vectoriel  $\vec{U}$  (défini par ses trois composantes) donne la divergence de ce champ vectoriel. La divergence obtenue est un champ scalaire.

$$\operatorname{div}\vec{F} = \vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

$$\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$$

désigne le champ de vecteurs auquel est appliqué l'opérateur divergence.

## Notions sur le rotationnel

Le rotationnel transforme un champ de vecteurs en un autre champ de vecteurs. Plus difficile à se représenter aussi précisément que le gradient et la divergence, il exprime la tendance qu'a un champ à tourner autour d'un point. En coordonnées cartésiennes, on peut définir le rotationnel par la relation

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{F} = \vec{\nabla} \wedge \vec{F} = \begin{pmatrix} \partial F_z / \partial y - \partial F_y / \partial z \\ \partial F_x / \partial z - \partial F_z / \partial x \\ \partial F_y / \partial x - \partial F_x / \partial y \end{pmatrix}$$

# Eléments de longueur et de volume dans les différents Systèmes de coordonnées

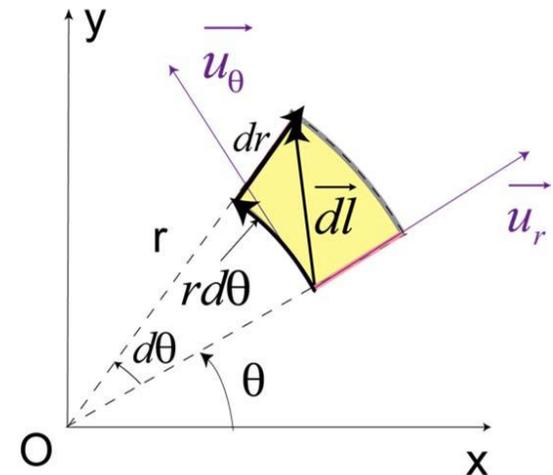
- L'élément de longueur est donné dans le système de coordonnées cartésiennes

par 
$$\vec{dl} = dx\vec{i} + dy\vec{j}$$

- Dans les coordonnées polaires, l'élément de longueur devient

$$\vec{dl} = dr\vec{u}_r + rd\theta\vec{u}_\theta$$

$$\vec{dl} = dre_r + rd\theta e_\theta$$



# Champ et force électrostatique

- En physique, on désigne par champ électrique un champ créé par des particules électriquement chargées, cette notion fut introduite par Michael Faraday, elle permet d'expliquer comment deux objets peuvent interagir à distance, sans que rien ne les relie, à la fois la loi de la gravitation universelle de Newton et la loi de Coulomb en électrostatique, impliquent une telle interaction à distance, il n'y a pas de fil qui relie la terre au soleil, celui-ci exerce son attraction à distance.
- De même, deux charges électriques s'attirent ou se repoussent dans le vide sans que rien ne les relie.

- Soit une charge  $q_1$  qui de part sa présence crée un champ électrostatique en tout point de l'espace, l'interaction de ce champ avec une charge  $q_2$  crée une force électrostatique entre ces deux charges.
- Dans le cas de charges fixes dans le référentiel d'étude, le champ électrique est appelé champ électrostatique. si les charges sont en mouvement, il faut ajouter un champ électrique induit dû au déplacement des charges pour obtenir le champ total (champ électromagnétique).

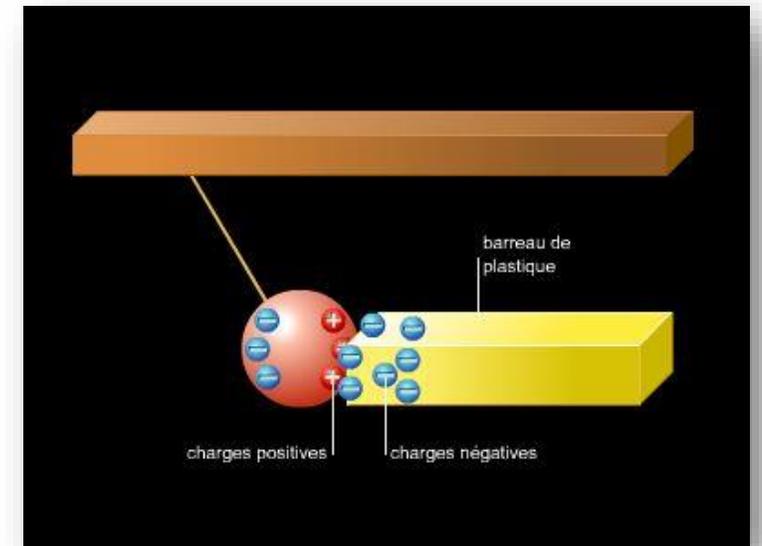
# Notions de charges électriques

La matière est constituée de particules élémentaires (atome, proton et neutron), caractérisées par leur masse et leurs charges.

**1/** Prenons une boule très légère en polystyrène par exemple, recouverte de métal fin. Approchons ensuite une tige de verre ou d'ambre préalablement frotté avec un tissu, on observe une attraction entre le verre et la boule et une répulsion entre l'ambre et la boule : on fait ainsi apparaître deux types d'électricité, charges positives et charges négatives.

**2/** Prenons maintenant deux boules en polystyrène électrisée l'une par du verre frotté et l'autre par de l'ambre frotté on voit que les deux boules s'attirent, ensuite les deux boules sont électrisées par du verre frotté, on remarque que les deux boules se repoussent.

**Les charges de mêmes signes se repoussent  
et les charges de signes opposés s'attirent.**

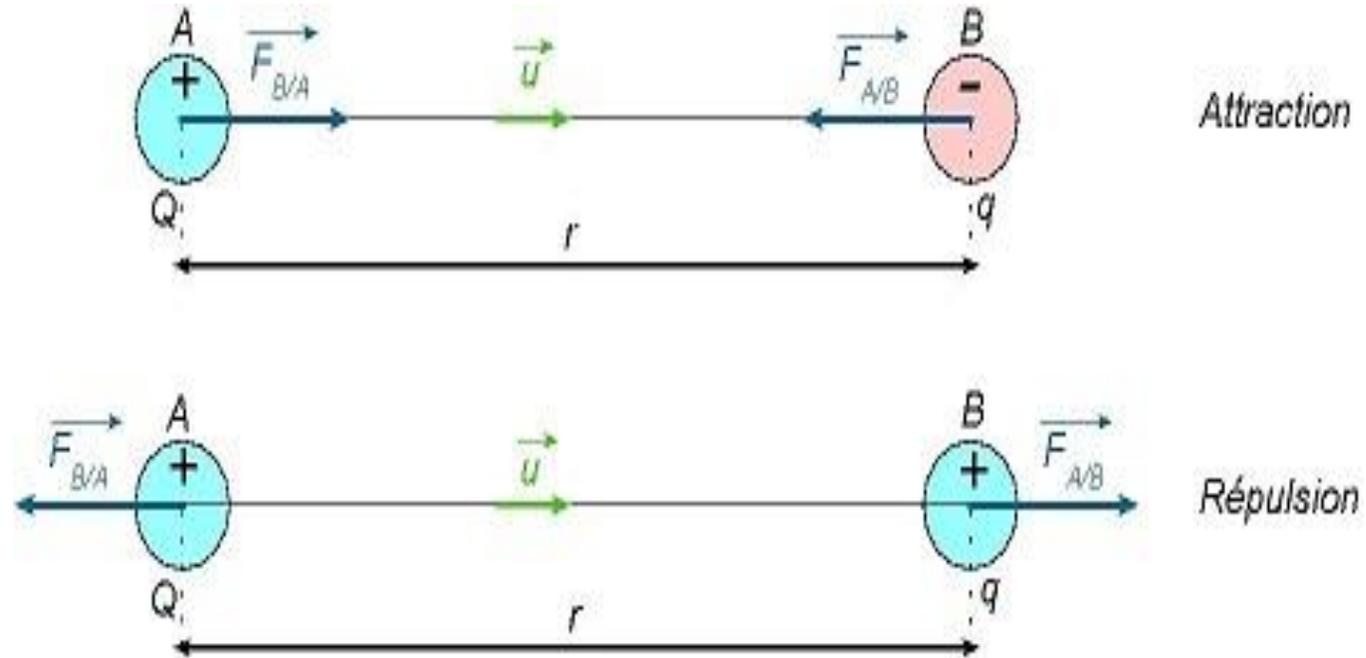


# Interaction élémentaire : Loi de Coulomb

- Charles Auguste de Coulomb (1736-1806) a effectué une série de mesures (à l'aide d'une balance de torsion) qui lui ont permis de déterminer avec un certain degré de précision les propriétés de la force électrostatique exercée par une charge ponctuelle  $q_1$  sur une autre charge ponctuelle  $q_2$ .
- La force est radiale, c'est-à-dire dirigée selon la droite qui joint les deux charges.
- Elle est proportionnelle au produit des charges
- Enfin, elle varie comme l'inverse du carré de la distance entre les deux charges.
- L'expression mathématique de la force de Coulomb exercée par la charge  $q_1$  sur la charge  $q_2$  et traduisant les propriétés ci-dessus est la suivante :

$$\vec{F}_{1-2} = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{1-2}$$

Cette force est attractive si les charges sont de signe opposé, répulsive sinon.



- Cette expression n'est valable que pour des charges immobiles et dans le vide.
- Cette loi est la base même de toute l'électrostatique.
- Cette force obéit au principe d'Action et de Réaction de la mécanique classique.

**La loi de Coulomb peut s'écrire aussi :**

$$\vec{F}_{1-2} = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{1-2} = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} = K q_1 q_2 \frac{\vec{r}}{r^3}$$

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2 \text{ (SI)}$$

Où K est la constante de Coulomb et  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide.

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$$

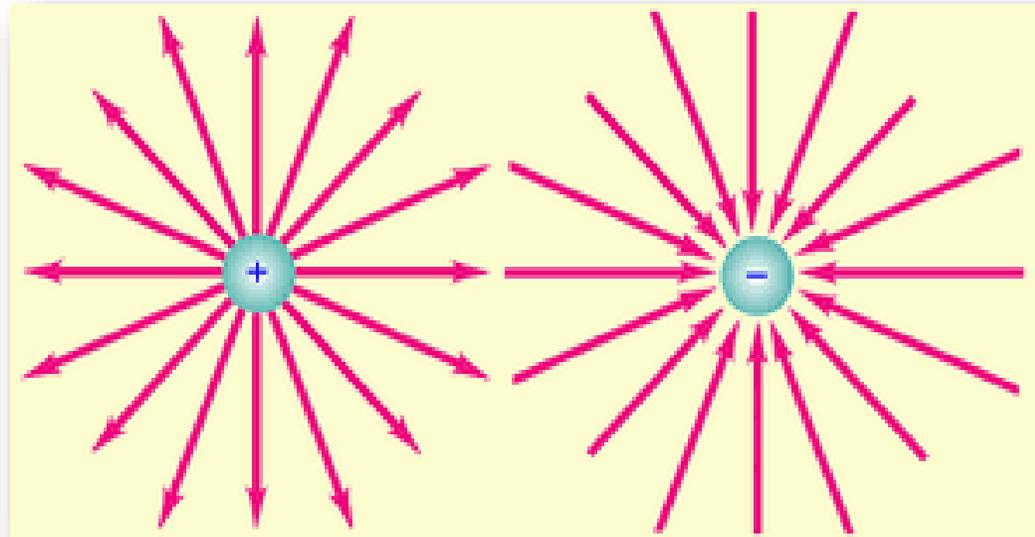
Dans le vide on a :  $\mu_0 \epsilon_0 C^2 = 1$  avec C célérité de la lumière  $C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/S}$ .

$\mu_0$  : la perméabilité du vide :  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

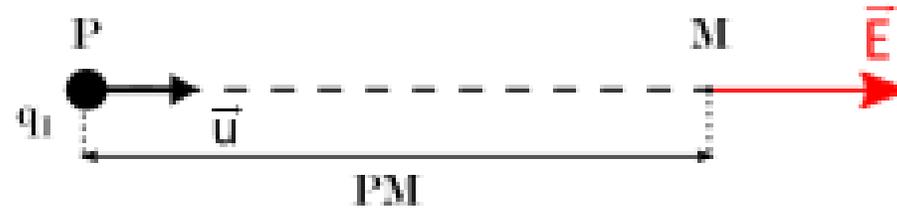
# Champ électrostatique créé par une charge ponctuelle

- Le champ électrostatique traduit en tout point M la modification des propriétés de l'espace due à la présence d'une charge source Q.

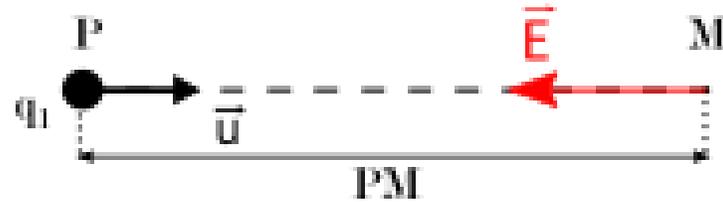
$$\vec{E} (M) = K \frac{Q}{r^2} \vec{u}$$



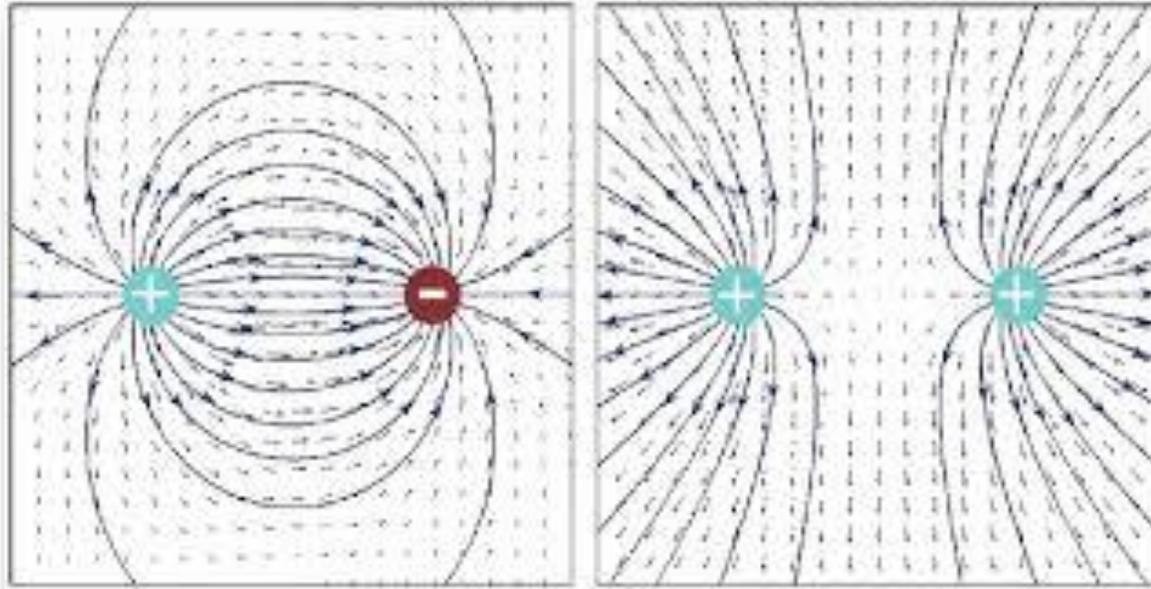
- Si  $q_1 > 0$  :



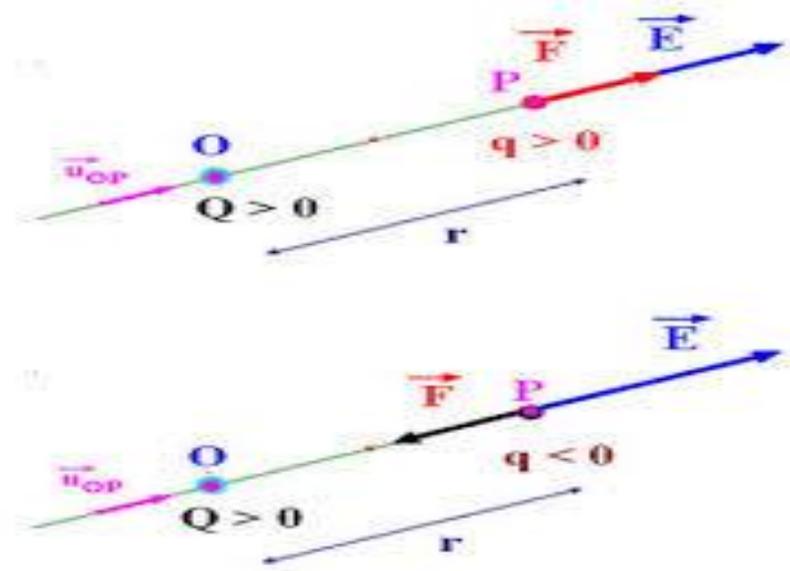
- Si  $q_1 < 0$  :



L'unité du champ dans le système international (SI) est : V/m ou N/C



**Lignes de champs électrostatique**

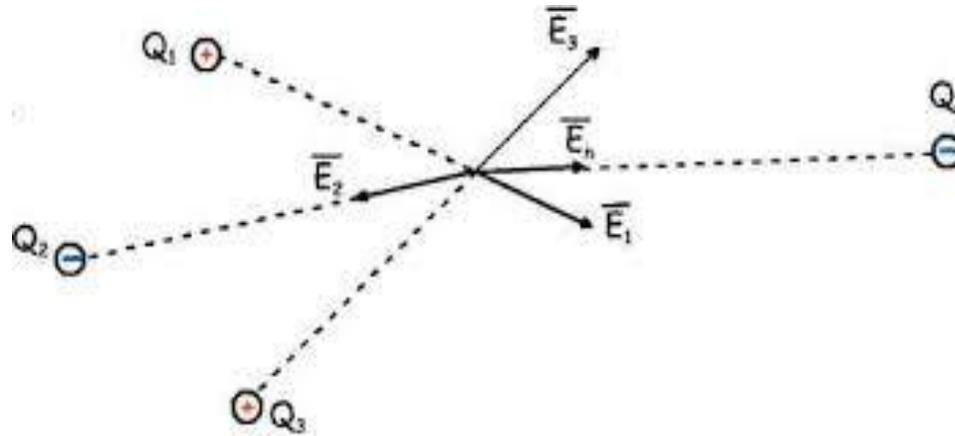


La force électrostatique s'exerçant sur une charge cible  $q$  placée au point  $M$  est :

$$\vec{F} = q \vec{E}$$

# Champ électrostatique créé par un ensemble de charges :

## Cas d'une distribution discrète de charges

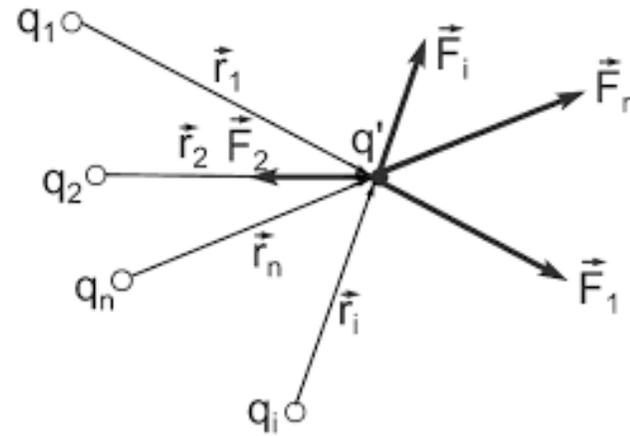


Principe de superposition : le champ électrostatique en un point de l'espace est égale à la somme des champs électrostatiques créés par les différentes charges en ce point.

$$\vec{E}_{\text{tot}}(M) = \sum_{i=1}^n K \frac{Q_i}{r_i^2} \vec{u}_{i \rightarrow M}$$

# Force électrostatique créée par un ensemble de charges

## Cas d'une distribution discrète de charges



De même pour la force électrostatique créée par une distribution discrète de charge (ensemble de charges ponctuelles), la résultante des forces est donnée par le principe de superposition :

$$\vec{F}_{\text{tot}}(M) = \sum_{i=1}^n K \frac{Q_i Q_M}{r_i^2} \vec{u}_{i \rightarrow M}$$

# Cas d'une distribution continue de charges

Dès que le nombre de charges augmente, le calcul du champ total devient trop complexe et donc pour calculer le champ en un point M de l'espace dû à une distribution continue de charge on divise l'espace en petits morceaux contenant chacun une charge élémentaire dq distant de r du point M et la somme de ces champs élémentaires sera remplacée par une intégrale :

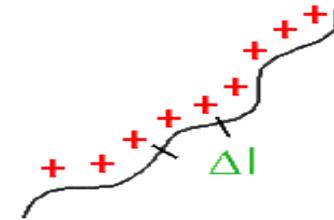
$$\vec{E} = \sum \vec{E}(M) = \int_0^{\text{distr}} \frac{Kdq}{r^2} \vec{u}$$

$$\vec{E} = \sum \vec{E}(M) = \int_0^{\text{distr}} \frac{Kdq}{r^2} \vec{u}$$

On distingue trois cas de distribution continue :

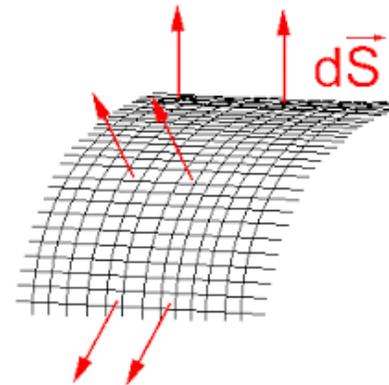
1/ Une distribution linéaire ou linéique de charge

$$dq = \lambda dl \quad Q = \int \lambda dl$$



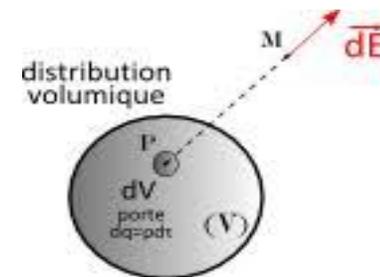
2/ Une distribution surfacique de charge

$$dq = \sigma dS \quad Q = \iint \sigma ds$$



3/ Une distribution volumique de charge

$$dq = \rho dv \quad Q = \iiint \rho dV$$



# Distribution linéique de charge

Soit un fil de longueur  $l$  portant une charge  $Q$  uniformément répartie sur sa longueur.

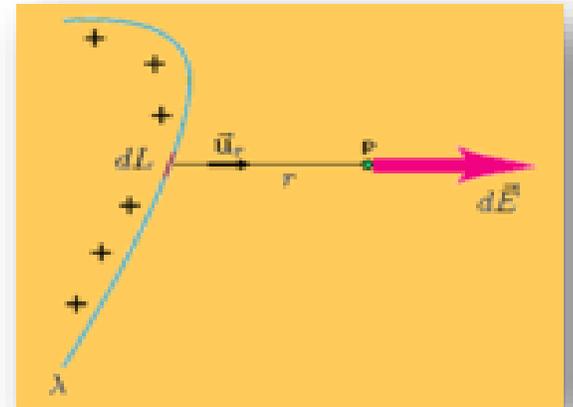
Soit un élément de longueur  $dl$  qui porte une charge élémentaire  $dq$  on a :

$$dq = \lambda dl \quad \text{où } \lambda \text{ représente la densité linéaire ou linéique de charge (C/m)}$$

On peut écrire que la charge totale portée par le fil est :

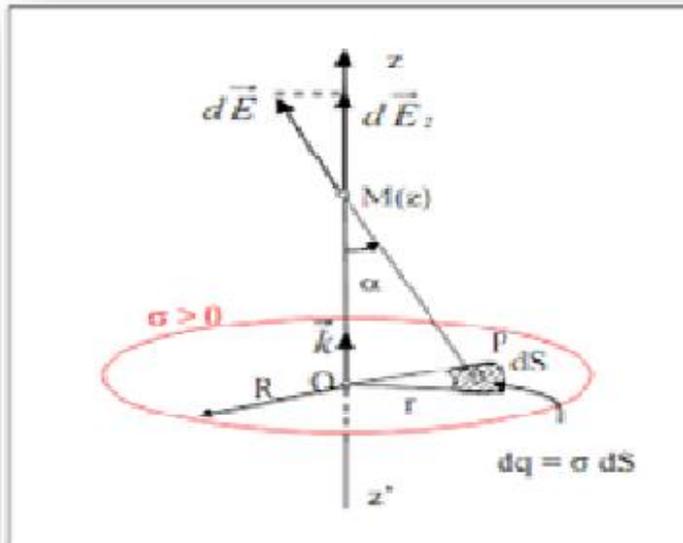
$$Q = \int \lambda dl \quad \text{et que} \quad \vec{E} = \int \overrightarrow{dE}(M)$$

$$\vec{E} = \int k \frac{dq}{r^2} \vec{u} \quad \vec{E} = \int k \frac{\lambda dl}{r^2} \vec{u}$$



# Distribution surfacique de charge

De la même manière on peut considérer une distribution surfacique de charge, Soit une surface  $S$  portant une charge  $Q$  uniformément répartie sur toute sa surface avec une densité surfacique de charge  $\sigma$  (C/m<sup>2</sup>). Soit  $ds$  un élément de surface qui porte une charge élémentaire  $dq$ , on peut écrire :



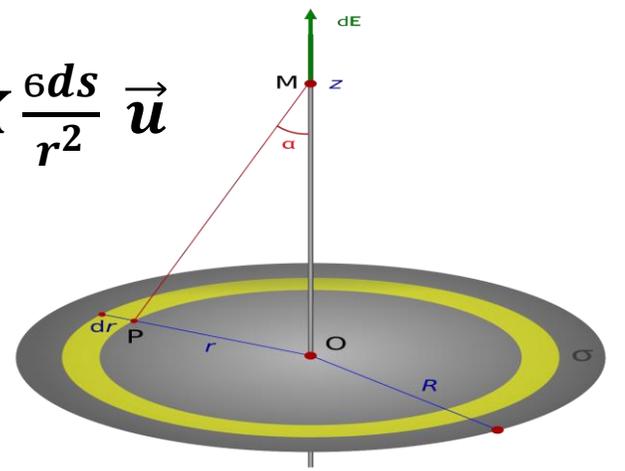
$$Q = \iint \sigma ds$$

et

$$\vec{E} = \int d\vec{E}(M)$$

$$\vec{E}(M) = \iint K \frac{dq}{r^2} \vec{u}$$

$$\vec{E}(M) = \iint K \frac{\sigma ds}{r^2} \vec{u}$$



# Distribution volumique de charge

De la même manière on peut considérer une distribution volumique de charge, Soit un volume  $V$  portant une charge  $Q$  uniformément répartie sur tout son volume avec une densité volumique de charge  $\rho$  (C/m<sup>3</sup>). Soit  $dv$  un élément de volume qui porte une charge élémentaire  $dq$ , on peut écrire :

$$Q = \iiint \rho dV$$

$$\vec{E}(M) = \iiint \overrightarrow{dE}(M) = \iiint K \frac{dq}{r^2} \vec{u} = \iiint K \frac{\rho dV}{r^2} \vec{u}$$

# Potentiel électrostatique

La charge électrique d'une distribution peut être décrite par un vecteur : le champ électrique ou par une grandeur scalaire : le potentiel électrique  $V$ . On peut donc caractériser la perturbation du milieu due à la présence de charges électriques par une fonction scalaire : le potentiel  $V$ .

Le potentiel est lié au travail accompli pour transporter une charge d'un point à l'autre. Le champ électrostatique n'existe que s'il y a une variation de potentiel entre deux points.

Champ électrique = variation du potentiel dans l'espace.

La relation entre le potentiel et le champ électrique est :

$$\vec{E} = - \overrightarrow{\text{grad}} V$$
$$\vec{E} = - \overrightarrow{\text{grad}} V \quad dV = - \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} \quad V = - \int \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl}$$

# Potentiel électrostatique créé par une charge ponctuelle

V est donc un scalaire algébrique, s'exprime en volts.

Le potentiel en un point M situé à une distance r de la charge q est donné par :

$$V = K \frac{q}{r}$$

Rappel de l'élément de longueur en coordonnées polaires :

$$\vec{dl} = dx \vec{i} + dy \vec{j} \quad \text{et} \quad \vec{dl} = dr \vec{u}_r + r d\theta \vec{u}_\theta$$

Et donc le produit scalaire donne en coordonnées polaires et de même pour les coordonnées sphériques :

$$\vec{E} \cdot \vec{dl} = K \frac{q}{r^2} \vec{u}_r \cdot (dr \vec{u}_r + r d\theta \vec{u}_\theta) = K \frac{q}{r^2} dr$$

$$V = - \int \vec{E} \cdot \vec{dl} = - \int K \frac{q}{r^2} dr = K \frac{q}{r} + C^{\text{ste}}$$

On suppose que le potentiel à l'infini est nul  $V(\infty) = 0$

$$\text{Alors} \quad 0 + C^{\text{ste}} = 0 \quad \text{donc} \quad C^{\text{ste}} = 0$$

$$\text{et} \quad \mathbf{V} = \mathbf{K} \frac{\mathbf{q}}{\mathbf{r}}$$

# Potentiel électrostatique créé par un ensemble de charges

## Cas d'une distribution discrète de charges

Les potentiels s'ajoutent pour une distribution de charges ponctuelles, on applique alors le théorème de superposition.

$$V(M) = \sum_{i=1}^n V_i$$

# Cas d'une distribution continue de charges

- Distribution linéaire de charge :  $V(M) = \int K \frac{dq}{r} = \int K \frac{\lambda dl}{r}$
- Distribution surfacique de charge :  $V(M) = \int K \frac{dq}{r} = \iint K \frac{\sigma ds}{r}$
- Distribution volumique de charge :  $V(M) = \int K \frac{dq}{r} = \iiint K \frac{\rho dV}{r}$

# APPLICATIONS

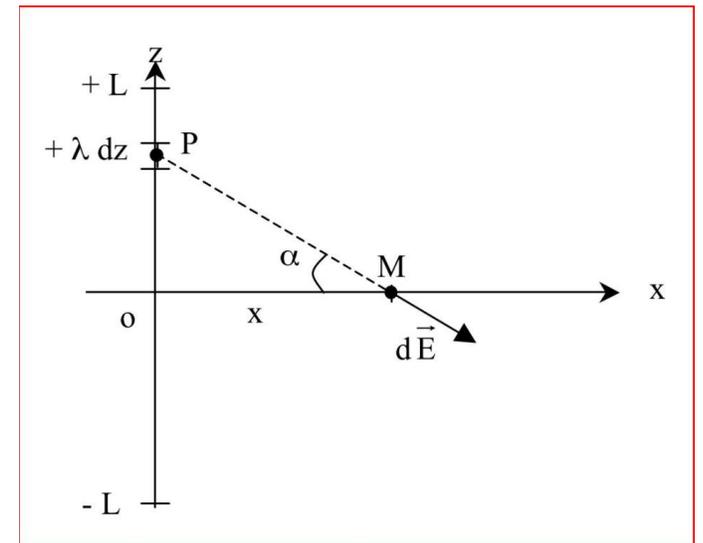
Soit un fil de longueur  $2L$  portant une densité linéique de charge  $\lambda$  positive et uniforme. Déterminons le champ électrique créé par cette distribution en un point  $M$  situé à une distance  $x$  sur sa médiatrice.

Pour raison de symétrie le champ électrostatique est nul selon  $Oz$   $E(M)_{/Oz} = 0$

Il ne reste que la composante du champ selon  $OX$  :

$$d\vec{E}(M) = 2 d\vec{E}_{/OX} \vec{i} = 2dE \cos \alpha \vec{i}$$

$$\vec{E}(M) = 2 \int_0^L dE \cos \alpha \vec{i} \quad E(M) = 2 \int_0^L dE \cos \alpha$$



$$E(M) = 2 \int_0^L \frac{Kdq}{r^2} \cos \alpha = 2 \int_0^L \frac{K\lambda dl}{r^2} \cos \alpha$$

$$\text{Avec : } \cos \alpha = \frac{x}{r} \quad \text{d'où } r = \frac{x}{\cos \alpha} \quad \text{et} \quad r^2 = \frac{x^2}{\cos^2 \alpha}$$

$$\text{On a aussi } \tan \alpha = \frac{l}{x} \quad \text{d'où } l = x \tan \alpha \quad \text{et} \quad dl = \frac{x}{\cos^2 \alpha} d\alpha \quad \text{avec } dl = dZ$$

On obtient finalement :

$$E(M) = \frac{2K\lambda}{x} \int_0^\phi \cos \alpha \, d\alpha = \frac{2K\lambda}{x} \sin \phi \quad \text{Avec} \quad \sin \phi = \frac{L}{\sqrt{x^2 + L^2}}$$

$$\vec{E}(M) = \frac{2K\lambda}{x} \frac{L}{\sqrt{x^2 + L^2}} \vec{i}$$

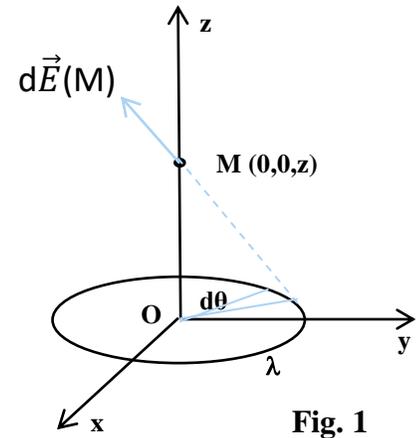
- Si le fil est infini alors  $\phi = \frac{\pi}{2}$  et  $\vec{E}(M) = \frac{2K\lambda}{x} \vec{i}$

Soit un fil circulaire de centre o et de rayon R , chargé avec une densité linéique  $\lambda$  positive et uniforme. Déterminons le champ électrique crée par cette distribution en un point M placé sur son axe de révolution tel que  $OM = Z$

Pour des raisons de symétrie le champ est :

- Nul sur OX :  $dE_{OX} = 0$
- Nul sur OY :  $dE_{OY} = 0$
- Il ne reste que la composante sur OZ :  $dE_{Oz} = dE \cos \alpha$

$$\vec{E} = \int \overrightarrow{dE}(M) = \int dE \cos \alpha \vec{k} \quad \vec{E} = \int k \frac{dq}{r^2} \cos \alpha \vec{k}$$



$$\vec{E} = \int k \frac{\lambda dl}{r^2} \cos \alpha \vec{k}$$

Avec :  $\cos \alpha = \frac{Z}{r} = \frac{Z}{\sqrt{Z^2+R^2}}$

$$\vec{E} = \int k \frac{\lambda dl}{Z^2+R^2} \frac{Z}{\sqrt{Z^2+R^2}} \vec{k} = \int k \frac{Z \lambda dl}{\sqrt{(Z^2+R^2)^3}} \vec{k} = K \lambda Z \int \frac{dl}{\sqrt{(Z^2+R^2)^3}} \vec{k}$$

Avec :  $dl = R d\theta$

$$\vec{E} = K \lambda Z \int_0^{2\pi} \frac{R d\theta}{\sqrt{(Z^2+R^2)^3}} \vec{k} = K \lambda \frac{RZ}{\sqrt{(Z^2+R^2)^3}} \int_0^{2\pi} d\theta \vec{k} = \frac{\lambda RZ}{2\epsilon_0 \sqrt{(Z^2+R^2)^3}} \vec{k}$$

Soit un disque circulaire de centre  $O$  et de rayon  $R$ , chargé en surface, avec une densité superficielle  $\sigma$  positive et uniforme. Déterminons le champ électrique créé par cette distribution en un point  $M$  placé sur l'axe de révolution du disque tel que  $OM = Z$  (Fig 2).

Nous avons une symétrie de distribution de charge qui fait que le champ final est selon l'axe  $OZ$  :

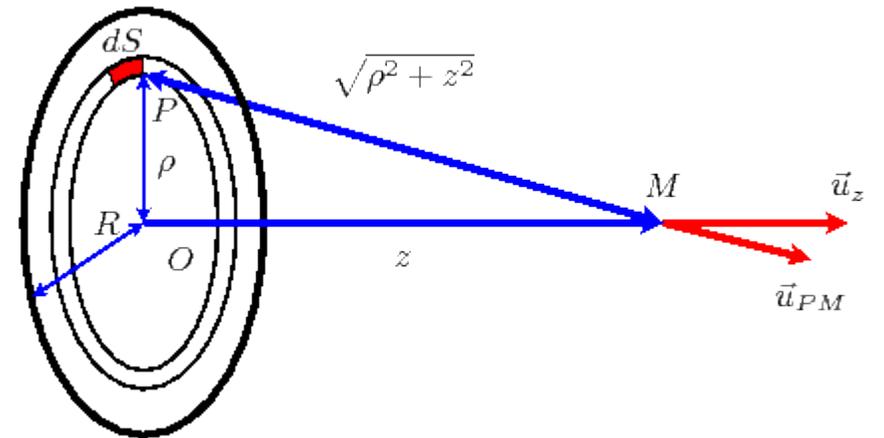
$$\vec{E} = \int \overrightarrow{dE}(M) = \int dE \cos \alpha \vec{u}_z$$

$$\vec{E} = \int k \frac{dq}{r^2} \cos \alpha \vec{u}_z$$

$$\vec{E} = K \iint \frac{\sigma dS}{r^2} \cos \alpha \vec{u}_z$$

Avec  $\cos \alpha = \frac{Z}{\sqrt{\rho^2 + Z^2}}$  et  $r^2 = \rho^2 + Z^2$

$$E = K\sigma \iint \frac{dS}{r^2} \cos \alpha = K\sigma \iint \frac{Z dS}{\sqrt{\rho^2 + Z^2}^3}$$



Avec  $S = \pi\rho^2$  d'où  $dS = 2\pi\rho d\rho$

$$E = K\sigma\pi \int_0^R \frac{2Z\rho d\rho}{\sqrt{\rho^2+Z^2}} = \frac{6}{4\epsilon} \int_0^R \frac{2Z\rho d\rho}{\sqrt{\rho^2+Z^2}}$$

- de la forme :  $\int u' u^n = \frac{u^{n+1}}{n+1}$
- Ce qui donne :  $E = -\frac{6}{2\epsilon_0} \left[ \frac{Z}{\sqrt{R^2+Z^2}} - \frac{Z}{|Z|} \right]$
- On obtient finalement :

$$E = \frac{6}{2\epsilon_0} \left[ \frac{Z}{|Z|} - \frac{Z}{\sqrt{R^2+Z^2}} \right]$$

$$\text{Et } \vec{E}(M) = \frac{6}{2\epsilon_0} \left[ \frac{Z}{|Z|} - \frac{Z}{\sqrt{R^2+Z^2}} \right] \vec{u}_Z$$

# Théorème de Gauss

## Enoncé

Le flux du champ électrique à travers une surface fermée orientée quelconque est égal, dans le vide, à  $1/\epsilon_0$  fois la charge électrique contenue à l'intérieur de cette surface.

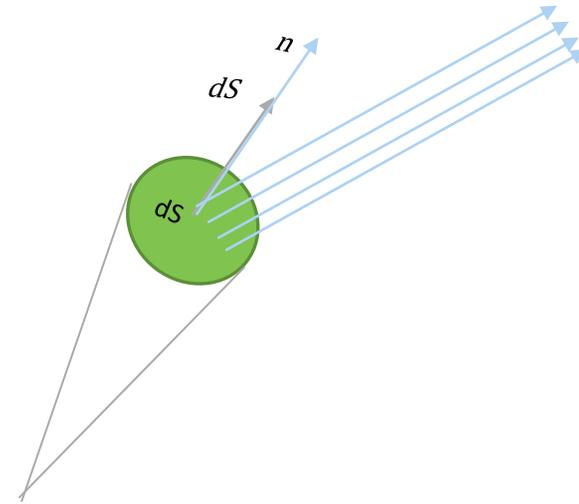
$$\Phi = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$$

## Rappel sur le flux :

$dS$  est un élément de surface

$\vec{n}$  est le vecteur unitaire sortant et normal à la surface :  $\vec{dS} = \vec{n} dS$

$$d\phi = \vec{E} \cdot \vec{dS} \Rightarrow \phi = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$$



# Exemples d'application

## Sphère chargée en volume

Soit une sphère de centre O et de rayon R, uniformément chargée en volume, avec une densité volumique  $\rho$  constante et positive.

En utilisant le théorème de Gauss, déterminons le champ électrostatique créé par cette distribution en tous points de l'espace ?(M à l'intérieur et à l'extérieur de la sphère).

Les étapes à suivre pour le calcul du champ électrostatique par la méthode de Gauss sont :

- 1/ Rechercher les symétries du problème.
- 2/ Définir une surface de Gauss.
- 3/ Appliquer le théorème de Gauss.

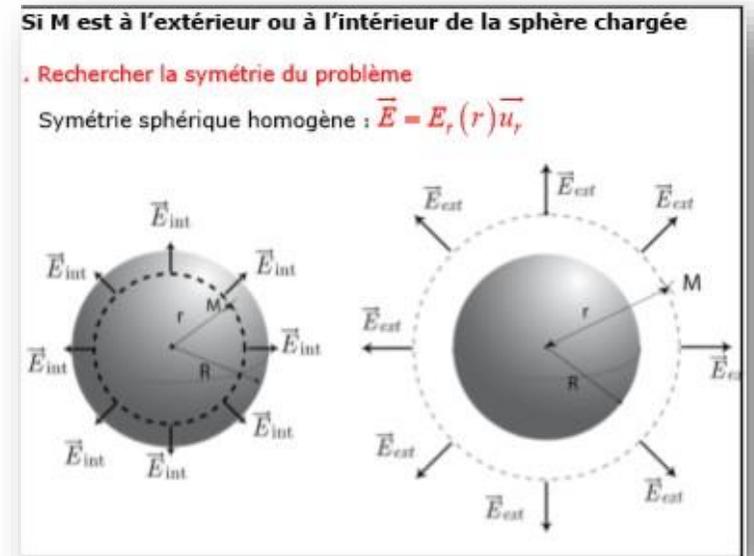
Dans ce cas nous avons une symétrie sphérique et le champ est sortant (charge est positive) selon  $\vec{e}_r$  ou  $\vec{u}_r$  (selon les littératures).

$$\vec{E} = E \vec{e}_r$$

La surface de Gauss qui correspond à la symétrie du problème est une sphère de centre O et de rayon r.

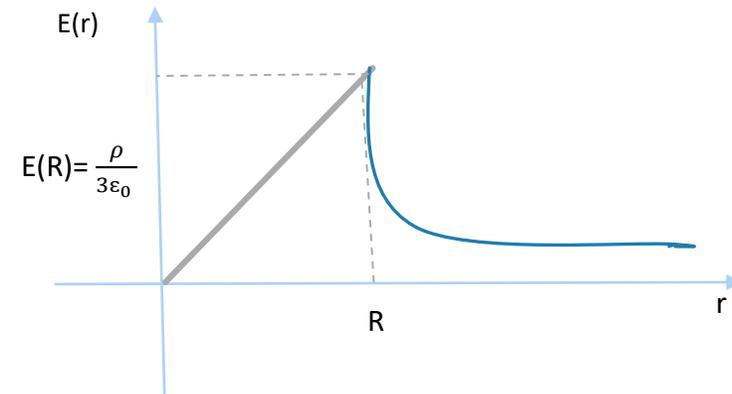
### 1<sup>er</sup> cas M à l'intérieur de la sphère (r<R)

- $\phi = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$
- Vu que  $\vec{E}$  et  $\vec{dS}$  sont colinéaires alors  $\vec{E} \cdot \vec{dS} = E \cdot ds \cdot \cos 0 = E \cdot ds$
- $\oiint E \cdot dS = 4\pi r^2 E_{int} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint \rho dv = \frac{\rho}{\epsilon_0} \iiint dv$
- $4\pi r^2 E_{int} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \frac{4}{3} \pi r^3$
- $E_{int} = \frac{\rho}{3\epsilon_0} r \quad \vec{E}_{int} = \frac{\rho}{3\epsilon_0} r \vec{e}_r$



## 2<sup>ème</sup> cas M à l'extérieur de la sphère (r>R)

- $\phi = \oint \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$
- $4\pi r^2 E_{ext} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint \rho dv = \frac{\rho}{\epsilon_0} \iiint dv$
- $4\pi r^2 E_{ext} = \frac{4\rho}{3\epsilon_0} \pi R^3$
- $E_{ext} = \frac{\rho}{3\epsilon_0} \frac{R^3}{r^2}$
- $\vec{E}_{ext} = \frac{\rho}{3\epsilon_0} \frac{R^3}{r^2} \vec{e}_r$



# Sphère chargée en surface

- Soit une sphère de centre O et de rayon R, uniformément chargée en surface, avec une densité surfacique  $\bar{\sigma}$  constante et positive.
- En utilisant le théorème de Gauss, déterminons le champ électrostatique créé par cette distribution en tout point de l'espace ? (M à l'intérieur et à l'extérieur de la sphère).
- Dans ce cas nous avons une symétrie sphérique et le champ est sortant (charge est positive) selon  $\vec{e}_r$ .

$$\vec{E} = E \vec{e}_r$$

- La surface de Gauss qui correspond à la symétrie du problème est une sphère de centre O et de rayon r.

## 1<sup>er</sup> cas M à l'intérieur de la sphère(r<R)

- $\phi = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} = 0$
- $E_{int} = 0$

## 2<sup>ème</sup> cas M à l'extérieur de la sphère(r>R)

- $\phi = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$
- Vu que  $\vec{E}$  et  $\vec{dS}$  sont colinéaires alors  $\vec{E} \cdot \vec{dS} = E \cdot ds \cdot \cos 0 = E \cdot dS$
- $\oiint E \cdot dS = 4\pi r^2 E_{ext} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \iint \rho dS = \frac{\rho}{\epsilon_0} \iint dS$
- $4\pi r^2 E_{ext} = \frac{\rho}{\epsilon_0} 4\pi R^2$
- $E_{ext} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \frac{R^2}{r^2} \qquad \vec{E}_{ext} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \frac{R^2}{r^2} \vec{e}_r$

On peut en déduire le potentiel  $V(M)$  en tout point de l'espace.

- $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad dV = -\vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} \quad V = -\int \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} = -\int E \cdot dr$

- Pour  $r > R$

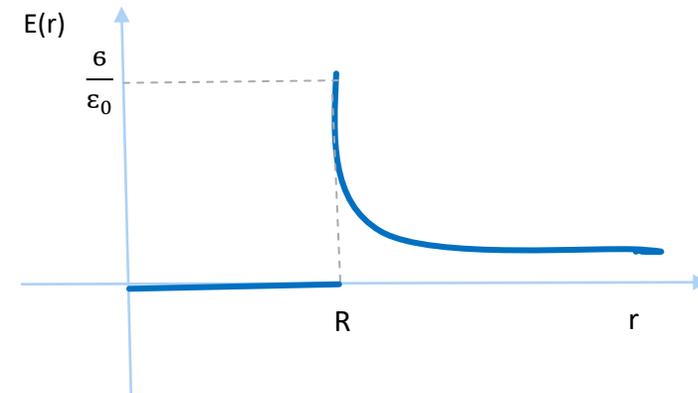
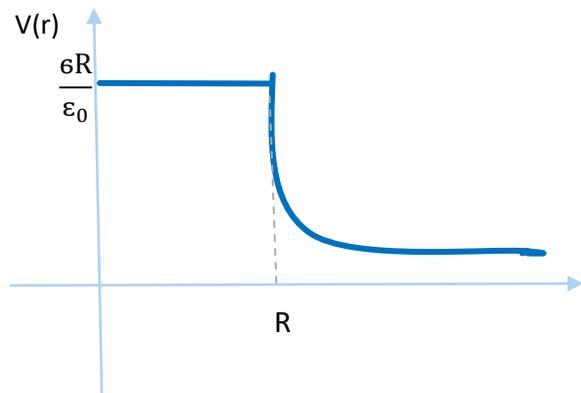
- $V_{\text{ext}} = -\int E \cdot dr = -\int \frac{6R^2}{\epsilon_0 r^2} \cdot dr = \frac{6R^2}{\epsilon_0} \int -\frac{dr}{r^2} = +\frac{6R^2}{\epsilon_0 r} + C^{\text{ste}}_1$

On a le potentiel nul à l'infini  $V(\infty) = 0$ , alors  $C^{\text{ste}}_1 = 0 \quad V_{\text{ext}} = +\frac{6R^2}{\epsilon_0 r}$

- Pour  $r < R \quad V_{\text{int}} = -\int E \cdot dr = -\int 0 \cdot dr = C^{\text{ste}}_2$

Et pour raison de continuité du potentiel on peut écrire :

- $V_{\text{int}} = V_{\text{ext}} \text{ quand } r \rightarrow R \quad +\frac{6R^2}{\epsilon_0 R} = C^{\text{ste}}_2 = V_{\text{int}} = +\frac{6R}{\epsilon_0}$



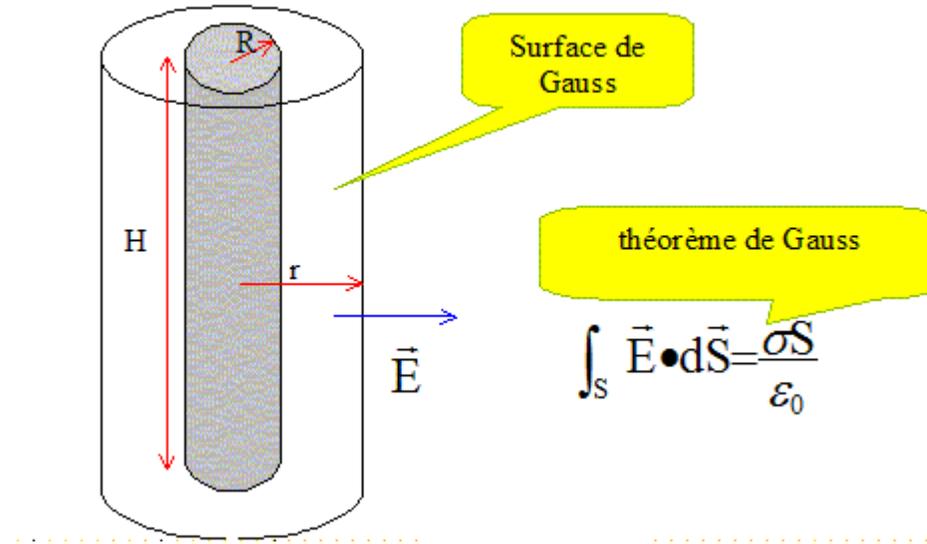
# Cylindre chargé en surface

- Soit un cylindre de centre O, de longueur h et de rayon R, uniformément chargé en surface, avec une densité surfacique  $\sigma$  constante et positive.
- En utilisant le théorème de Gauss, déterminons le champ électrostatique créé par cette distribution en tout point de l'espace ? (M à l'intérieur et à l'extérieur du cylindre).
- Dans ce cas nous avons une symétrie cylindrique et le champ est sortant (charge est positive) selon  $\vec{e}_r$ .

$$\vec{E} = E \vec{e}_r$$

- La surface de Gauss qui correspond à la symétrie du problème est un cylindre de longueur h et de rayon r.

Nous avons dans ce cas trois surfaces: une surface latérale  $S_L$  et deux surfaces de bases  $S_1$  et  $S_2$ . Le flux de champ à travers les trois surfaces constitue la somme de ces flux.



Appliquons le théorème de Gauss :  $\phi = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$

$$\phi = \sum \phi_i = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS}_1 + \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS}_2 + \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS}_L$$

Or on sait que :  $\vec{E} \perp \vec{dS}_1$  et  $\vec{E} \perp \vec{dS}_2$  et donc le champ est nul, il ne reste que le flux du champ latéral  $\vec{E} \parallel \vec{dS}_L$ .

$$\phi = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS}_L = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$$

**1<sup>er</sup> cas M à l'intérieur du cylindre ( r < R )**

Vu que  $\vec{E}$  et  $\vec{dS}$  sont colinéaires alors  $\vec{E} \cdot \vec{dS} = E \cdot ds \cdot \cos 0 = E \cdot ds$

$$E \cdot ds = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} = 0 \text{ et donc } E_{int} = 0 \text{ et } V_{int} = C_1$$

**2<sup>ème</sup> cas M à l'extérieur du cylindre ( r > R )**

Vu que  $\vec{E}$  et  $\vec{dS}$  sont colinéaires alors  $\vec{E} \cdot \vec{dS} = E \cdot ds \cdot \cos 0 = E \cdot ds$

$$E \cdot 2\pi r h = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \iint \rho dS = \frac{\rho}{\epsilon_0} \iint dS = \frac{\rho \cdot 2\pi R h}{\epsilon_0} \quad E_{ext} = \frac{\rho R}{\epsilon_0 r}$$

$$V_{ext} = -\int \frac{\rho R}{\epsilon_0 r} dr = -\frac{\rho R}{\epsilon_0} \ln r + C_2$$

**NB :** pour le cylindre infini on ne peut pas calculer les constantes d'intégration  $C_1$  et  $C_2$ .

# Cylindre chargé en volume

- Soit un cylindre de centre  $O$ , de longueur  $h$  et de rayon  $R$ , uniformément chargé en volume, avec une densité volumique  $\rho$  constante et positive.
- En utilisant le théorème de Gauss, déterminons le champ électrostatique créé par cette distribution en tout point de l'espace ? (M à l'intérieur et à l'extérieur du cylindre).
- Dans ce cas nous avons une symétrie cylindrique et le champ est sortant (charge est positive) selon  $\vec{e}_r$ .

$$\vec{E} = E \vec{e}_r$$

- La surface de Gauss qui correspond à la symétrie du problème est un cylindre de longueur  $h$  et de rayon  $r$ . Nous avons dans ce cas trois surfaces: une surface latérale  $S_L$  et deux surfaces de bases  $S_1$  et  $S_2$
- Le flux de champ à travers les trois surfaces constitue la somme de ces flux.

Appliquons le théorème de Gauss.

- $\phi = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$

- $\phi = \sum \phi_i = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS}_1 + \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS}_2 + \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS}_L$

- Or on sait que :  $\vec{E} \perp \vec{dS}_1$  et  $\vec{E} \perp \vec{dS}_2$  et donc le champ est nul, il ne reste que le flux du champ latéral  $\vec{E} \parallel \vec{dS}_L$ .

- $\phi = \oiint \vec{E} \cdot \vec{dS}_L = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$

## 1<sup>er</sup> cas M à l'intérieur du cylindre ( r<R)

- Vu que  $\vec{E}$  et  $\vec{dS}$  sont colinéaires alors  $\vec{E} \cdot \vec{dS} = E \cdot ds \cdot \cos 0 = E \cdot dS$
- $\oiint E \cdot dS = 2\pi r h E_{\text{int}} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint \rho dv = \frac{\rho}{\epsilon_0} \iiint dv$
- $2\pi r h E_{\text{int}} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \pi r^2 h$
- $E_{\text{int}} = \frac{\rho}{2\epsilon_0} r$

$$\vec{E}_{\text{int}} = E_{\text{int}} \vec{e}_r = \frac{\rho}{2\epsilon_0} r \vec{e}_r$$

- Le potentiel  $V_1(r) = - \int E_{\text{int}} dr = - \int \frac{\rho}{2\epsilon_0} r dr = - \frac{\rho}{4\epsilon_0} r^2 + C_1$

## 2ème cas M à l'extérieur du cylindre ( r>R)

- Vu que  $\vec{E}$  et  $\vec{dS}$  sont colinéaires alors  $\vec{E} \cdot \vec{dS} = E \cdot ds \cdot \cos 0 = E \cdot dS$

- $\oiint E \cdot dS = 2\pi r h E_{\text{int}} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint \rho dv = \frac{\rho}{\epsilon_0} \iiint dv$

- $E \cdot 2\pi r h = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} = \rho \frac{\pi R^2}{\epsilon_0} h$

et  $E_{\text{ext}} = \frac{\rho R^2}{2\epsilon_0 r}$

$$\vec{E}_{\text{ext}} = E_{\text{ext}} \vec{e}_r = \frac{\rho R^2}{2\epsilon_0 r} \vec{e}_r$$

- Le potentiel  $V_2(r) = - \int E_{\text{ext}} dr = - \int \frac{\rho R^2}{2\epsilon_0 r} dr = -\frac{R\rho^2}{2\epsilon_0} \ln|r| + C_2$

**NB** : pour le cylindre infini on ne peut pas calculer les constantes d'intégration  $C_1$  et  $C_2$  .

# Pression électrostatique

- Les charges électriques situées à la surface du conducteur sont soumises aux forces répulsives de la part d'autres charges du conducteur, soit un élément de surface  $ds$  portant une charge élémentaire  $dq = \sigma ds$  le champ  $\vec{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{n}$  exerce sur la charge  $dq$  une force électrostatique  $d\vec{F} = dq\vec{E}$

$$d\vec{F} = \sigma ds \frac{\sigma}{\epsilon_0} \vec{n} = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0} \vec{n} ds$$

- La force par unité de surface c'est à dire la pression est alors donnée par :

$$P = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0}$$

# Electrocinétique

L'électrocinétique est l'étude des charges en mouvement sous l'action du champ magnétique.

Le courant électrique est un déplacement collectif et organisé des porteurs de charges (électrons ou ions). Cet écoulement de charges peut se produire dans le vide (faisceau d'électrons dans les tubes cathodiques...), ou dans la matière conductrice (les électrons dans les métaux, ou les ions dans les solutions aqueuses). Un courant électrique apparaît dans un conducteur quand une différence de potentiel est établie entre les bornes de ce dernier.

- Soit un conducteur de section  $S$ , la quantité de charge traversant  $S$  par unité de temps est appelée intensité du courant électrique et est notée  $i$  :

$$I = \frac{\delta q}{\delta t}$$

L'unité de l'intensité est l'Ampère et son symbole est  $A$  .

- Pour étudier les circuits électriques il faut définir quelques termes :
- Un dipôle est un élément de circuit relié au reste du circuit par deux bornes.
- Une branche est un ensemble de dipôles reliés par des fils de connexion et disposés en série.
- Un nœud est un point où se rejoignent au moins deux branches.
- Une maille est un ensemble de branches se refermant sur elles-mêmes.

On appelle tension ou différence de potentiel la grandeur mesurée par un voltmètre entre deux points A et B, elle s'exprime en volts noté  $V$

# Loi des nœuds

Soit un nœud  $N$  où arrivent plusieurs branches, comme il n'y a pas d'accumulation de charges en un point du circuit, il repart autant de charges d'un nœud qu'il en arrive, pendant un intervalle de temps  $dt$ .

$$\sum_{entrants} I = \sum_{Sortants} I$$

Et donc cette relation dite loi des nœuds s'écrit :

$$\sum_{K=1}^n I = 0$$

# Loi des mailles

- On choisit un sens arbitraire comme sens positif, sachant que la différence de potentiel entre un point et lui-même est nulle, on peut généraliser à n branches : loi des mailles

$$\sum_{K=1}^n U = 0$$

# Loi d'Ohm

- Soit un circuit AB de résistance R parcourue par un courant d'intensité I, la différence de potentiel entre ses bornes est donnée par

$$U = RI$$

- On peut également définir la conductance  $G$  comme l'inverse de la résistance :

$$\mathbf{G = 1/R}$$

- $G$  s'exprime en  $\Omega^{-1}$ . En convention récepteur, la loi d'Ohm s'écrit aussi :

$$\mathbf{I = G U}$$

- La puissance instantanée est par définition la quantité  $P$  :

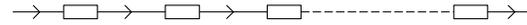
$$\mathbf{P(t) = U(t)I(t)}$$

En régime continu, l'intensité et la tension sont indépendants du temps :

$$\mathbf{P = UI}$$

# Association série et parallèle

- Association série



Cette association consiste à placer les dipôles de telle sorte que la même intensité les traverse.

- Les N dipôles sont en série si une même intensité traverse tous les dipôles :

$$i_1 = i_2 = \dots = i_N = i$$

- La tension aux bornes de l'ensemble est la somme des tensions aux bornes de chaque dipôle :

$$u = u_1 + u_2 + \dots + u_N$$

- Dans le cas où les dipôles sont des résistances  $R_1, R_2, \dots, R_N$  :

$$\mathbf{u} = R_1 \mathbf{i} + R_2 \mathbf{i} + \dots + R_N \mathbf{i} = (R_1 + R_2 + \dots + R_N) \mathbf{i}$$

$$\mathbf{R}_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$

- Ou des conductances :

$$\mathbf{G}_{\text{eq}} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \frac{1}{G_3} + \dots + \frac{1}{G_N}$$

# Association parallèle

- Cette association est la configuration où les deux dipôles ont même tension à leurs bornes.
- Les N dipôles sont placés en parallèle et ont donc la même tension aux bornes.

$$U_1 = U_2 = \dots = U_N$$

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_N$$

$$R_{\text{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

$$G_{\text{eq}} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_N$$

