



**Par A.DIB**

# L1

# Physique II

# Électricité et magnétisme

Le programme d'électricité du S2 se compose de deux grandes parties : La première comporte les éléments de base de la théorie électromagnétique : l'électrostatique que nous présentons aux Chapitres I & II et l'électromagnétisme qui fait l'objet des Chapitres IV & V. Les concepts de masse, de charge, de force, de champ, d'énergie et de potentiel, que nous introduisons dans cette partie, ont été très longs à se dessiner, au cours de l'histoire, et à être acceptés par les savants. D'autre part, il a fallu plus d'un siècle, de l'expérience de Coulomb en 1785, qui marque la naissance de cette théorie, à la parution de la théorie de la relativité restreinte en 1905, pour comprendre les lois de l'électromagnétisme. C'est la raison pour laquelle nous insistons particulièrement sur l'aspect conceptuel afin que l'étudiant puisse, dès la première année, réfléchir sur la signification des grandeurs physiques qu'il rencontre à mesure qu'il avance dans ses études. L'étudiant, qui a déjà pris connaissance de ces lois au lycée, doit les assimiler durant les trois années de la licence de physique, à l'aide d'un outil mathématique plus performant d'une année à l'autre.

En première année, il sait dériver et calculer les primitives des fonctions élémentaires, il a appris le calcul vectoriel mais ignore l'analyse vectorielle. C'est avec cet outil qu'il doit apprendre les premiers éléments de l'électromagnétisme. Les équations de Maxwell, qui expriment les lois de l'électromagnétisme, apparaissent dans ce cours sous forme intégrale et en régime quasi stationnaire. Ces équations sont appliquées à des cas où elles se ramènent à des intégrales simples que l'étudiant peut résoudre. Nous avons jugé utile d'introduire, dès la première année, les quatre grandeurs vectorielles qui apparaissent dans les équations de Maxwell : les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ , et les excitations  $\vec{D}$  et  $\vec{H}$ , la distinction entre ces grandeurs apparaîtra, en deuxième année, lors de l'étude des milieux<sup>2</sup>. La physique étant une science expérimentale, les lois de l'électromagnétisme sont mises en évidence, dans ce cours, à partir de la description d'expériences dont certaines sont faciles à réaliser.

1 L.M.D. Système d'enseignement supérieur instauré en Algérie en 2004. Le système L.M.D. comporte trois grades : La Licence (L.), préparée en trois ans (L1, L2, L3), le Master (M.) en deux ans (M1, M2) et le Doctorat (D.) en trois ans. Chaque année se compose de deux semestres, en Licence par exemple il y a six semestres (S1, S2, S3, S4, S5, S6). Le module d'électricité est enseigné en S2.

**Interaction électrique** : Electrisation, Conservation de la charge, Conducteurs et isolants, Loi de Coulomb.

**Electrostatique**: Champ et potentiel créés par une charge, principe de superposition, distribution de charges, Topographie d'un champ. Dipôle électrique : Potentiel et champ créés par un dipôle. Couple exercé sur un dipôle par un champ. Energie d'un dipôle. Notion de flux. Théorème de Gauss (sans démonstration) : applications.

Conducteurs en équilibre. Influence totale. Condensateurs : capacité, énergie électrique, groupements de condensateurs.

**Courants continus**: Rupture d'un équilibre électrostatique. Intensité électrique, Loi d'Ohm groupements de résistances. Loi de Joule. Circuits à courants continus : Générateur, récepteur. Lois de Kirchhof. Charge et décharge d'un condensateur.

**Magnétisme** : Champ créé par un aimant. Force de Lorentz, force de Laplace. Moment magnétique d'une spire, couple agissant sur une spire placée dans un champ magnétique. Loi de Biot : Applications Force entre Deux courants parallèles : définition de l'Ampère. Induction magnétique : Flux magnétique. Loi de Faraday. Générateurs de courants alternatifs. F.E.M. d'auto induction Etablissement et rupture du courant dans un circuit R, L.

**Courants alternatifs** : Représentation d'une grandeur sinusoïdale : Représentation de Fresnel, notation complexe. Impédance. Applications : Circuits R,L,C série. Circuits R,L,C parallèle. Circuit bouchon. Puissance en C.A. notation complexe. Notions sur les courants triphasés : Obtention. Représentation de Fresnel. Montages étoile et triangle. Puissance en triphasé.

**Ouvrages conseillés** : 1°) Cours polycopié OPU Electricité : Caubarère, , Fourny, Ladjouze 2°) Alonso & Fynn Physique Tome 2

## Principales notations

A, B, C, D etc : Points de l'espace

M Point où est calculé le champ  $\vec{E}$  ou  $\vec{B}$

P Point où se trouvent les sources  $\rho$  ou  $\vec{J}$

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  Vecteurs unitaires, en coordonnées cartésiennes.

x, y, z Coordonnées cartésiennes d'un point

X, Y, Z Composantes d'un vecteur, en coordonnées cartésiennes.

$\vec{a}$  Accélération

$\vec{B}$  champ magnétique

$\vec{C}$  capacité

$\vec{D}$  Excitation électrique

$\vec{E}$  champ électrique

$\vec{E}_m$  champ électromoteur

E Energie

e force électromotrice (f.e.m)

e charge de l'électron

f fréquence

$\vec{F}$  Force

$\vec{g}$  Champ de la pesanteur

$\vec{H}$  Excitation magnétique

$I$  Intensité du courant électrique

$\vec{J}$  Vecteur densité de courant

J Moment d'inertie

T Période

T° Température

t Temps

$\vec{u}$  vecteur unitaire

V, U potentiel électrique

V Volume

$\vec{V}$  ou  $\vec{v}$  Vitesse

W travail

X Réactance

Y Admittance

Z Impédance

$\alpha, \beta$  Angles

$\vec{\Gamma}$  Couple

$\epsilon$  Permittivité électrique

$\eta$  Coefficient de viscosité, Rendement

$j = \sqrt{-1}$

K ou k Coefficient

L Coefficient de self induction

M Coefficient d'induction mutuelle

$\vec{M}$  Moment magnétique F / O

$\vec{M}_{\vec{F}/O}$  Moment d'une force / au point O.

$\vec{M}_{\vec{F}/\Delta}$  Moment d'une force / à l'axe  $\Delta$ .

m Masse

$\vec{n}$  vecteur unitaire

$\mathcal{P}$  Puissance

$\vec{M}$  Moment électrique

Q ou q Charge électrique

R Résistance électrique

$\vec{R}$  ou  $\vec{r}$  Vecteur position

$\Theta$  Angle

$\lambda$  Longueur d'onde

$\mu$  Perméabilité magnétique

$\pi$  Nombre "Pi"

$\rho$  Densité de charges volumiques

$\rho_m$  Masse volumique

$\rho_\Omega$  Résistivité électrique.

$\sigma$  Densité de charges superficielles

$\sigma$  Conductivité électrique

$\tau$  Constante de temps

$\varphi$  Phase ou déphasage

$\phi$  Flux magnétique

$\omega$  Pulsation ou Vitesse angulaire

$\Omega$  Unité de résistance : Ohm.

Maxwell a introduit en électromagnétisme un vecteur  $\vec{D}$  qu'il a appelé déplacement électrique. Celui-ci est relié au champ électrique par l'expression :  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$

$\vec{D}$  est relié aux charges sources  $\rho$ .

N.B. Le vecteur  $\vec{H}$  a été longtemps appelé "champ magnétique" et le vecteur  $\vec{B}$  "induction magnétique". Or c'est le vecteur  $\vec{B}$  qui est à l'origine de la force qui agit sur une charge q (force de Laplace) ; c'est donc  $\vec{B}$  qui est le champ.

$\vec{B} = \mu \vec{H}$   $\vec{H}$  est relié aux courants sources  $j$

# Interaction électrostatique

# UN PEU D'HISTORIQUE

Nous commencerons par faire un bref rappel historique des différentes découvertes réalisées dans le domaine de l'électricité.

**1785 – 1791** : Coulomb va découvrir, grâce à une balance de torsion de sa conception, les lois quantitatives d'attraction électrostatiques et magnétiques qui portent son nom.

**1827** : Ohm énonce une loi qui porte aujourd'hui son nom selon laquelle le courant électrique est égal à la tension (ou la différence de potentiel) divisée par la résistance du circuit.

**1831**: Faraday découvre l'induction électromagnétique qui permettra la construction des dynamos.

**1865**: James Clark Maxwell élaboration des célèbres équations différentielles décrivant la nature des champs électromagnétiques dans l'espace et le temps.

**1897** : Joseph John Thomson découvre l'électron ("atome d'électricité").

**1904** : Détermination de la charge de l'électron par le même J.J. Thomson.

# Description des phénomènes d'électrisation

Considérons une expérience très simple. Imaginons qu'après avoir peigné nos cheveux, un jour très sec, nous approchons le peigne de petits morceaux de papier. Nous observons qu'ils sont rapidement attirés par le peigne.

Sur la photo les cheveux ont la même électrisation donc ils se hérissent

Un phénomène identique se produit si nous frottons une baguette de verre avec un morceau de soie.

Nous pouvons conclure que, sous l'effet du frottement, ces matériaux acquièrent une nouvelle propriété que nous pouvons appeler électricité (du mot grec *élektron* qui signifie ambre) et que cette propriété électrique donne naissance à une interaction différente de la gravitation et que nous appelons interaction électrique.

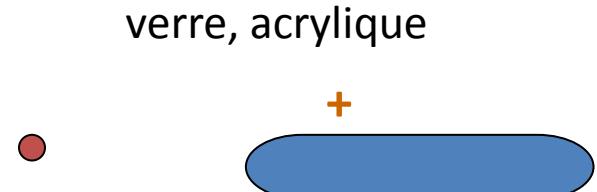
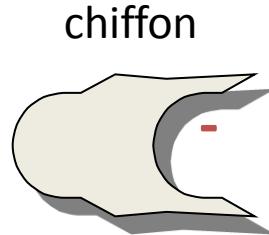
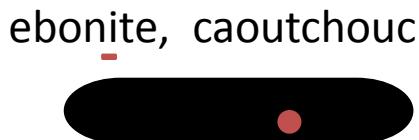
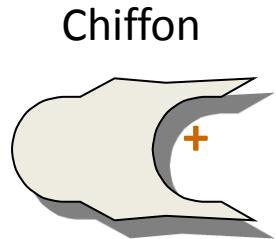
**Les grecs ont découvert l' électricité en frottant un bâton d'ambre.**

Nous dirons qu'un corps est électrisé lorsqu'il possède la propriété d'attirer des corps légers. D'une manière générale tous les corps s'électrisent: -par frottement,-par contact avec un corps déjà électrisé,-en reliant le corps à une borne d'un générateur électrique.



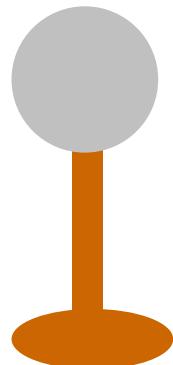
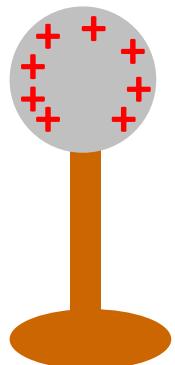
# Electrisation

- Un corps est électrisé lorsqu'il possède la propriété d'attirer des corps léger.
- électrisation par **frottement**: ébonite caoutchouc

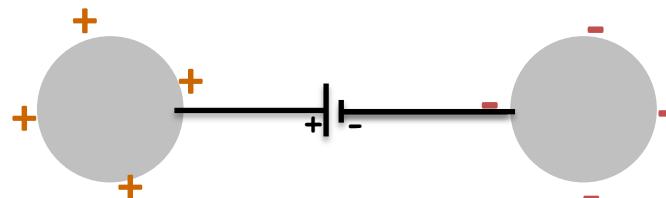


Les frottements communiquent à certains corps la faculté d'attirer des corps légers. Nous dirons que le corps frotté a été électrisé ou qu'il s'est électriquement chargé par frottement.

- électrisation par **contacte** avec un autre corps:



- électrisation en reliant le corps à un **Générateur**:



Un corps est dit électrisé s'il possède la propriété d'attirer ou de repousser des corps plus légers



PapierLavi

## Classement des corps:

**ISOLANT:** Un corps est un isolant si l'électrisation reste localisée au point de contact (ou diélectrique) verre, nylon, plastique.

**CONDUCTEUR:** Ceux pour lesquels l'électrisation se répand en tous les points sont des conducteurs.

D'après ces expériences on peut ranger les corps très schématiquement en deux classes : -les isolants ou diélectrique, exemple: verre, nylon, plastique.  
-les conducteurs, exemples: métaux, terre, eau, corps humain.

Il est possible d'électriser par frottement une baguette de verre en la tenant à la main. On ne peut le faire pour une baguette de cuivre, car l'électrisation se répand dans le sol par l'intermédiaire du corps humain. Par contre si on tient cette baguette de cuivre avec un manche isolant on peut électriser le cuivre par frottement.

**En fait le conducteur et l'isolant parfaits n'existent pas .**

Une nouvelle répartition doit se faire entre corps électrisés lorsqu'on étudie expérimentalement les forces agissant entre eux.

Après plusieurs expériences d'électrisation, les corps ont été classés sur une liste: dite liste triboélectrique. Quelques exemples de produits tels que le mica, l'ambre et l'ébonite.



Mica



Ambre



Ebonite

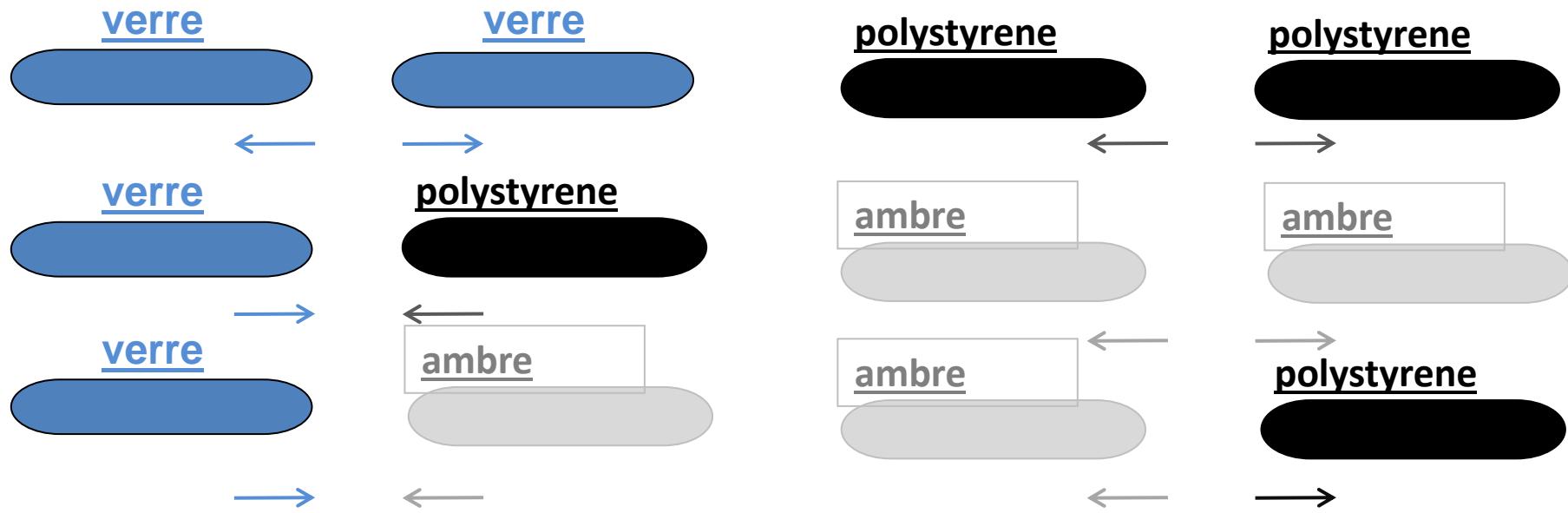
## LISTE TRIBOELECTRIQUE

### Matières positives

mains sèches  
fourrure de lapin  
verre  
cheveux  
nylon  
laine  
fourrure de chat  
plomb  
soie  
aluminium  
papier  
coton  
acier, inox  
bois, ambre, résine  
soufre  
caoutchouc dur (ébonite)  
nickel, cuivre  
laiton, argent  
or, platine  
polyester  
polystyrène  
polyuréthane  
polyéthylène (ruban de scotch)  
polypropylène  
polychlorure de vinyle (PVC)  
silicone  
téflon

### Matières négatives

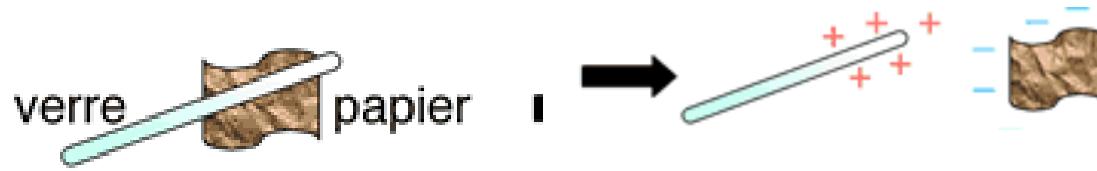
# Expériences:



Le comportement de l'ambre est le même que celui du polystyrène (l'ambre et le polystyrène sont du même type).

On est amené à admettre l'existence de deux sortes d'électricité:  
L'une vitreuse ou positive et l'autre résineuse ou négative.

**Deux corps porteurs d'électricité de même signe se repoussent. Deux porteurs d'électricité de signe contraire s'attirent.**



LISTE TRIBOELECTRIQUE: **lapin**-verre-papier

Du verre frotté contre de la fourrure de lapin : verre négative et fourrure positive

Du verre frotté sur du papier : verre positif et papier négatif

De l'ébonite contre de la fourrure de chat : ébonite négative et fourrure positive

Si on frotte deux corps de cette liste entre eux, celui qui se **trouve avant sur la liste** se charge positivement et **celui qui le suit** se charge négativement :

### Matières positives

- mains sèches
- fourrure de lapin
- verre
- cheveux
- nylon
- laine
- fourrure de chat
- plomb
- soie
- aluminium
- papier
- coton
- acier, inox
- bois, ambre, résine
- soufre
- caoutchouc dur (ébonite)
- nickel, cuivre
- laiton, argent
- or, platine
- polyester
- polystyrène
- polyuréthane
- polyéthylène (ruban de scotch)
- polypropylène
- polychlorure de vinyle (PVC)
- silicone
- téflon

### Matières négatives

# Interprétation, structure de la matière:

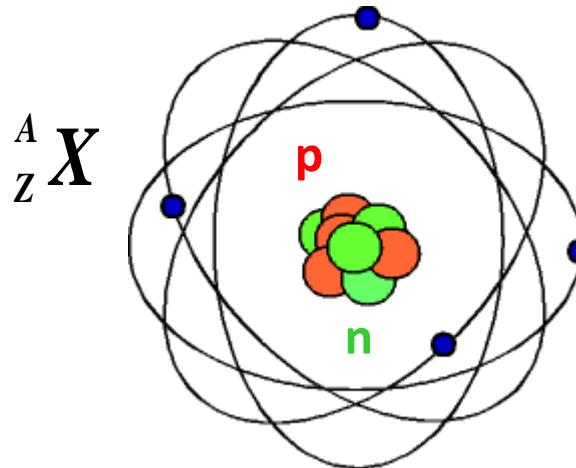
Rappelons que, selon le modèle admis, un **atome(X)** neutre comprend:

- un noyau constitué de  $Z$  protons (de charge  $+e$ ) et de  $N$  neutrons neutre, électriquement neutre de même masse que le proton).
- électrons: particules de charge  $-e$  et dont la masse est 1836 fois plus faible que celle des nucléon. Elles gravitent autour du noyau.

La cohésions des protons et des neutrons: (interaction très forte)

L'interaction entre le noyau et les électrons assure la stabilité de l'atome.

La charge du proton:  $e$ , et la charge de l'électron:  $-e$ , avec  $e=1.602 \ 10^{-19} C$ .



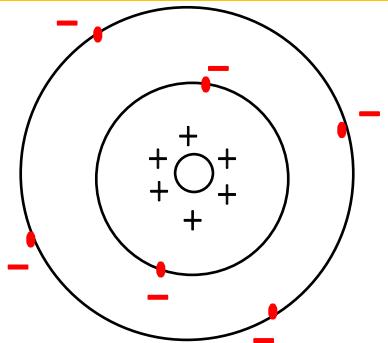
$$m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}; \quad m_p = 1836 \times m_e = 1.6 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

L'atome noté  ${}^A_Z X$  : est constitué d'un noyau contenant  $Z$  protons et  $N=A-Z$  neutrons, entouré d'un nuage de  $Z$  électrons.

**La charge électrique totale d'un système isolé reste constante.**

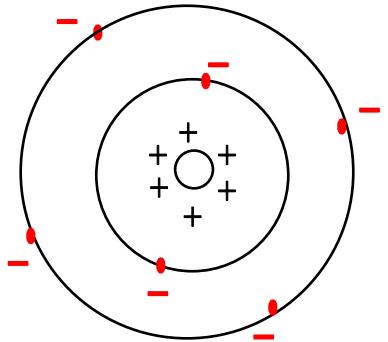
Il est difficile de modifier le noyau d'un atome. Les électrons les plus éloignés sont arrachés:

Une atome est dit neutre s'il contient autant de protons que d'électrons.

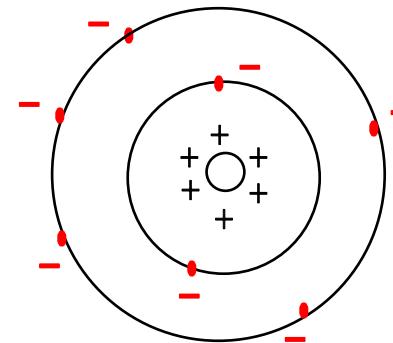


Atome neutre:  $6(-e)+6 (+e)$

S'il perd un électron il devient un ion positif.



Ion positif:  $5(-e)+6 (+e)$

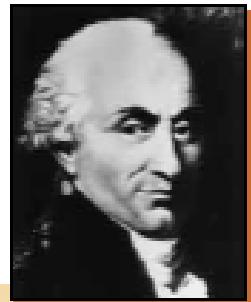


S'il gagne un électron il est un ion négatif

Ion négatif:  $7(-e)+6 (+e)$

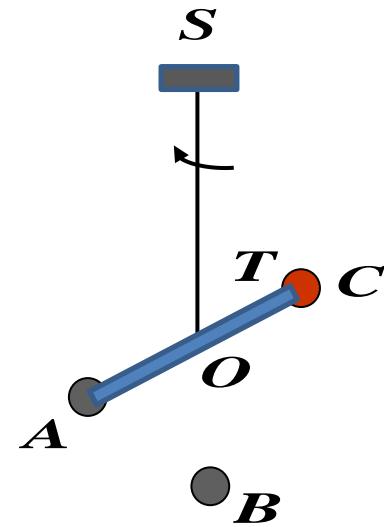
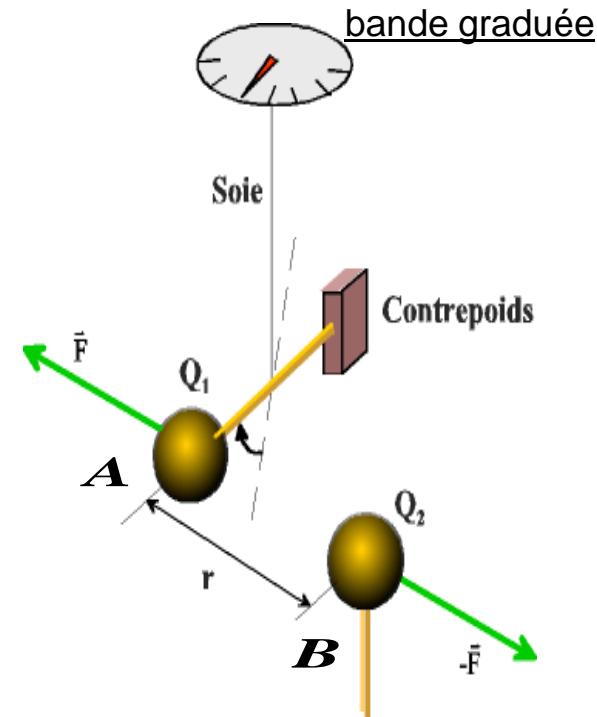
Le transfert d'électrons se fait sans Transfer de masse.

# Définition de la charge comme grandeur mesurable:



Charles Coulomb (1736–1806)

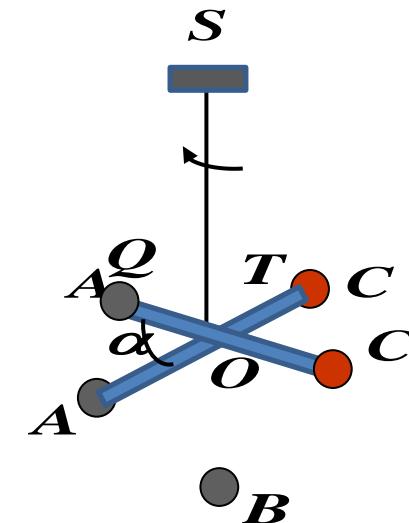
Coulomb a effectué, en 1785, une série de mesures, à l'aide d'une **balance de torsion**, qui lui ont permis de déterminer les caractéristiques de la force d'interaction électrostatique entre deux charges ponctuelles  $Q_1$  et  $Q_2$ , séparées par une distance  $r$ .



Enceinte en verre

Le pendule de torsion, qui est représenté sur la figure et qui constitue l'élément principal de la balance de Coulomb, comporte une tige T, isolante, horizontale, très légère, munie, à une extrémité, d'une petite sphère métallique A et à l'autre extrémité d'un contrepoids isolant C.

Elle est suspendue en son milieu O à un support S fixe, par un fil en soie de longueur  $l$  et de constante de torsion C. La boule A, complètement déchargée, se trouve initialement en un point correspondant à un angle de torsion nul ( $\alpha = 0$ ). Le système est en équilibre.



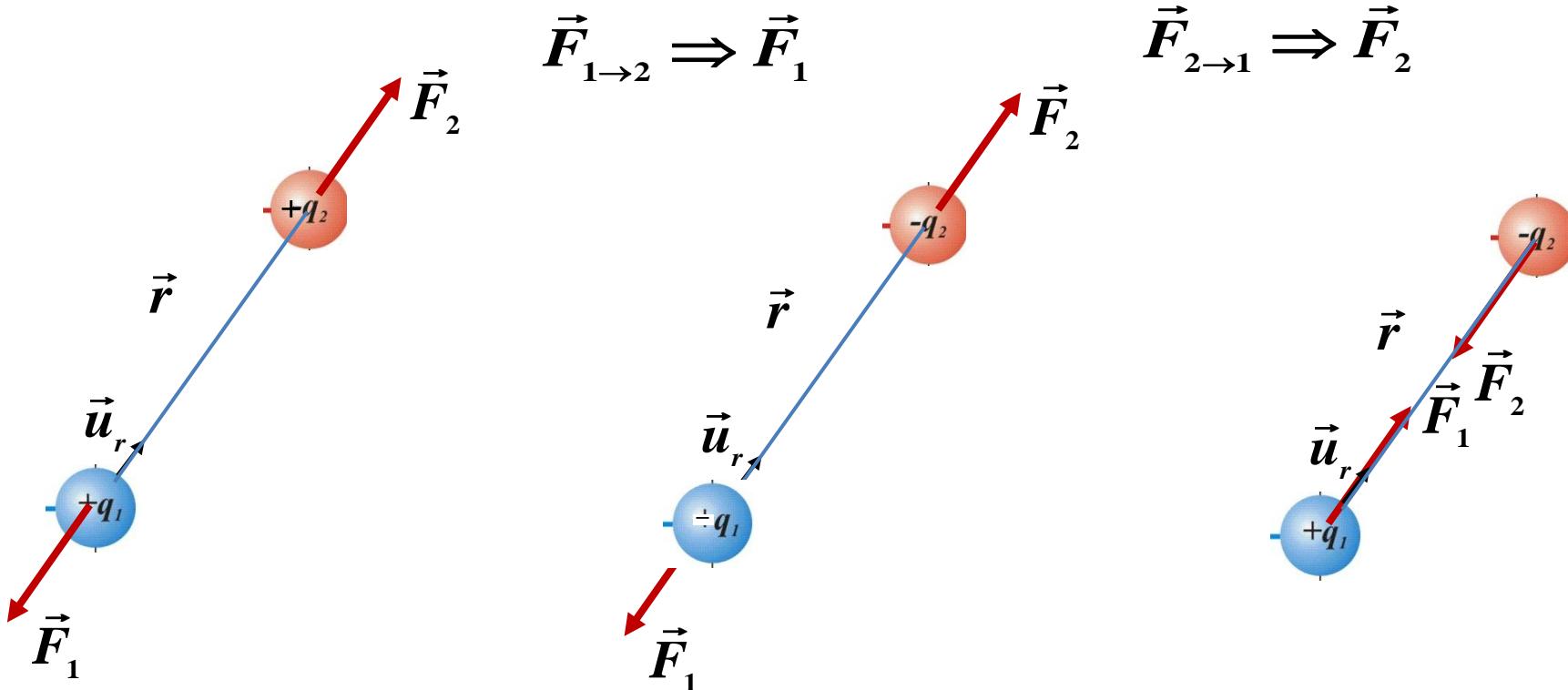
On met A en contact avec une boule B identique à A et portant une charge  $+Q$ . Il en résulte une électrisation de A qui tourne d'un angle  $\alpha$  par rapport à sa position initiale. Le système atteint, alors, une seconde position d'équilibre. **Calculer la valeur de la charge Q.**

Dans l'expérience de Coulomb, ce pendule est placé à l'intérieur d'une enceinte en verre. Les déviations sont repérées sur une bande graduée. La boule B est introduite, à l'aide d'une tige isolante, à travers un orifice percé dans le couvercle, comme le montre la figure précédente.

**Le concept de charge électrique :** Les résultats des expériences précédentes ont amené les savants à introduire le concept de charge électrique confirmé par les travaux de Coulomb et surtout par la découverte de l'électron en 1881 par Joseph J. Thomson. La charge électrique, qui caractérise le phénomène d'électrisation, ne peut être dissociée de la matière. Elle existe sous deux formes, qualifiées de positive et de négative. Les expériences précédentes permettent d'énoncer la loi suivante:

Deux charges électriques de même signe positif ou négatif, se repoussent ; par contre elles s'attirent si elles sont de signes contraires.

$\vec{F}_1$  désigne la force exercée par la charge  $q_1$  sur la charge  $q_2$  et  $\vec{u}_1$  un vecteur unitaire porté par la droite qui joint les deux charges et orienté de  $q_1$  vers  $q_2$  (figures ).



Ces expériences ont mis en évidence une analogie avec la loi de la gravitation universelle de Newton, Coulomb a alors proposé l'expression mathématique :

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}$$

K une constante. Lorsque le système MKSA rationnalisé fut approuvé en 1946, on attribua à cette constante la valeur

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

$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9}$  est la permittivité électrique du vide. Elle est mesurée, dans ce système, en farad par mètre : F/m

- $\vec{F}$  a même direction que la droite qui porte les deux charges.
- $\vec{F}$  Varie en  $1/r^2$ .
- Si  $q_1 q_2 > 0$  : forces répulsives.
- Si  $q_1 q_2 < 0$  : forces attractives.

**Le concept de charge ponctuelle** : Comme pour la masse, on introduit le concept de charge ponctuelle. C'est une charge dont les dimensions sont suffisamment petites par rapport aux distances d'observation pour être assimilée à un point géométrique. La charge électrique est une grandeur mesurable.

Pour définir de manière utilisable la charge d'un corps électrisé nous adoptant le procédé suivant: nous choisissons un corps arbitraire de charge  $Q$  et nous plaçons à une distance  $r$  une charge  $q$ . Nous mesurons alors la force  $F$  qui s'exerce sur  $Q$ . Nous plaçons ensuite une charge  $q'$  à la place de  $q$ , nous mesurons la force  $F'$ .

Nous constatons que  $(q/q') = (F/F')$ , donc les charges  $q$  et  $q'$  sont proportionnelles aux forces. Nous attribuons arbitrairement à  $q'$  la valeur unité, on peut mesurer  $q$ .

## Conservation de la charge électrique:

**Nous admettons comme principe: la charge totale contenue dans un système isolé (charges + et -) reste constante.**

## Loi de coulomb dans le vide:

- Cette loi sera admise comme hypothèse fondamentale: sa vérification est très imprécise, seules ses conséquences constituent une vérification satisfaisante.
- Une charge ponctuelle n'existe pas (les dimensions du corps chargé sont très petites par rapport aux dimensions considérées).

## Ordre de grandeur des forces électrostatiques:

Au niveau microscopiques: dans un atome d' hydrogène le proton et l' électron s' attirent avec  $F=10^{-7}(\text{N})$ , avec  $r=5 \cdot 10^{-11}(\text{m})$ ,  $q=1.6 \cdot 10^{-19}(\text{C})$ .

La force gravitationnelle entre le proton et l' électron est:  $F=4 \cdot 10^{-47}(\text{N})$  avec  $G=6.6 \cdot 10^{-11}$ .  $P_e=9 \cdot 10^{-30}(\text{N})$ .  $P_p=1.6 \cdot 10^{-26}(\text{N})$ .

Au niveau microscopiques on peut négliger le poids et la force gravitationnelle

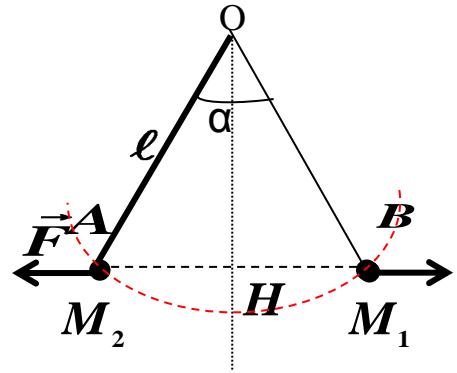
Au niveau macroscopiques: les forces électrostatiques sont faibles par rapport aux poids car les distances sont grandes.

## Validité de la loi de coulomb:

-**Valable** pour des charges aux repos ou en mouvement très lent.

-**Applicable** jusqu'à des distances interatomiques de l' ordre de  $10^{-11}(\text{m})$ .

La figure ci-contre correspond à la 2ème position d'équilibre du pendule. Le moment  $\vec{M}_{\vec{F}/\Delta}$  de la force  $\vec{F}$ , par rapport à l'axe de rotation  $\Delta$ , est équilibré par le couple de torsion :  $\Gamma = C\alpha$  du fil. La force de Coulomb a pour expression :  $F = k \frac{q^2}{d^2}$



$$d = 2(M_1 H) = 2\left(\ell \sin \frac{\alpha}{2}\right) \Rightarrow F = 9 \cdot 10^9 \frac{q^2}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{q^2}{4\ell^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}$$

$$|\vec{M}_{\vec{F}/\Delta}| = F \cdot OH = 9 \cdot 10^9 \frac{q^2}{4\ell^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \cdot \ell \cos \frac{\alpha}{2} = 9 \cdot 10^9 \frac{q^2}{4\ell \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \cos \frac{\alpha}{2}$$

A l'équilibre  $|\vec{M}_{\vec{F}/\Delta}| = \Gamma = C\alpha \Rightarrow q = \sqrt{\frac{C\alpha \cdot 4\ell \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{9 \cdot 10^9 \cos \frac{\alpha}{2}}}$

Au paragraphe précédent, nous avons utilisé le concept de force d'interaction. Dans le cas de deux charges électriques par exemple, chacune des charges exerce sur l'autre une force dont l'expression mathématique est donnée par la loi de Coulomb. En vertu du principe de l'action et de la réaction de Newton, la seconde charge exerce sur la première une force égale et opposée. Ainsi les deux charges jouent le même rôle. En outre, cette interaction est, comme nous l'avons vu, instantanée.

Avec le concept de champ, le problème est posé d'une façon différente. Une charge électrique **Q, appelée "charge source"**, crée, dans l'espace qui l'entour, un "**état physique**", appelé "**champ électrique**", qui est mis en évidence par son **action sur toute autre charge**  $q$  placée en un point  $M$  de cet espace.

Cet "**état**" existe même en l'absence de la charge  $q$ . Les charges  $Q$  et  $q$  ne jouent plus ici le même rôle :  $Q$  est la charge source du champ électrique qu'elle crée et  $q$  la charge dont le comportement, dans ce champ, sera étudié.