

## Chapitre 1

## Force et charge électrostatiques

## 1. Généralités

## a. Introduction

Les phénomènes électrostatiques sont des phénomènes naturels que l'homme rencontre dans sa vie quotidienne comme, par exemple :

- L'éclair,
- La foudre,
- L'attraction de petits objets en papier par des corps frottés,
- L'écartement d'un filet d'eau par un peigne après avoir peigner les cheveux ...etc.

Thalès de Milet (vers 600 ans avant J.C.) fût le premier à constater qu'une baguette d'ambre frottée attire des morceaux de paille.



Le mot "électricité" vient du grec "elektron" qui signifie "ambre".

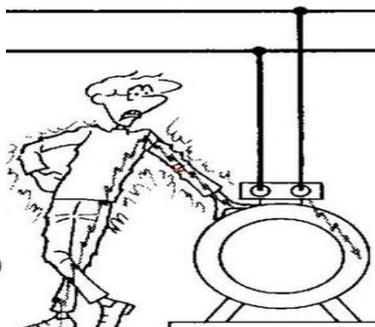
L'**électrostatique** est l'étude de l'électricité à l'état statique (au repos) tandis que l'**électrocinétique** est l'étude des charges électriques en mouvement.

## b. Processus d'électrisation

L'électricité statique est obtenue par **frottement** ou par **contact**.



Par frottement



Par contact

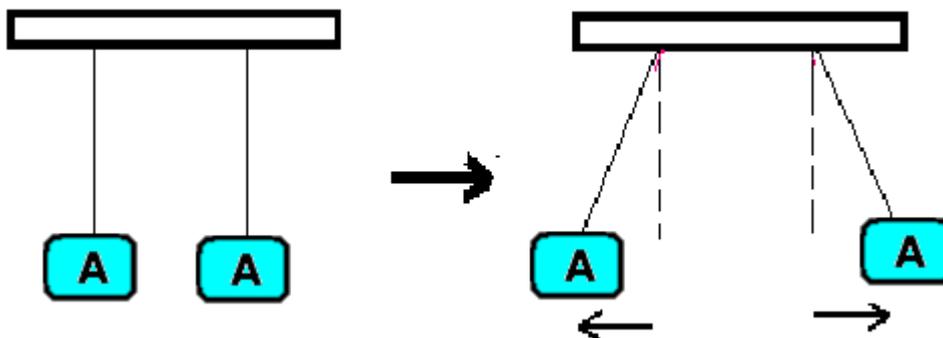
### 1. Electrification par frottement

Soient :

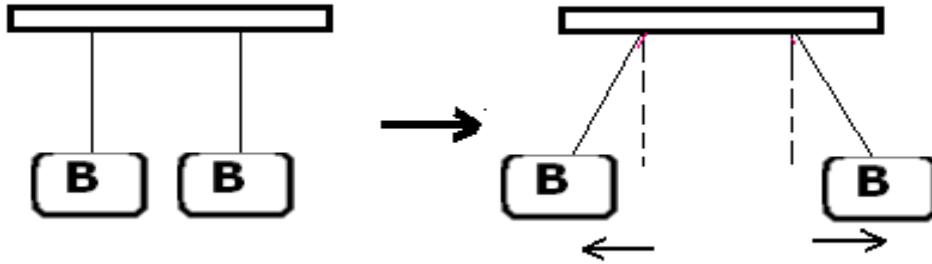


2 baguettes en verre (A) frottées avec de la soie et 2 baguettes d'ambre (B) frottées avec de la fourrure.

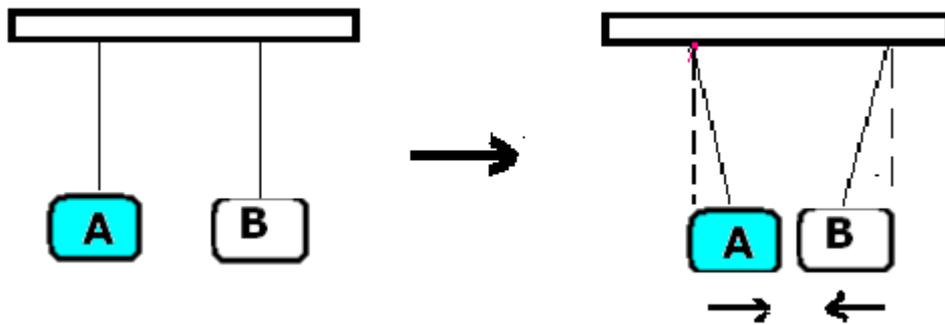
On réalise les expériences suivantes :



Les 2 baguettes de verre frottées avec de la soie se repoussent, c'est le phénomène de **répulsion**.



Les 2 baguettes d’ambre frottées avec de la fourrure se repoussent, c’est le phénomène de **répulsion**.



Les 2 baguettes d’ambre frottée avec de la fourrure (B) et de verre frottée avec de la soie (A) s’attirent, c’est le phénomène d’**attraction**.

Ces deux phénomènes sont des processus d’électrisation par frottement.

Dans la nature, il y a 2 types d’électricité : une électricité négative (ambre) et une électricité positive (verre). On aurait pu les appeler, par exemple, " électricité verte" et "électricité rouge".



**2. Electrification par contact**

Soient les corps suivants :

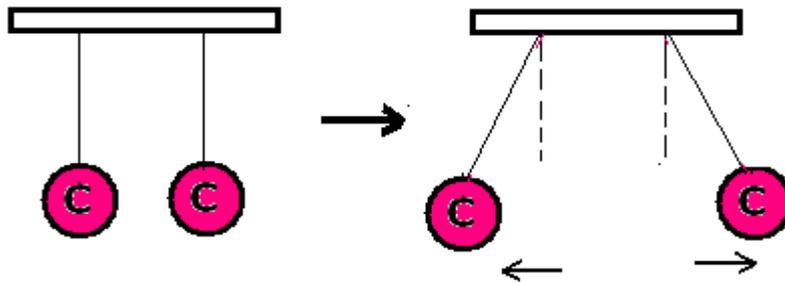
Deux (2) boules de liège ayant subi un contact avec A (déjà frotté avec de la soie).



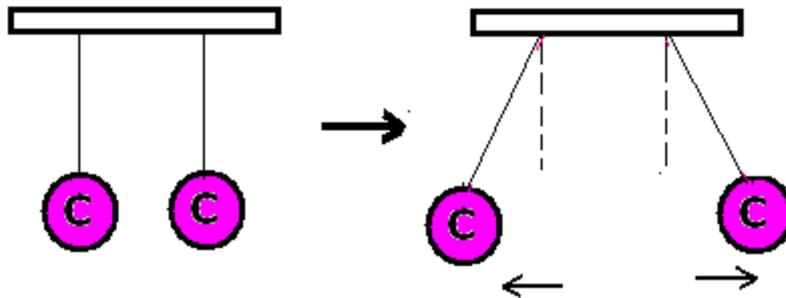
Deux autres boules de liège ayant subi un contact avec B (déjà frotté avec de la fourrure).



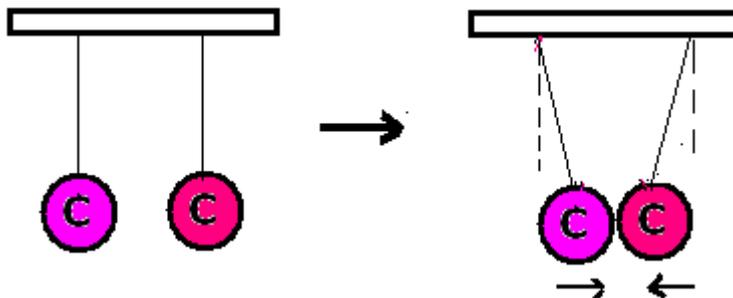
On réalise les expériences suivantes :



Les boules qui ont subi un contact avec la baguette de verre frottée avec de la soie se repoussent. C'est un phénomène de **répulsion**.



Les boules qui ont subi un contact avec la baguette d'ambre frottée avec de la fourrure se repoussent. C'est un phénomène de **répulsion**.



Les boules qui ont subi un contact avec la baguette de verre frottée avec de la soie et avec la baguette d'ambre frottée avec de la fourrure, s'attirent. C'est un phénomène d'attraction.

Ces deux phénomènes sont des processus **d'électrisation par contact**.

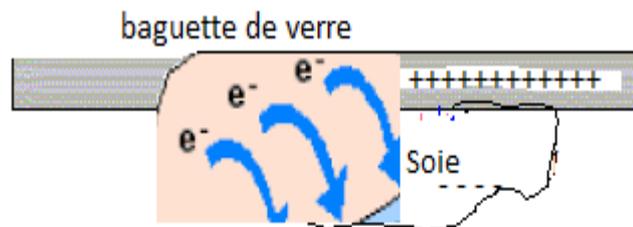
On constate d'après ces expériences que : Deux charges de même nature (même signe) se repoussent et deux charges de nature différente s'attirent.

### c. Origine d'électrisation

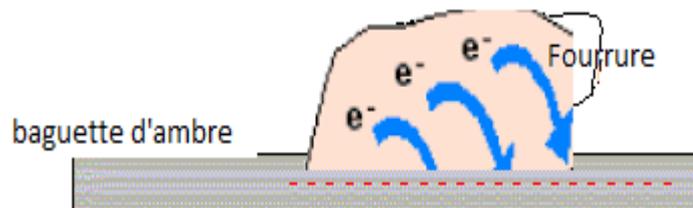
Les processus d'électrisation s'expliquent par le transfert de charges élémentaires (électrons).

#### Dans le cas du frottement :

Baguette de verre + soie : les électrons passent du verre vers la soie, donc le verre est chargé positivement et la soie négativement.

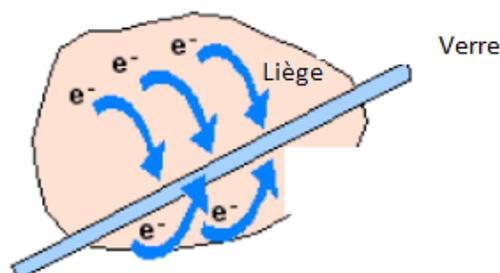


Baguette d'ambre + fourrure : les électrons passent de la fourrure vers l'ambre, donc la fourrure est chargée positivement et l'ambre négativement.



#### Dans le cas d'électrisation par contact :

Si on met en contact une boule de liège avec du verre préalablement frotté avec de la soie, les électrons vont passer de la boule vers le verre, de sorte que, après le contact, le verre deviendra neutre.



Les électrons vont passer du liège vers le vers chargé (frotté avec de la soie). Le verre redeviendra alors neutre.

#### d. Série triboélectrique

C'est une série de matériaux naturels ou synthétiques obtenue expérimentalement :

##### La série triboélectrique

Peau humaine sèche  
 Fourrure de lapin  
 Verre quart  
 Nylon  
 Laine  
 Fourrure de chat  
 Soie  
 Aluminium  
 Papier  
 Coton  
 Acier  
 Bois  
 Ambre  
 Cuivre  
 Argent  
 Or  
 Platine  
 Polystyrène  
 Cellophane  
 PVC (plastique)  
 Silicone  
 Téflon  
 Ébonite  
 Caoutchouc de silicone

La flèche indique le sens de transfert d'électrons quand deux corps de cette liste sont frottés l'un contre l'autre. Par exemple si on frotte un bâton d'ébonite contre du polystyrène ; le polystyrène cède des électrons au bâton d'ébonite qui devient chargé négativement. « En terme mnémotechnique la substance d'en haut fait tomber des électrons sur la substance d'en bas ».

#### e. Charges électriques

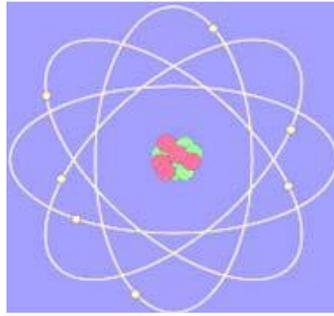
Du point de vue électrique, dans la nature, il existe 3 types de corps :

- Corps **électriquement neutre** : le nombre de charges positives est égal au nombre de charges négatives.
- Corps **électriquement positif** : le nombre de charges positives est supérieur au nombre de charges négatives.
- Corps **électriquement négatif** : le nombre de charges positives est inférieur au nombre de charges négatives.

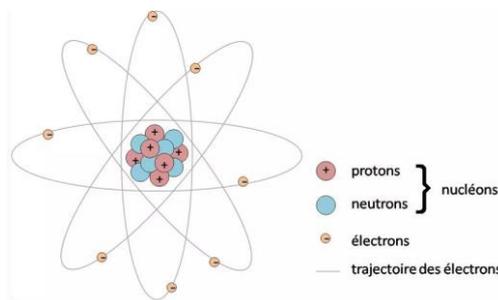
#### f. Structure de la matière :

La matière est constituée d'**atomes**, d'**ions** et de **molécules**. Chaque atome est composé d'un noyau autour duquel gravitent des électrons. Electriquement, l'atome est neutre.

L'électron (découvert en 1909 par **Millikan**) est la charge élémentaire négative et vaut  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  C (Coulombs).



Le noyau (découvert en 1911 par **Rutherford**) est constitué de particules chargées positivement (protons) et de particules électriquement neutres (**neutrons**). Ces derniers ont été découverts par **Chadwick** en 1932.



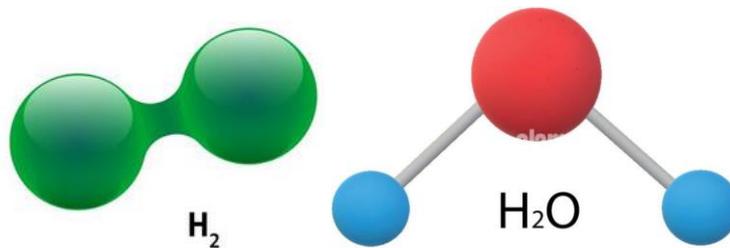
Les protons et les neutrons sont appelés "nucléons".

**Symbole de l'atome :**

Z= nombre d'électrons  
 A= nombre de nucléons  
 N= A-Z = nombre de neutrons



Dans la nature il y a des molécules simples (composées de mêmes atomes comme H<sub>2</sub>) et des molécules composées (constituées d'atomes différents : H<sub>2</sub>O).



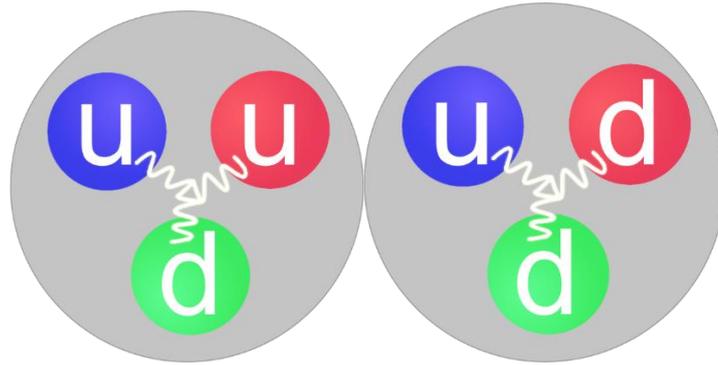
Particule	Charge	Masse
Electron	$-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Proton	$+1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Neutron	0 C	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

N.B: La masse du proton est **1850** fois plus grande que celle de l'électron.

Les baryons sont les protons et les neutrons. Chaque baryon est constitué de 3 quarks.

Il existe 2 types de quarks : les quarks up ou quarks  $U$  de charge  $+2e/3$  et les quarks down ou quark  $d$  de charge  $-e/3$ .

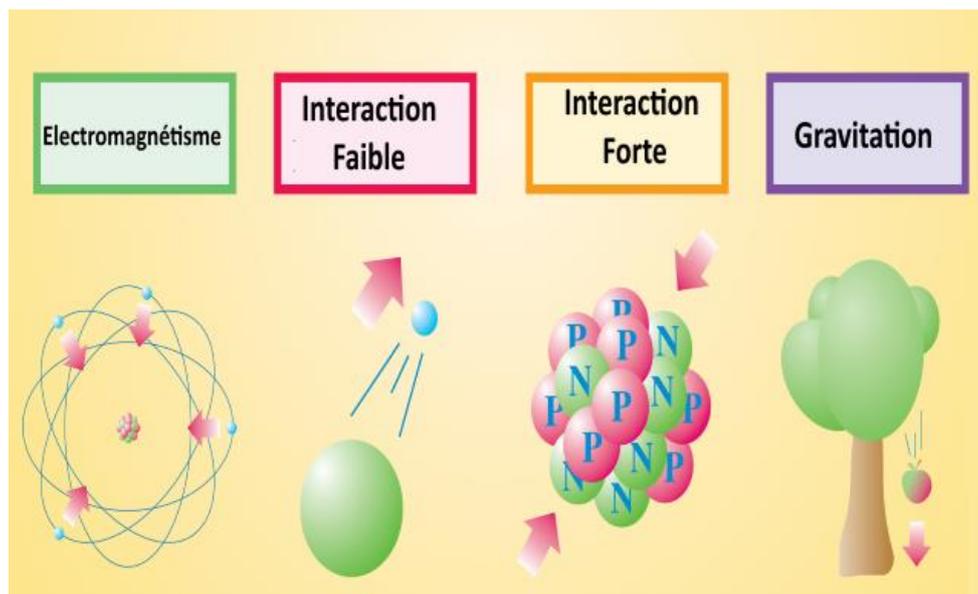
- Un proton est constitué de 2 quarks  $U$  et d'un quark  $d$ , ce qui donne une charge de proton égale à :  $2e/3 + 2e/3 - e/3 = +e$ .
- Un neutron est constitué de 2 quarks  $d$  et d'un quark  $U$ , ce qui donne une charge de neutron égale à :  $2e/3 - e/3 - e/3 = 0$



#### g. Les 4 forces de la Nature

Dans la nature il y a 4 types de forces dont " " sont d'origine électriques :

- Forces **nucléaires fortes** : assurent la cohésion des baryons (quark-quark)
- Forces **nucléaires faibles** : assurent la cohésion du noyau (proton-neutron)
- Forces **électromagnétiques** : assurent la cohésion de l'atome (noyau-électrons-quark)
- Forces **gravitationnelles** : assurent la cohésion à grande échelle de l'Univers.



## 2. Loi de Coulomb

### a. Définition

**Rappels sur la loi de gravitation universelle :**

Deux corps de masse  $m_1$  et  $m_2$ , distants de  $d$ , s'attirent mutuellement par une force radiale dont le module

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \text{ est :}$$

Où  $G$  est la constante de gravitation universelle ( $G = 6.67 \cdot 10^{-11}$  SI (N.m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>))

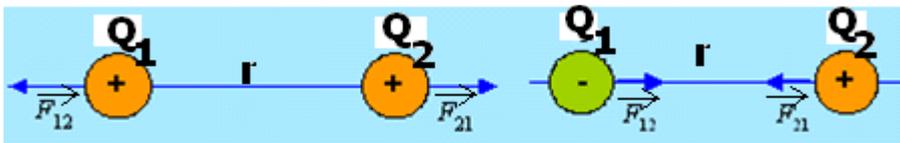
Si, par exemple,  $M$  est la masse de la Terre ( $M = 6 \cdot 10^{24}$  kg) et  $R$  son rayon ( $R = 6400$  km), la force gravitationnelle est :

$$F = G \frac{m_1 M}{R^2} = m_1 g$$

Sur la surface de la Terre  $F$  représente le poids du corps de masse  $m_1$ .

### Force électrique entre 2 charges : Loi de Coulomb

Deux charges électrique  $Q_1$  et  $Q_2$ , distantes de  $r$ , s'attirent ou se repoussent mutuellement par une force  $F$  telle que :



- $\vec{F}$  est radiale (dirigée suivant la droite joignant les 2 charges)
- $F$  est proportionnelle à  $Q_1$
- $F$  est proportionnelle à  $Q_2$
- $F$  est proportionnelle à  $r^2$

Donc le module de cette force est :

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Avec :  $k = 1/4\pi\epsilon_0 = 9 \cdot 10^9$  SI (N.m<sup>2</sup>.C<sup>-2</sup>)

Où  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide (elle se mesure en farads par coulomb (F/C)).

Cette formule est valable :

- dans le vide
- Les charges sont sphériques
- Les charges sont immobiles.

**Remarque :**

Dans un milieu matériel (autre que le vide), on remplace dans l'expression de  $k$ ,  $\epsilon_0$  par  $\epsilon$ .

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon} = 1/4\pi\epsilon_r\epsilon_0$$

Où  $\epsilon$  est la permittivité du milieu matériel ( $\epsilon = \epsilon_r\epsilon_0$ ),  $\epsilon_r$  est la permittivité relative du milieu. La permittivité du vide est  $\epsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12} SI$ .

**Force électrique exercées par plusieurs charges : Principe de superposition**

Soient 4 charges  $q_1, q_2, q_3$  et  $q_4$ .

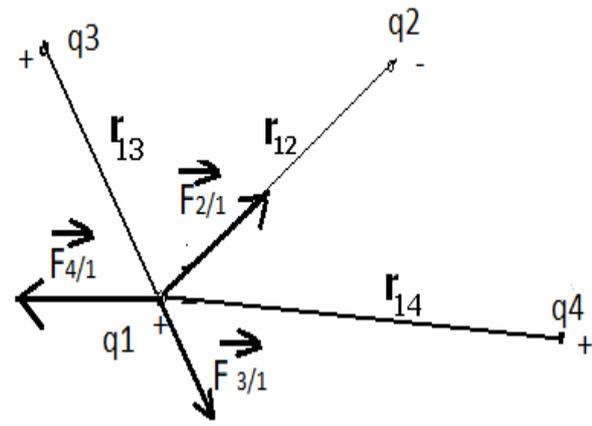
Chaque charge exerce une force électrostatique sur la charge  $q_1$ .

Pour tracer les vecteurs forces on suppose que la charge  $q_2$  est (-) et les autres sont (+). La force résultante exercée sur la charge  $q_1$  est :

$$\vec{F} = \vec{F}_{2/1} + \vec{F}_{3/1} + \vec{F}_{4/1}$$

Donc :

$$\vec{F} = \sum_{i=2}^{i=4} \vec{F}_{i/1}$$



C'est le principe de superposition

**b. Exemples :**

**Exemple 1 :**

Soient 2 électrons dans le vide et distants de  $r$ . Comparez les forces gravitationnelle et électrique qui s'exercent sur ces 2 particules.

On a :  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} kg$  et  $Q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$



**Réponse :**

La force électrique est répulsive et vaut:  $F_e = k \frac{Q^2}{r^2}$

La force gravitationnelle est attractive et vaut:  $F_g = G \frac{m^2}{r^2}$

Si on compare ces 2 forces on trouve:  $\frac{F_e}{F_g} = \frac{kQ^2}{Gm^2} = \frac{(9 \cdot 10^9)(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(6,67 \cdot 10^{-11})(9,1 \cdot 10^{-31})^2} = 4,17 \cdot 10^{42}$

Donc la force d'origine électrique est très importante devant la force gravitationnelle.

Note :

- La force électrostatique est nettement plus grande que le poids des bouts de papier attirés par la règle frottée.
- Il n'y a pas de collisions entre les corps célestes car ils sont électriquement neutres.

**Exemple 2 :**

Soient 4 charges ponctuelles se trouvant aux sommets d'un rectangle de longueur  $a = 4$  m et de largeur  $b = 3$  m.  $Q_1 = 1$  C,  $Q_2 = -1Q_1$ ,  $Q_3 = -3Q_1$  et  $Q_4 = 4Q_1$

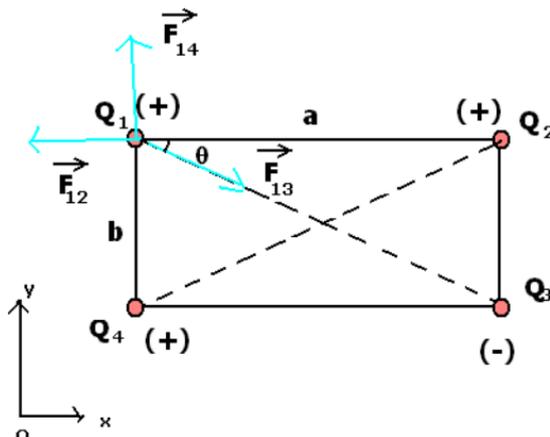
Trouvez la direction et la grandeur de la force exercée sur la charge  $Q_1$  par les 3 charges;

En général, pour résoudre les exercices de ce type on doit suivre les étapes suivantes :

1. On mentionne d'abord le signe de chaque charge.
2. On trace les vecteurs forces en respectant la loi de Coulomb.
3. On calcule le module de chaque force.
4. On choisit un repère (xOy).
5. On calcule les projections de cette force (force résultante) sur les axes Ox et Oy.
6. On calcule le module de la force résultante.

**Réponse :**

1. On fait un schéma et on affecte les signes.



2. On construit les vecteurs-forces (sens et directions)
3. On calcule les modules des forces

$$F_{12} = k \frac{Q_1 Q_2}{a^2} = \frac{9}{16} 10^9 N$$

$$F_{13} = k \frac{Q_1 Q_3}{a^2 + b^2} = \frac{27}{25} 10^9 N$$

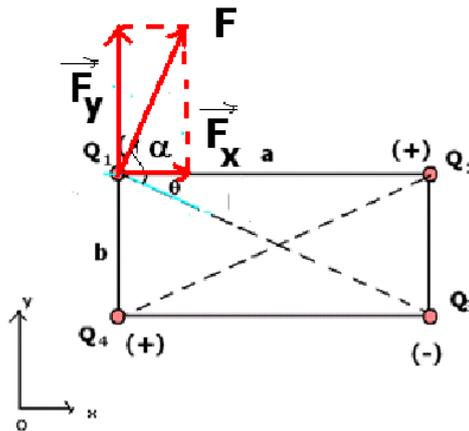
$$F_{14} = k \frac{Q_1 Q_4}{b^2} = 4 10^9 N$$

4. On calcule la force résultante et on choisit un repère (XOY). Puis on fait les projections sur les axes choisis et on calcule les composantes  $F_x$  et  $F_y$  de la force résultante.

$$\vec{F} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14}$$

$$F_x = F_{13} \cos\theta - F_{12} = \left( \frac{27}{25} \frac{4}{\sqrt{25}} - \frac{9}{16} \right) 10^9 N = 0.864 10^9 N$$

$$F_y = F_{14} - F_{13} \sin\theta = \left( 4 - \frac{27}{25} \frac{3}{5} \right) 10^9 N = 3.352 10^9 N$$



5. On calcule le module de F et sa direction (donnée par un angle  $\alpha$  à choisir).

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 10^{10} \sqrt{8.64^2 + 33.52^2} = 34.61 10^{10} N$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_y}{F_x} = 3.87$$

Donc:

$$\alpha = 75.5^\circ$$