

Vérification de la loi de Coulomb

Mesure avec le capteur de force et le newtonmètre

Objectifs expérimentaux

- Mesure de la force F entre deux sphères électrisées en fonction de la distance d entre les sphères.
- Mesure de la force F entre deux sphères électrisées en fonction de leurs charges électriques Q_1 et Q_2 .
- Evaluation de la constante de champ électrique ϵ_0 .

Notions de base

La force

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{d^2} \quad (I)$$

avec $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$: constante de champ électrique,

agit, selon la loi de Coulomb, entre deux charges électriques ponctuelles Q_1 et Q_2 distantes de d .

La force est positive, donc répulsive, si les charges ont le même signe. Si les signes des charges sont différents, c'est alors une force négative qui agit, soit une force attractive.

Quasiment la même force agit entre deux sphères électrisées si la distance d qui sépare les centres des sphères est nettement plus grande que les rayons r des sphères de telle sorte que la charge uniforme des sphères reste non perturbée. Pour de petites distances d , une «force image» suscitée par le phénomène d'influence mutuel modifie les résultats.

Dans l'expérience, on mesure la force entre deux sphères électrisées avec un capteur de force. Les proportionnalités étudiées sont les suivantes:

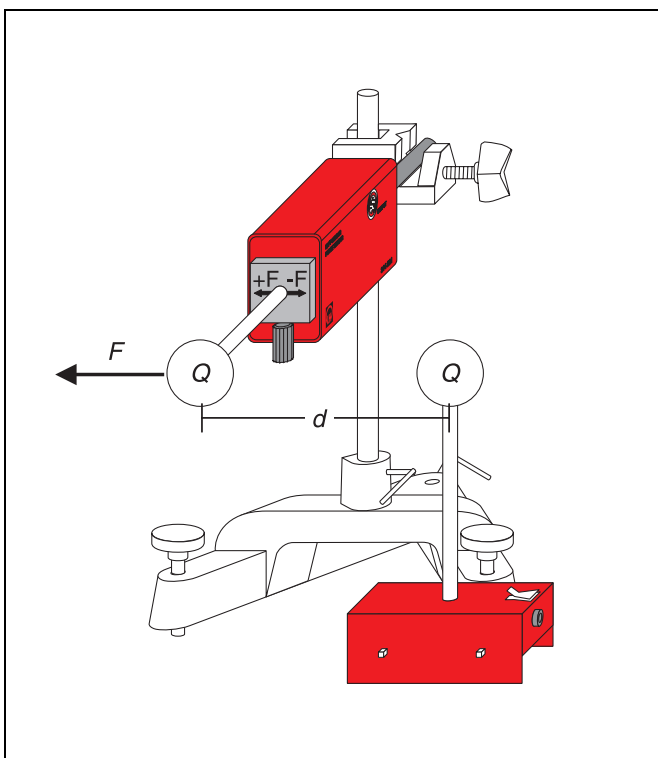
$$F \sim \frac{1}{d^2}, F \sim Q_1 \text{ et } F \sim Q_2 \quad (II).$$

Le capteur de force est composé de deux lames souples parallèles avec quatre jauges extensométriques en montage en pont qui changent de résistance électrique sous l'effet de la charge. Le changement de résistance est proportionnel à la force appliquée, directement indiquée par un newtonmètre.

Un amplificateur électromètre branché en coulombmètre permet une mesure quasiment sans courant des charges en présence. Un voltmètre quelconque sert d'instrument d'affichage pour la tension de sortie U_A . D'après la capacité de référence C , on calcule

$$Q = C \cdot U_A \quad (III).$$

Avec $C = 10 \text{ nF}$, $U_A = 1 \text{ V}$ correspond ainsi par exemple à la charge $Q = 10 \text{ nAs}$. Avec d'autres capacités, on obtient d'autres gammes de mesure.



Matériel

1 jeu de corps conducteurs	314 263
1 chariot de mesure 1,85 g	337 00
1 rail métallique de précision, 0,5 m	460 82
1 capteur de force	314 261
1 newtonmètre	314 251
1 câble de connexion, 6 pôles, 1,5 m	501 16
1 alimentation haute tension 25 kV	521 721
1 câble haute tension	501 05
1 tige perforée, isolée, 25 cm	590 13
1 socle	300 11
1 amplificateur électromètre	532 14
1 adaptateur secteur enfichable 230 V/12 V~/20 W	562 791
1 condensateur STE 1 nF, 630 V	578 25
1 condensateur STE 10 nF, 100 V	578 10
1 voltmètre, jusqu'à $U = \pm 8$ V, p.ex.	531 100
1 cage de Faraday	546 12
1 fiche de fixation	590 011
1 tige de connexion	532 16
1 pied en V, petit modèle	300 02
1 tige, 25 cm	300 41
1 noix Leybold	301 01
Câbles d'expérience	

Remarque préliminaire

L'expérience doit être réalisée avec grand soin car les pertes de charge consécutives aux « courants de fuite » par l'intermédiaire des isolateurs risquent d'occasionner des erreurs de mesure considérables. Par ailleurs, des phénomènes d'influence indésirables peuvent influencer sur le résultat.

Conseils de sécurité

L'alimentation haute tension 25 kV répond aux consignes de sécurité pour les appareils électriques de mesure, de commande, de régulation et de laboratoire. Elle fournit une haute tension inoffensive en cas de contacts fortuits. Les mesures de sécurité suivantes sont à observer :

- Suivre les instructions du mode d'emploi de l'alimentation haute tension.
- N'intervenir dans le montage expérimental (connexions et modifications) que lorsque l'alimentation haute tension est hors service.
- Réaliser le montage expérimental de manière à ce qu'il soit impossible d'entrer inopinément en contact avec les pièces non isolées, les câbles et les prises.
- Avant de mettre l'alimentation haute tension en marche, régler la tension de sortie sur zéro (amener le potentiomètre tournant sur la butée gauche).
- Pour éviter les claquages, disposer le câble haute tension de manière à ce qu'aucun objet électriquement conducteur ne soit à proximité de celui-ci.

L'expérience doit être réalisée dans une pièce fermée, sèche pour éviter autant que possible les pertes de charge consécutives à une forte humidité de l'air.

Il est recommandé de nettoyer les tiges isolantes des sphères avec de l'eau distillée, puisque l'eau distillée est le meilleur solvant qui soit pour les sels conducteurs sur les isolateurs. Du reste, pour décharger les tiges isolantes avant de commencer l'expérience, on devrait les faire passer plusieurs fois rapidement à travers une flamme non fuligineuse, par ex. d'un bec à butagaz.

L'alimentation haute tension et le bout du câble haute tension doivent être suffisamment distants du reste du montage expérimental pour éviter d'occasionner des phénomènes d'influence perturbateurs.

Pour la même raison, – notamment pour la mesure de la charge – l'expérimentateur doit tenir la tige de connexion de l'amplificateur électromètre dans la main afin d'assurer sa propre mise à la terre.

Montage

Le montage expérimental se compose de deux parties. La fig. 1 illustre le montage pour l'électrisation des sphères et pour la mesure de la force. La fig. 2 montre le câblage de l'amplificateur électromètre pour la mesure des charges.

Alimentation en haute tension:

- Brancher le câble haute tension au pôle plus de l'alimentation haute tension et relier le pôle moins à la terre.
- Enficher le bout libre du câble haute tension (**a**) dans le trou supérieur de la tige perforée.

Disposition du capteur de force et des sphères:

- Placer le chariot de mesure (**b**) sur le rail métallique de précision et enficher la sphère 1 avec tige isolante à l'aide de la fiche de couplage.
- Fixer au matériel support le capteur de force (**c**) avec direction «-» vers la sphère 1 (mesure positive des forces répulsives).
- Fixer la sphère 2 avec tige isolante au capteur de force et la bloquer avec la vis.
- Mettre les deux sphères à la même hauteur.
- Brancher le capteur de force avec câble de connexion hexapolaire au newtonmètre.
- Amener le chariot de mesure avec le bord gauche sur la graduation 4,0 cm et régler une distance de 0,2 cm entre les sphères (écart des centres $d = 4,0$ cm).

Montage pour la mesure de la charge:

- Alimenter l'amplificateur électromètre en tension par le biais de l'adaptateur secteur enfichable.
- Enficher la cage de Faraday (**d**) avec la fiche de fixation.
- Enficher le condensateur STE 10 nF (**e**).
- Relier la tige de connexion (**f**) à la masse à l'aide du câble d'expérience et connecter la masse à la terre de l'alimentation haute tension, de préférence en utilisant un câble d'expérience long.
- Brancher le voltmètre à la sortie.

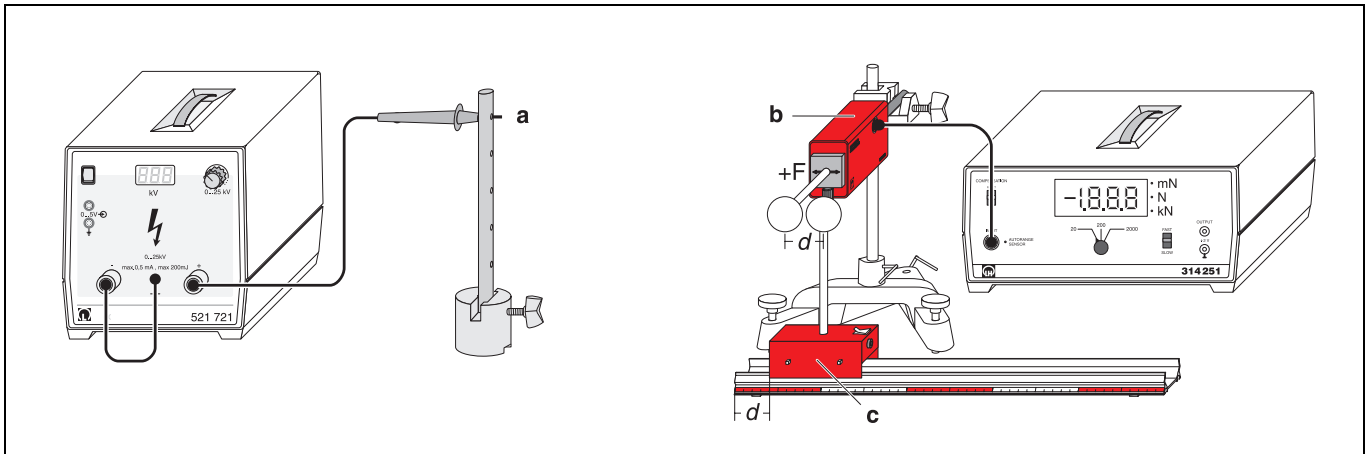


Fig. 1 Montage pour la mesure de la force entre deux sphères électrisées en fonction de leur écartement.

Réalisation

Remarques:

Comme les forces à mesurer sont très faibles, la mesure est très vite perturbée par des influences environnantes: secousses environnantes, courant d'air et variations de température.

Le newtonmètre doit s'échauffer pendant au moins 30 min avant de commencer l'expérience: mettre en marche le newtonmètre avec le capteur de force branché en actionnant l'interrupteur secteur au dos de l'appareil.

a) Mesure en fonction de la distance d entre les sphères:

a1) Mesure avec des charges identiques:

- Ecarter au maximum la sphère 1 avec le chariot de mesure.
- Mettre l'alimentation haute tension en marche et régler la tension de sortie $U = 25$ kV.
- Mettre la pointe (a) du câble haute tension successivement en contact avec les deux sphères.
- Rabaisser la haute tension à zéro.
- Pour la compensation de décalage de zéro, régler le bouton-poussoir COMPENSATION du newtonmètre sur SET.
- Rapprocher la sphère 1 de la sphère 2 puis mesurer et noter la force F en fonction de la distance d .

a2) Mesure avec des charges opposées:

- Ecarter encore une fois la sphère 1 au maximum.
- Réaliser une nouvelle fois la compensation de décalage de zéro du newtonmètre.
- Electrifier à nouveau la sphère 2.
- Rabaisser la haute tension à zéro et inverser la polarité (câble haute tension au pôle moins, pôle plus à la terre).
- Régler la tension de sortie $U = 25$ kV et électrifier négativement la sphère 1.
- Rapprocher la sphère 1 de la sphère 2 puis mesurer et noter la force F en fonction de la distance d .

b) Mesure en fonction des charges électriques Q_1 et Q_2 :

b1) Mesure de la charge sur les sphères

- Ecarter encore une fois la sphère 1 au maximum.
- Rabaisser la haute tension à zéro et inverser la polarité.
- Electrifier positivement la sphère 1 avec $U = 25$ kV et ramener la haute tension à zéro.

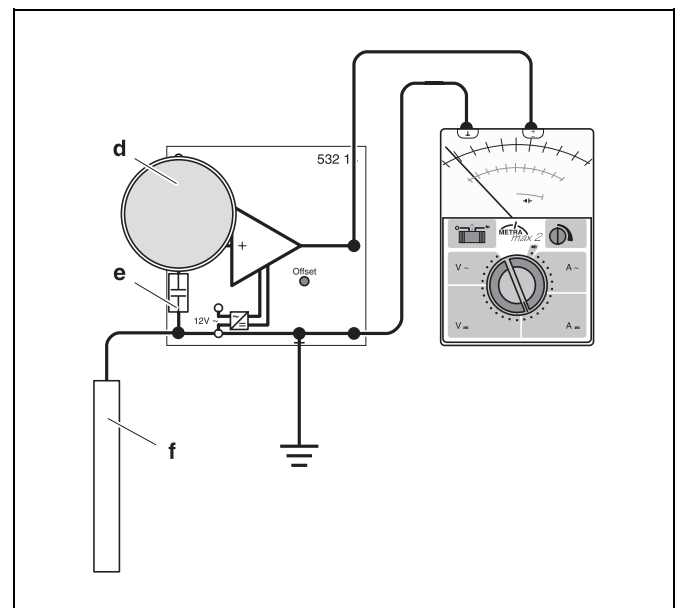
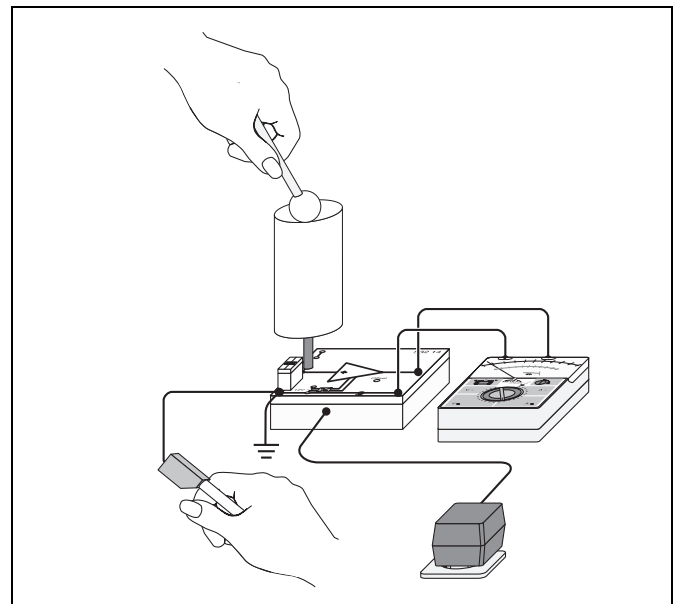


Fig. 2 Câblage de l'amplificateur électromètre pour la mesure des charges.

Fig. 3 Mesure de la charge sur une sphère.



- Pour mesurer la charge, prendre la tige de connexion (**f**) dans la main et amener la sphère avec tige isolante sur la face intérieure de la cage de Faraday (voir fig. 3).
- Recommencer la mesure avec $U = 20$ kV, $U = 15$ kV, 10 kV et 5 kV (décharger chaque fois la sphère au préalable par simple contact avec la tige de connexion).
- Recommencer la même série de mesures avec la sphère 2.

b2) *Mesure en fonction de Q_2 ($Q_1 > 0, Q_2 > 0$):*

- Remonter les deux sphères et écarter la sphère 1 au maximum.
- Réaliser à nouveau la compensation de décalage du zéro du newtonmètre.
- Electrifier la sphère 1 avec $U = 25$ kV
- Electrifier successivement la sphère 2 pour un écartement maximal des sphères avec 5 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV et 25 kV, ramener à chaque fois la haute tension à zéro, choisir la distance $d = 6$ cm et mesurer la force F .

b3) *Mesure en fonction de Q_1 ($Q_1 < 0, Q_2 > 0$):*

- Ecartier encore une fois la sphère 1 au maximum.
- A nouveau procéder à la compensation de décalage du zéro du newtonmètre.
- Electrifier la sphère 2 avec $U = 25$ kV.
- Ramener la haute tension à zéro et inverser la polarité.
- Electrifier successivement la sphère 1 pour un écartement maximal des sphères avec -5 kV, -10 kV, -15 kV, -20 kV et -25 kV, ramener à chaque fois la haute tension à zéro, choisir la distance $d = 6$ cm et mesurer la force F .

Exemple de mesure

a) **Mesure en fonction de la distance d entre les sphères:**

Tab. 1: Force de Coulomb F entre deux sphères électrisées en fonction de la distance d

$\frac{d}{\text{cm}}$	$\frac{F(Q_1 > 0, Q_2 > 0)}{\text{mN}}$	$\frac{F(Q_1 < 0, Q_2 > 0)}{\text{mN}}$
4	3,41	-3,6
5	2,73	-2,95
6	2,40	2,49
7	1,94	-2,11
8	1,33	-1,56
9	0,95	-1,36
10	0,84	-0,96
15	0,41	-0,42
20	0,21	-0,17
25	0,11	-0,12

b) **Mesure en fonction des charges électriques Q_1 et Q_2 :**

Tab. 2: Force de Coulomb F exercée sur la sphère 2 en fonction de sa charge Q_2 ($Q_2 > 0, Q_1 = 36$ nAs, $d = 6$ cm)

$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{Q_2}{\text{nAs}}$	$\frac{F}{\text{mN}}$
5	7	0,32
10	14	0,91
15	22	1,4
20	28	2,01
25	36	2,76

Tab. 3: Force de Coulomb F sur la sphère 2 en fonction de la charge Q_1 de la sphère 1 ($Q_2 < 0, Q_2 = 36$ nAs, $d = 6$ cm)

$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{Q_1}{\text{nAs}}$	$\frac{F}{\text{mN}}$
-5	-7	-0,4
-10	-14	-0,96
-15	-22	-1,39
-20	-28	-2,1
-25	-36	-2,65

Exploitation et résultat

a) **Mesure en fonction de la distance d entre les sphères:**

La fig. 4 donne la représentation graphique des valeurs mesurées du tab. 1. La valeur de la force de Coulomb dépend non linéairement de la distance d et ne dépend pas du signe des charges Q_1 et Q_2 . Si les deux charges ont le même signe (des signes opposés), la force de Coulomb est positive (négative).

Sur la fig. 5, les valeurs des forces sont reportées en fonction de $1/d^2$. La droite passant par l'origine qui est tracée coïncide avec les points de mesure pour de petites valeurs de $1/d^2$. Cela signifie que pour de grandes distance d , on a la proportionnalité

$$F \sim \frac{1}{d^2}$$

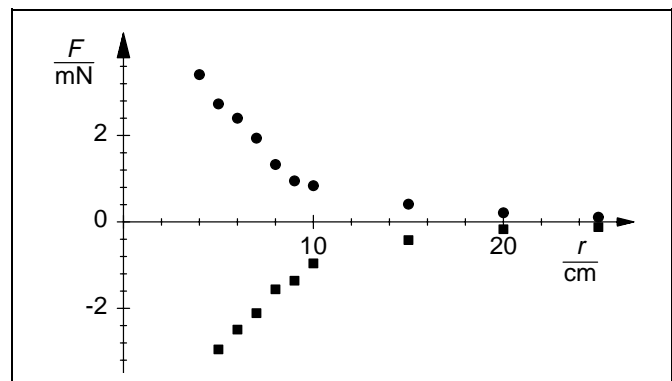
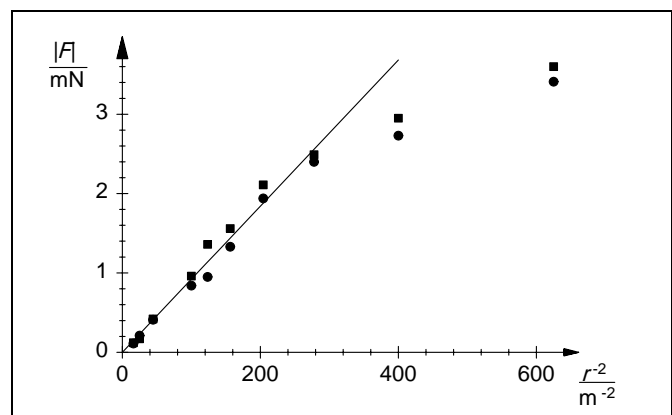


Fig. 4 Force de Coulomb F entre deux sphères électrisées en fonction de la distance d entre les sphères
Cercles: mesure avec des charges identiques
Carrés: mesure avec des charges opposées

Fig. 5 Valeur de la force de Coulomb F entre deux sphères électrisées en fonction de $1/d^2$
Cercles: mesure avec des charges identiques
Carrés: mesure avec des charges opposées



b) Mesure en fonction des charges électriques Q_1 et Q_2 :

La fig. 6 regroupe les valeurs mesurées des tableaux 2 et 3 dans une seule représentation. Les valeurs mesurées sont dans une bonne approximation sur la droite passant par l'origine qui est tracée. C'est ainsi que les deux proportionnalités $F \sim Q_1$ et $F \sim Q_2$ sont vérifiées.

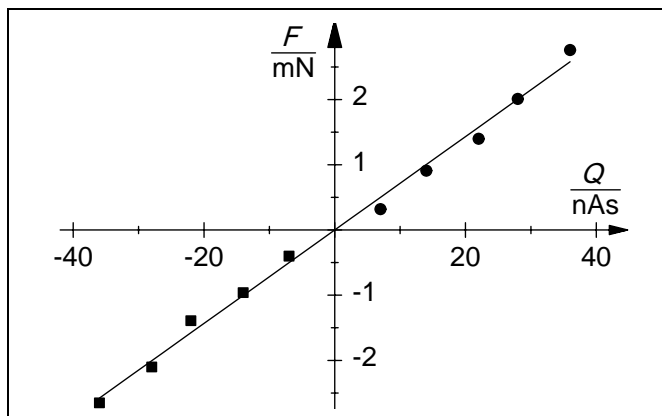


Fig. 6 Force de Coulomb F sur la sphère 2 pour une distance $d = 6$ cm fixe
Cercles: mesure en fonction de Q_2 ($Q_1 = 36$ nAs)
Carrés: mesure en fonction de Q_1 ($Q_2 = 36$ nAs)

c) Evaluation de la constante de champ électrique:

D'après (I), on a par transformation pour la constante de champ électrique:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{Q_1}{d^2} \cdot \frac{F}{Q_2}$$

La constante de champ électrique peut donc être évaluée d'après la pente de la droite passant par l'origine qui est tracée à la fig. 5. La pente vaut

$$\frac{F}{Q_2} = 0,072 \frac{\text{mN}}{\text{nAs}}$$

Avec les valeurs $Q_1 = 36$ nAs et $d = 0,06$ m, on arrive au résultat

$$\epsilon_0 = 11 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

Valeur littéraire:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$