

## Electromètre absolu de Kirchhoff: mesure de la force entre les plaques électrisées d'un condensateur

### Objectifs expérimentaux

- Mesure de la force  $F$  entre les plaques électrisées en fonction de la tension  $U$  pour une distance  $d$  entre les plaques constante.
- Détermination de la constante de champ électrique  $\epsilon_0$ .
- Mesure de la force  $F$  entre les plaques électrisées pour un rapport constant de la tension  $U$  à la distance  $d$  qui sépare les plaques

### Notions de base

Si la tension  $U$  est appliquée aux bornes d'un condensateur à plaques, on a entre les plaques le champ électrique homogène:

$$E = \frac{U}{d} \quad (I)$$

$d$ : écartement des plaques

Ce champ est généré par les charges  $Q$  et  $-Q$  sur les plaques du condensateur. Inversement, le champ exerce une force sur les charges. Mais plus le champ pénètre dans la plaque, plus il est affaibli, justement par ces charges. A la surface des plaques, l'intensité de champ est  $E$ , à l'intérieur le champ  $E$  est nul et en moyenne, il n'y a que la demi-intensité de champ  $E/2$  qui agit sur les charges. D'où l'attraction des plaques avec la force

$$F = -\frac{1}{2} \cdot Q \cdot E \quad (II).$$

La charge  $Q$  sur les plaques vaut

$$Q = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot U \quad (III).$$

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

$A$ : surface des plaques

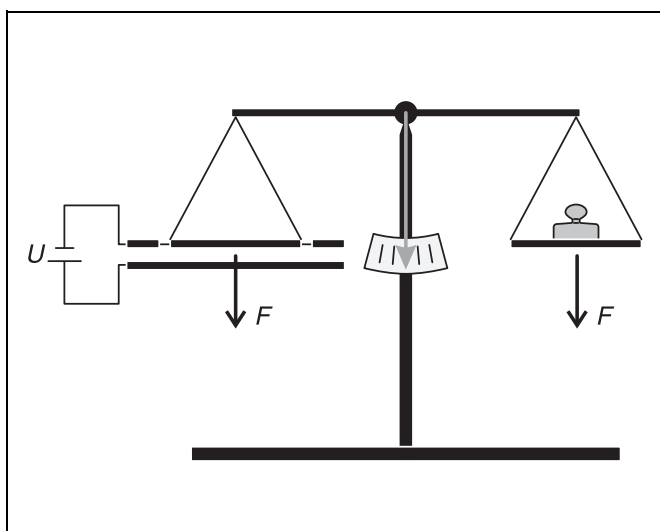
On a ainsi d'après (I) et (II):

$$F = -\frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot A \cdot \left(\frac{U}{d}\right)^2 \quad (IV).$$

$F$ ,  $A$ ,  $d$  et  $U$  sont des grandeurs directement mesurables, ceci faisant que l'équation (IV) peut être considérée comme une équation déterminative pour la constante de champ électrique  $\epsilon_0$ . C'est la base de l'électromètre absolu de Kirchhoff dont la construction est expliquée au cours de l'expérience. La proportionnalité résultant de (IV)

$$F \sim \frac{U^2}{d^2} \quad (V)$$

est alors vérifiée expérimentalement.



**Matériel**

1 jeu d'accessoires pour les expériences d'électrostatique . . . . .	516 37
1 support à hauteur variable . . . . .	516 31
1 newtonmètre . . . . .	314 251
1 capteur de force . . . . .	314 261
1 support de boucles conductrices . . . . .	314 265
1 câble de connexion, 6 pôles, 1,5 m . . . . .	501 16
1 alimentation haute tension 10 kV . . . . .	521 70
1 câble haute tension . . . . .	501 05
1 tige, 47 cm . . . . .	300 42
1 pied en V, petit modèle . . . . .	300 02
1 noix Leybold . . . . .	301 01

Câbles d'expérience

**Montage**

Le montage expérimental est représenté sur la fig. 1. Le condensateur à plaques est constitué de la plaque de condensateur sur isolateur, de la plaque de condensateur avec fiches de fixation et de l'écran annulaire sur support du jeu d'accessoires pour les expériences d'électrostatique (516 37).

**Montage mécanique:**

- Mettre en place l'écran annulaire **(a)** sur support.
- Monter la tige dans le pied en V et fixer le capteur de force (direction +F vers le haut) sur la tige à l'aide de la noix Leybold.
- Brancher le capteur de force au newtonmètre avec le câble hexapolaire.
- Monter le support de boucles conductrices sur le capteur de force, brancher la plaque de condensateur avec fiches de fixation **(b)** et la disposer concentriquement dans l'écran annulaire, sans qu'ils se touchent.
- Installer la plaque de condensateur avec isolateur **(c)** sur le support à hauteur variable, bloquer celui-ci avec la vis moletée **(d)** et à l'aide des vis de réglage **(f)**, l'orienter parallèlement à la plaque de condensateur **(b)**.
- Vérifier l'ajustage et régler une distance  $d = 20$  mm entre les plaques à l'aide de la vis de réglage **(e)**.

**Montage électrique:**

- Brancher la plaque de condensateur **(c)** au pôle plus de l'alimentation haute tension; pour ce faire, enficher le câble haute tension dans le perçage de 4 mm du socle de la plaque de condensateur.
- Relier l'écran annulaire **(a)** à la plaque de condensateur **(b)** et les brancher tous les deux au pôle moins de l'alimentation haute tension; pour ce faire, enficher le câble d'expérience dans le perçage de 4 mm du support et dans le support des boucles conductrices.
- Relier le pôle moins à la terre de l'alimentation haute tension.
- Brancher l'alimentation haute tension 10 kV à la prise secteur et la mettre en marche.

**Conseils de sécurité**

L'alimentation haute tension 10 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.

**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.*

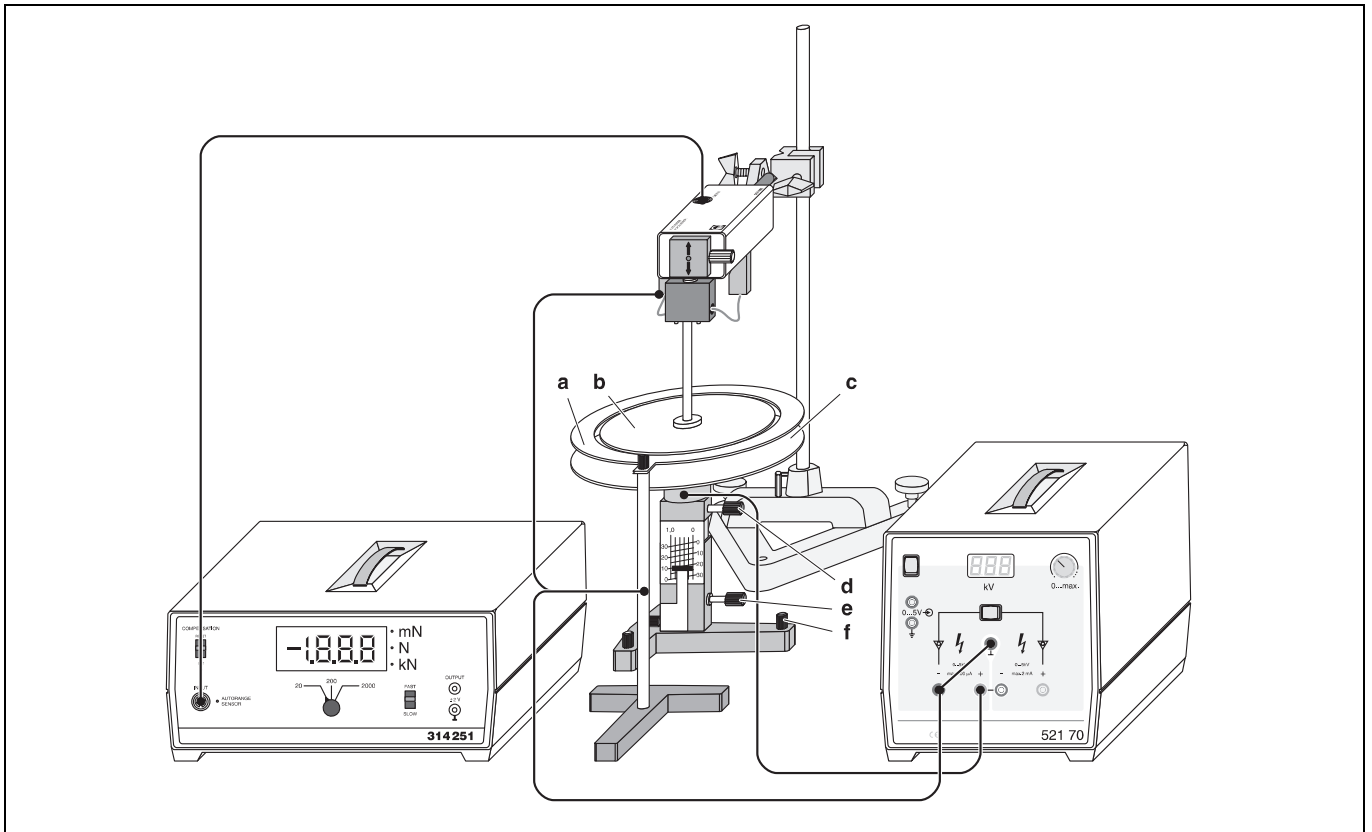


Fig. 1 Montage expérimental pour l'étude de l'électromètre absolu de Kirchhoff

### Exemple de mesure

#### a) Force $F$ entre les plaques électrisées en fonction de la tension $U$ :

Rayon de la plaque de condensateur: 15 cm

Tab. 1: Force  $F$  entre les plaques électrisées en fonction de la haute tension  $U$  ( $d = 20$  mm)

$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{F}{\text{mN}}$
5,0	-4,0
4,5	-3,2
4,0	-2,5
3,5	-2,0
3,0	-1,5
2,5	-1,0
2,0	-0,6

#### a) Force $F$ en fonction de la tension $U$ :

- Pour la compensation de décalage du zéro, positionner le bouton-poussoir COMPENSATION du newtonmètre sur SET.
- Mettre l'alimentation haute tension en marche et régler la tension de sortie  $U = 2$  kV.
- Relever la force  $F$  sur le newtonmètre et la noter.
- Augmenter la haute tension jusqu'à 5 kV par pas de 0,5 kV, chaque fois relever la force  $F$  et la noter avec la tension  $U$ .

#### b) Force $F$ pour un rapport constant de la tension $U$ à la distance $d$ entre les plaques

- Ramener la haute tension à zéro et compenser à nouveau le décalage du zéro du newtonmètre.
- Régler la haute tension sur  $U = 5$  kV et relever la force  $F$  sur le newtonmètre.
- Réduire la haute tension à  $U = 4$  kV et la distance entre les plaques à  $d = 16$  mm; ce faisant, veiller à ce que les plaques de condensateur et l'écran annulaire ne se touchent pas.
- Relever la force  $F$  sur le newtonmètre et la noter avec les valeurs  $U$ ,  $d$  et  $E = \frac{U}{d}$ .
- Recommencer la mesure pour  $U = 3$  kV,  $d = 12$  mm et  $U = 2$  kV,  $d = 8$  mm.

#### b) Force $F$ pour un rapport constant de la tension $U$ à la distance $d$ entre les plaques

Tab. 2: Force  $F$  entre les plaques électrisées pour un rapport constant  $E = U/d$

$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{E}{10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}}$	$\frac{F}{\text{mN}}$
5,0	20	0,25	-4,0
4,0	16	0,25	-4,0
3,0	12	0,25	-4,0
2,0	8	0,25	-4,0

## Exploitation

a) Force  $F$  en fonction de la tension  $U$ :

Les valeurs mesurées du tab. 1 sont représentées graphiquement à la fig. 2. La courbe tracée est une parabole avec le sommet à l'origine des coordonnées. On voit bien que la force attractive augmente avec le carré de la haute tension  $U$ , c.-à-d. que l'on a:

$$F \sim U^2$$

La fig. 3 donne une représentation des valeurs mesurées sous la forme linéarisée  $F = f(U^2)$ . Les points de mesure sont disposés dans une bonne approximation sur une droite passant par l'origine.

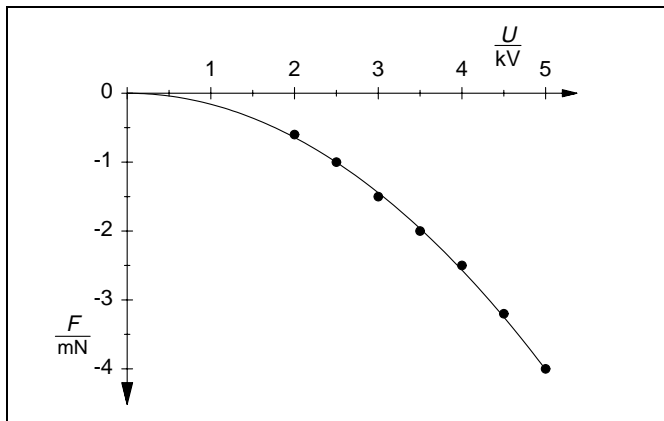


Fig. 2 Force  $F$  entre les plaques électrisées en fonction de la tension  $U$  pour une distance entre les plaques  $d = 20$  mm constante.

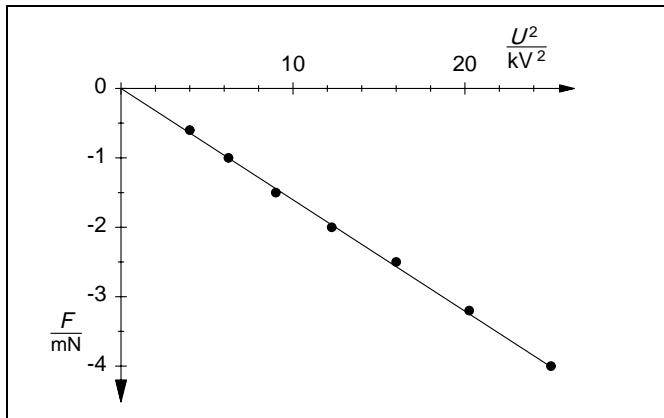


Fig. 3 Représentation des valeurs mesurées de la fig. 2 sous forme linéarisée  $F = f(U^2)$

Détermination de la constante de champ électrique  $\epsilon_0$ :

D'après la pente

$$\frac{F}{U^2} = -0,16 \frac{\text{mN}}{\text{kV}^2}$$

de la droite passant par l'origine de la fig. 3, il est possible de déterminer la constante de champ électrique conformément à l'équation (IV).

$$\epsilon_0 = -\frac{F}{U^2} \cdot \frac{2d^2}{A}$$

La distance  $d$  entre les plaques vaut 20 mm.

Pour le calcul de la surface  $A$ , on utilise le rayon  $r = 7,5$  cm de la plus petite plaque de condensateur étant donné que la force  $F$  a été mesurée sur cette surface:  $A = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{m}^2$ .

$$\text{On obtient: } \epsilon_0 = 7,5 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

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

b) Force  $F$  pour un rapport constant de la tension  $U$  à la distance  $d$  entre les plaques

Les valeurs mesurées du tab. 2 prouvent que la force  $F$  dépend de l'intensité de champ électrique en cas de variation de la tension  $U$  et de la distance  $d$  entre les plaques. La force reste constante si l'intensité de champ reste constante.

On a donc d'après  $F \sim U^2$  pour une distance constante:

$$F \sim E^2$$

$$\text{et } F \sim \frac{1}{d^2} \text{ pour une tension constante}$$

## Résultat

Une force attractive dépendant quadratiquement de l'intensité de champ électrique agit entre les plaques électrisées d'un condensateur.