

Appareil de Millikan Boîte d'alimentation

L'appareil de Millikan, équipé d'une boîte d'alimentation, est utilisé, selon le procédé de mesure choisi, avec un ou deux chronomètres électriques pour mettre en évidence le caractère discontinu des charges électriques ainsi que pour déterminer la charge élémentaire.

1 Caractéristiques techniques

1.1 Appareil de Millikan (559 41)

Chambre de Millikan:	diamètre 8,0 cm
Ecartement des plaques du condensateur:	0,6 cm
Microscope avec micromètre oculaire	
agrandissement/objectif:	x 1,875
agrandissement/oculaire:	x 10
Dispositif d'éclairage avec lampe à incandescence:	6 V; 2,5 A; E 10-1802-3 Type: MAZDA CYL. PLAT
Encombrement:	32 cm x 37 cm x 32 cm
Poids:	4,7 kg
Câble de raccordement avec fiche multiple pour l'éclairage:	env. 40 cm de long

1.2 Boîte d'alimentation (559 42)

Tensions prélevables pour	
condenseur à plaques:	0 ... 600 V, réglage continu
éclairage:	6 V; 2,5 A
Instrument à cadre mobile pour mesurer la tension du condensateur:	
gamme de mesure:	600 V c.c.
classe:	2,5
graduation:	10 V
longueur de l'échelle:	env. 8,6 cm
Tensions secteur:	110/130/220/240 V, 50/60 Hz
Fusible pour faible intensité:	pour 220 V/240 V: M 0,315 B (pièce de rechange 69 810) pour 110 V/130 V: M 0,63 B (pièce de rechange 69 813)
Encombrement du boîtier:	19 cm x 11,5 cm x 16 cm
Poids:	1,5 kg

2 Description

2.1 Appareil de Millikan (fig. 1)

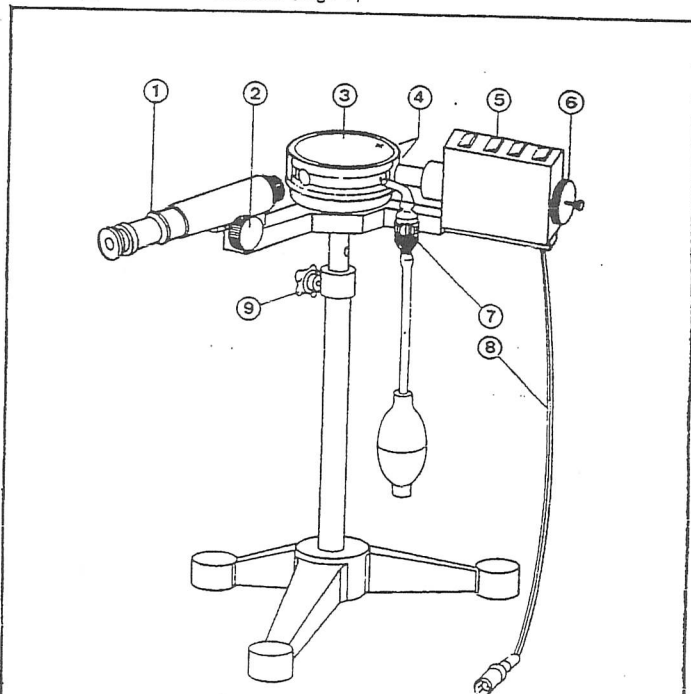
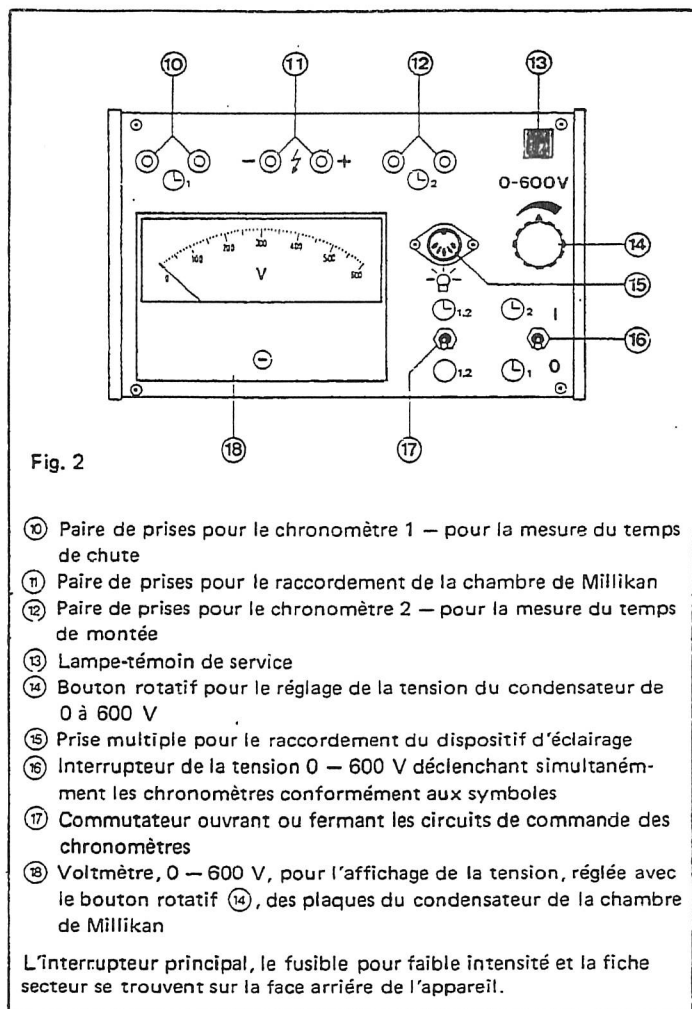


Fig. 1

- ① Microscope de mesure avec micromètre oculaire
- ② Vis moletée pour le réglage du microscope
- ③ Chambre de Millikan (condensateur à plaques) avec couvercle en simili-verre
- ④ Paire de prises pour le raccordement de la tension continue du condensateur à plaques (prélevable sur la paire de prises ⑤, réglable par le bouton ⑭)
- ⑤ Dispositif d'éclairage
- ⑥ Vis moletée pour le réglage de la lampe
- ⑦ Pulvérisateur d'huile avec balle en caoutchouc sur support élastique (une petite bouteille d'huile est comprise dans l'équipement fourni)
- ⑧ Câble de connexion de la lampe (prise multiple ⑤)
- ⑨ Vis de réglage en hauteur (pour placer le microscope à la hauteur des yeux de l'expérimentateur)

2.2 Boîte d'alimentation (fig. 2)



3 Principe de fonctionnement

Ce procédé, décrit pour la première fois par R. A. Millikan* en 1913, repose sur le fait que différentes forces mesurables indirectement s'appliquent sur une gouttelette d'huile chargée électriquement en mouvement dans le champ électrique homogène d'un condensateur à plaques.

Lorsqu'une gouttelette d'huile de charge Q et de masse m_H , se trouve dans le champ électrique homogène E d'un condensateur les forces suivantes s'appliquent sur elle:

son poids $m_H \cdot g$

la force d'ascension $m_L \cdot g$

(m_L = masse de la quantité d'air repoussée par la gouttelette d'huile)

la force électrique QE

et la force de frottement de Stoke $6 \pi r \eta v$, seulement si la gouttelette considérée comme sphérique est en mouvement par rapport à l'air ambiant.

(η = viscosité de l'air, r = rayon de la gouttelette, v = vitesse du mouvement).

Si l'on définit, en tenant compte de la force d'ascension $m_H - m_L = m$ et pour $\rho_H - \rho_L = \rho$, ρ_H représentant la densité de l'huile, ρ_L la densité de l'air et m et ρ les valeurs correspondantes diminuées par l'effet de la force d'ascension, on

obtient, à condition qu'une force dirigée vers le bas soit considérée comme positive, pour une gouttelette tombant dans un espace sans champ à la vitesse v_1 la définition suivante des forces:

$$\begin{aligned} mg - 6 \pi r v_1 \eta &= 0 \\ V \rho g - 6 \pi r v_1 \eta &= 0 \\ 4/3 \pi r^3 \rho g - 6 \pi r v_1 \eta &= 0 \end{aligned}$$

$$r = \sqrt{\frac{9 \eta v_1}{2 \rho g}} \quad (I)$$

U représentant la différence de potentiel entre les plaques de la chambre de Millikan, d l'écartement des plaques et v_2 la vitesse ascensionnelle de la gouttelette, on obtient pour une gouttelette en mouvement ascendant dans un champ électrique d'intensité $E = \frac{U}{d}$ les équations suivantes:

$$\begin{aligned} mg - QE + 6 \pi r v_2 \eta &= 0 \\ 4/3 \pi r^3 \rho g - Q \frac{U}{d} + 6 \pi r v_2 \eta &= 0 \end{aligned} \quad (II)$$

Pour une gouttelette en suspension dans la chambre sous l'effet du champ électrique, on obtient:

$$\begin{aligned} mg - QE &= 0 \\ 4/3 \pi r^3 \rho g - Q \frac{U}{d} &= 0 \end{aligned} \quad (III)$$

Cet appareil permet de déterminer la charge élémentaire selon deux méthodes de mesure différentes:

3.1 En mesurant la tension, pour laquelle une gouttelette d'huile chargée est en suspension dans la chambre de Millikan et en mesurant la vitesse de la gouttelette tombant dans l'espace sans champ après l'interruption de la tension.

3.2 En mesurant la vitesse de la chute d'une gouttelette dans l'espace sans champ et en mesurant ensuite sa vitesse de remontée pour une tension définie à mesurer.

Les équations (I) à (III) permettent de tirer les autres relations nécessaires pour les deux méthodes de mesure:

pour 3.1: Détermination de la charge élémentaire par mesure de la tension de suspension U et de la vitesse de chute v_1 d'une gouttelette d'huile dans l'espace sans champ.

En mettant en rapport (I) et (III), on obtient:

$$Q = \frac{6 \pi d \eta v_1}{U} \sqrt{\frac{9 \eta v_1}{2 \rho g}}$$

η , d et ρ sont remplacés par les valeurs numériques suivantes:

$$\eta = 1,81 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$$

$$d = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho_H = 875,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_L = 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho = 874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

ce qui donne l'équation finale suivante:

$$Q = 2 \cdot 10^{-10} \frac{v_1^{3/2}}{U} \text{ As} \quad (IV)$$

*) R. A. Millikan: ON THE ELEMENTARY ELECTRICAL CHARGE AND THE AVOGADRO CONSTANT. PHYSICAL REVIEW Nr. 2, 1913, pages 109 et suivantes.

pour 3.2: Détermination de la charge élémentaire par la mesure de la vitesse de chute v_1 dans l'espace sans champ, de la vitesse de remontée v_2 dans un champ électrique et de la tension U dans la chambre de Millikan.

Les équations (I) et (II) sont utilisées dans ce cas:

$$Q \cdot \frac{U}{d} = 6 \pi \eta v_2 \sqrt{\frac{9 \eta v_1}{2 \rho g}} + 4/3 \pi \rho g \frac{9 \eta v_1}{2 \rho g} \sqrt{\frac{9 \eta v_1}{2 \rho g}}$$

$$Q = (v_1 + v_2) \frac{\sqrt{v_1}}{U} \eta^{3/2} \frac{18 \pi d}{\sqrt{2 \rho g}}$$

En remplaçant η , d et ρ par les valeurs données dans 3.1, on obtient l'équation finale suivante permettant de calculer assez rapidement les charges:

$$Q = (v_1 + v_2) \frac{\sqrt{v_1}}{U} \cdot 2 \cdot 10^{-10} \text{ As} \quad (V)$$

4 Utilisation

4.1 Assemblage de l'appareil de Millikan (nécessaire uniquement pour la première mise en service)

Visser solidement entre eux, conformément à la fig. 1, le trépied, la tige de fixation et le support avec la chambre de Millikan, le dispositif d'éclairage et le microscope de mesure. Veiller à ce que la chambre de Millikan qui n'est pas fixée ne tombe pas avec son couvercle en similiverre lorsque l'on incline le support.

4.2 Remplissage d'huile

Remplir le pulvérisateur, en utilisant l'huile faisant partie de l'équipement fourni (pièce de rechange No. 68 578), par l'orifice de pulvérisation, jusqu'à ce que le tube capillaire coudé soit plongé dans env. 2 mm d'huile. Monter le pulvérisateur dans le support à ressort en veillant à ce que l'orifice de pulvérisation se trouve en face des deux trous du couvercle de la chambre de Millikan.

4.3 Remarques sur la mesure du temps:

Selon la méthode de mesure, raccorder 1 chronomètre (par ex. 313 04 ou 03 ou 575 45) sur la paire de prises ⑩ ou 2 chronomètres sur les paires de prises ⑩ et ⑫ (cf. fig. 3.1 — 3.3); d'autres circuits voir section 7, figs. 6.1 — 6.3.

Pour le grand chronomètre électrique (313 04):

Placer le commutateur ⑨ vers le bas quand le plan des connexions sur cet instrument (313 04) correspond au schéma de détail 1 (fig. 3.1);

placer le commutateur ⑨ vers le haut quand le plan des connexions correspond au schéma de détail 2.

Description des méthodes de mesure avec chronomètres électriques: cf. description d'expérience, section 7.

Un ou deux chronomètres pour élève (313 07) peuvent remplacer les chronomètres électriques mentionnés. Dans ce cas, ne pas actionner le commutateur ⑩. Sa position est sans importance. Démarrer ou arrêter les chronomètres pour élève en même temps que le changement de position du commutateur ⑨. Pour la méthode de mesure décrite sous 3.2, notamment, deux personnes sont nécessaires pour réaliser les mesures.

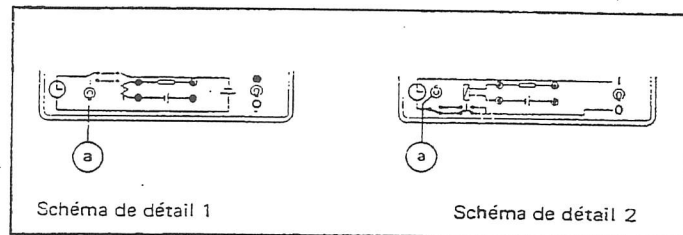
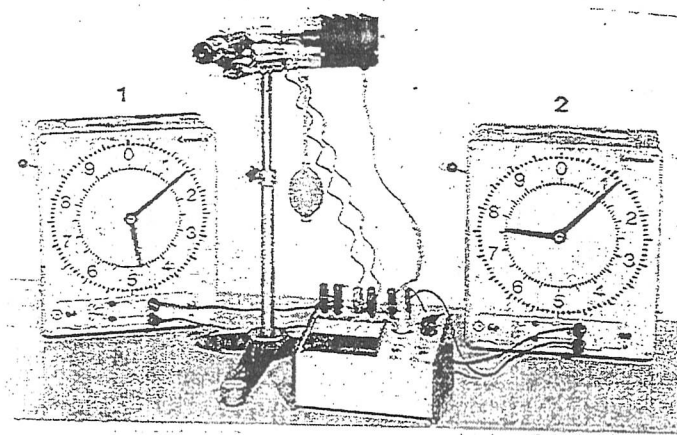


Fig. 3.1

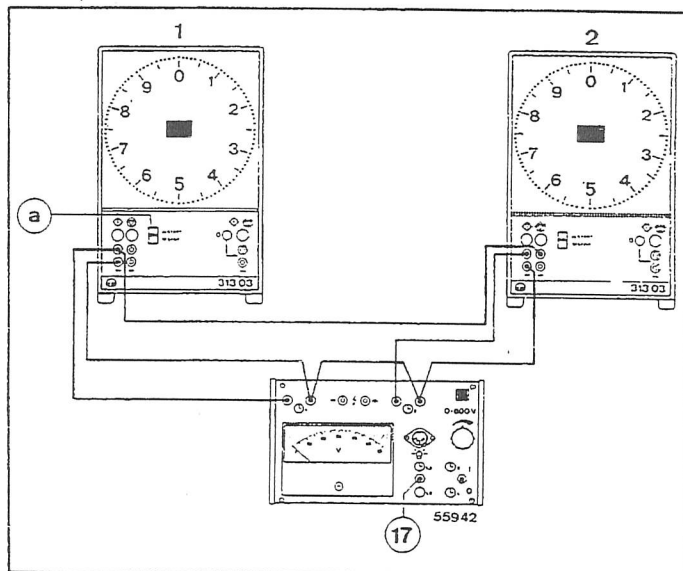


Fig. 3.2

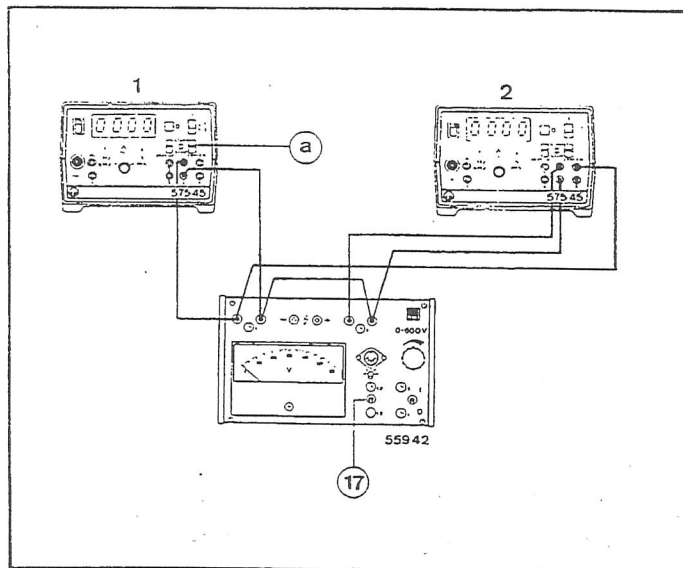


Fig. 3.3

4.4 Détermination de la distance s parcourue par la gouttelette d'huile à observer; agrandissement expérimental de l'objectif du microscope

Lorsqu'une gouttelette d'huile est en mouvement le long d'un trajet s' de x graduations du micromètre ($= x \cdot 10^{-4}$ m), la distance s effectivement parcourue est obtenue en tenant compte de l'agrandissement de 1,875 de l'objectif:

$$s = \frac{x}{1,875} \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

L'agrandissement du microscope peut être légèrement différent de la valeur citée plus haut selon le type d'appareil utilisé. Cette variation ne dépassera cependant pas de beaucoup $\pm 1\%$.

Il est possible de régler l'agrandissement du microscope en utilisant la tige en verre graduée en millimètres: retirer la chambre de Millikan avec couvercle en simili-verre du support placé sur la tige de fixation. Placer la tige de verre graduée en millimètres, en s'aidant d'une gomme ou autre, à la verticale, contre la tige de centrage maintenant visible. Régler le microscope avec la vis moletée de sorte que la graduation en millimètres de la tige en verre soit bien visible. L'agrandissement se calcule en comparant l'échelle micrométrique dans l'oculaire (écartement des stries 0,1 mm) avec la graduation en mm de la tige en verre. Remettre ensuite la chambre de Millikan avec couvercle en simili-verre à l'endroit prévu.

4.5 Description d'expérience

Environ 6 à 8 mesures suffisant pour mettre en évidence le caractère discontinu de la charge électrique. Deux à trois fois plus de mesures sont par contre nécessaires pour déterminer la charge élémentaire.

Montage:

Monter le dispositif avec un ou deux chronomètres selon la méthode appliquée (1 ou 2) (cf. 3.1 à 3.3).

Mettre la boîte d'alimentation en fonction avec l'interrupteur sur la face arrière du boîtier, positionner le micromètre oculaire à la verticale et le mettre au point en tournant l'anneau noir oculaire.

Exécution:

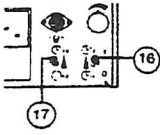
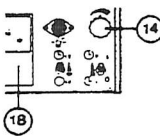
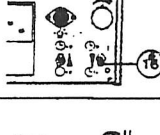
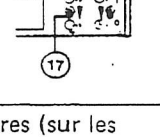
Pulvériser l'huile dans la chambre de Millikan en pressant fortement sur la balle en caoutchouc et exécuter l'expérience conformément à 4.5.1 ou 4.5.2.

4.5.1 Méthode de mesure avec un chronomètre (sur la paire de prises ⑩)

Grandeurs mesurées:

Tension U , pour laquelle la gouttelette d'huile chargée reste en suspension dans le champ électrique d'un condensateur à plaques; temps t , nécessité par la même gouttelette pour parcourir le trajet s' en tombant après la coupure de la tension (pour le calcul de la vitesse de chute v_1 dans l'espace sans champ).

Procédé:

1	Placer les commutateurs ⑰ et ⑮ vers le haut: le chronomètre est prêt à mesurer, et le condensateur est relié à l'alimentation en tension.	
2	Régler la tension U sur le bouton rotatif ⑭ de telle sorte qu'une gouttelette plane dans le tiers inférieur du champ d'observation (de préférence sur une raie du micromètre oculaire); lire la tension U .	
3	Placer le commutateur ⑮ en position 0: la tension U est coupée et le chronométrage est lancé.	
4	Observer la gouttelette tombant dans l'espace sans champ (elle monte dans l'image du microscope) et arrêter le chronomètre en commutant ⑰ quand la gouttelette a parcouru une distance s' de par ex. 30 micromètres.	

4.5.2 Méthode de mesure avec deux chronomètres (sur les paires de prises ⑩ et ⑫)

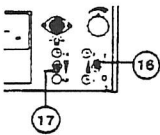
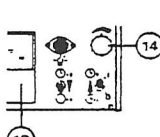
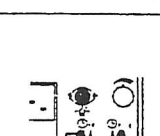
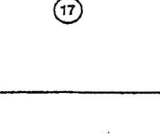
Grandeurs mesurées:

Temps t_2 nécessité par la gouttelette pour monter la distance s' quand une tension U est appliquée au condensateur à plaques (pour la détermination de la vitesse d'ascension v_2 dans le champ électrique);

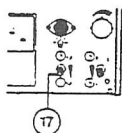
Tension du condensateur U :

Temps t_1 nécessité par la même gouttelette pour tomber sur la distance de s' après la coupure de la tension U (pour la détermination de la vitesse de chute v_1 dans l'espace sans champ).

Procédé:

1	Placer le commutateur ⑰ vers le bas et le ⑮ vers le haut: Le circuit de commande des chronomètres est ouvert et le condensateur est relié à l'alimentation en tension.	
2	Régler une tension U de 500 V à 600 V sur le bouton rotatif ⑭ de telle sorte que les gouttelettes d'huile montent lentement dans le champ électrique (elles tombent dans l'image du microscope); Mesurer la tension U .	
3	Sélectionner une gouttelette tombant lentement dans le tiers supérieur du champ d'observation et commuter ⑰ à l'instant précis où elle passe une marque (par ex. marque 40 de l'échelle micrométrique): ceci lance le chronomètre 2 pour la mesure du temps t_2 de remontée dans le champ électrique.	
4	Observer la gouttelette tombant apparemment dans l'image du microscope, mais effectivement en ascension, et mettre le commutateur ⑮ en position 0 à l'instant précis où elle passe la 2e marque (par ex. marque 70 de l'échelle micrométrique): La tension U du condensateur est coupée; le chronomètre 2 est arrêté et le 1 lancé au même moment.	

5 Observer la gouttelette montant apparemment dans l'image du microscope, mais effectivement en train de tomber dans l'espace sans champ et commuter (17) à l'instant précis où elle repasse la 1ère marque (par ex. 40): le chronomètre 1 est stoppé. Arrêter le chronométrage par le commutateur (3) de l'appareil 1 en cas d'utilisation du chronomètre électronique P (313 03) ou du compteur P (575 45) (cf. fig. 3.2/3).



plus approfondies ont montré que ce facteur augmente en fonction inverse de la valeur du rayon de la gouttelette d'huile observée. Le phénomène provient du fait que la loi de Stoke servant au calcul n'est plus entièrement valable pour la taille des gouttelettes considérées ici c. à. d. de 10^{-6} à 10^{-7} m) ce qui représente l'ordre de grandeur du libre parcours moyen de la molécule d'air.

Remarques:

L'image du microscope se met au point avec la vis moletée (2) lorsque l'on cherche une gouttelette appropriée ou éventuellement lors d'une longue observation. En général une remise au point n'est pas nécessaire pendant une mesure, si la pièce où fonctionne l'appareil ne présente pas de courant d'air. Une gouttelette convenable placée cependant trop sur le côté de l'échelle oculaire se laisse recentrer en inclinant légèrement le microscope.

Il est conseillé de calculer les charges de 2 à 3 gouttelettes avant de commencer une longue série de mesures. Ceci permet à l'expérimentateur de reconnaître l'aptitude d'une gouttelette. Il s'est avéré que la charge d'une gouttelette rapide est si grande qu'il est difficile d'étudier le caractère discontinu de la charge et d'estimer la valeur du plus grand diviseur commun et donc de la charge élémentaire e . L'expérience a montré que les gouttelettes pouvant être considérées comme appropriées sont celles ne contenant qu'environ cinq charges élémentaires, c. à. d. que les résultats utilisables doivent être inférieurs à $< 10 \cdot 10^{-19}$ As.

Appréciation des résultats:

Après avoir déterminé la vitesse des gouttelettes par calcul, soit avec l'équation (IV) soit avec (V) selon le procédé de mesure choisi (cf. section 3), la charge $Q = n \cdot e$ peut être calculée à son tour.

La structure discontinue de la charge électrique est déjà bien mise en évidence lorsque l'on représente les résultats sous la forme d'un histogramme (cf. par ex. fig. 4).

La recherche du plus grand diviseur commun à partir des différentes valeurs des charges donne la charge élémentaire e .

Lorsque l'on compare la valeur moyenne obtenue de cette manière pour e avec la valeur exacte de la charge élémentaire $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ As, on constate que la valeur déterminée expérimentalement pour e est trop grande (facteur 1,1). Des études

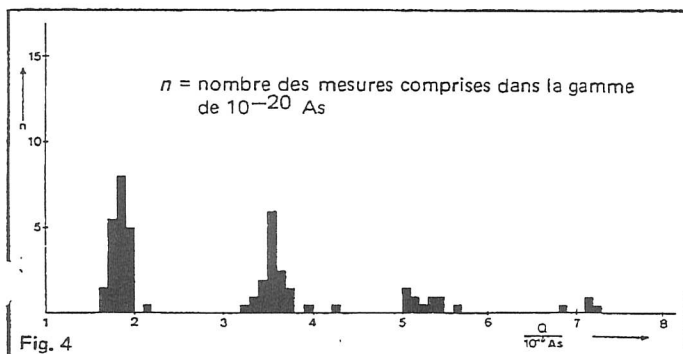


Fig. 4

Correction de la valeur expérimentale de e

Si la précision des valeurs mesurées ne suffit pas, il est possible d'effectuer une correction par calcul déjà appliquée par Millikan.

Lorsque l'on définit par Q_k la charge corrigée et par p la pression d'air mesurée en mbar, on obtient l'équation suivante:

$$Q_k = \frac{Q}{\left(1 + \frac{b}{p}\right)^{3/2}} \quad \text{ou} \quad Q^{2/3} = Q_k^{2/3} \left(1 + \frac{b}{p}\right).$$

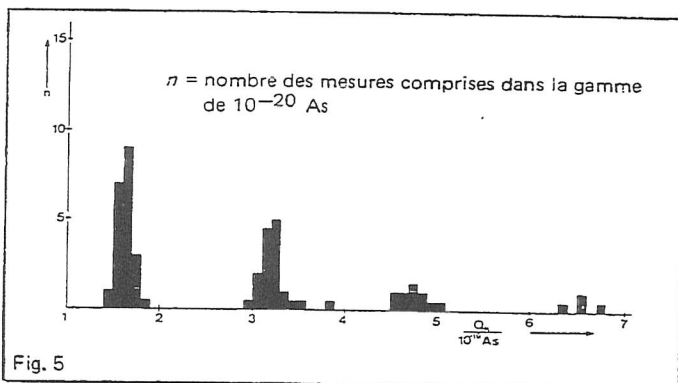


Fig. 5

b est une constante déterminable graphiquement. Cette équation est celle d'une droite de la forme

$$y = y_0 (1 + b x).$$

Lorsque l'on représente graphiquement $y = Q^{2/3}$ comme une fonction de $x = \frac{1}{p}$, on obtient une droite coupant l'ordonnée à $y_0 = Q_k^{2/3}$. Si l'on divise la pente $\frac{dy}{dx}$ des droites par $y_0 = Q_k^{2/3}$, on obtient la constante b . La valeur suivante a été obtenue pour les résultats décrits ici:

$$b = 6,33 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{m}.$$

Un nombre bien plus important de mesures que celui indiqué plus haut est nécessaire pour définir la constante b avec suffisamment d'exactitude. Cependant la valeur donnée ici pour b suffisamment exacte car les gouttelettes entrant en question dans notre cas restent toutes dans l'ordre de grandeur de 10^{-6} m.

Le calcul correctif des résultats représentés dans la fig. 4 conduit à l'histogramme de la fig. 5 représentant les charges corrigées.

La moyenne des 148 charges élémentaires corrigées issues des résultats des 85 mesures est la suivante:

$$e_k = 1,61 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

Cette valeur ne diffère que faiblement de la valeur exacte de la charge élémentaire.

5 Adaptation à d'autres tensions secteur; Remplacement d'un fusible défectueux

La boîte d'alimentation est prévue pour une tension secteur de 220 V mais peut également fonctionner avec 110 V; 130 V ou 240 V. Il faut pour cela ouvrir l'appareil et changer les connexions du transformateur.

Procéder de la manière suivante:

Retirer la fiche secteur.

Démonter une des parois latérales en dévissant les 3 vis et retirer la plaque du fond avec le transformateur. La placer sur une table.

Retirer la languette du contact 220 V sur le transformateur et la ficher dans le contact caractérisé par la tension désirée.

Pour l'adaptation à 110 V c.a. ou 130 V c.a. remplacer également le fusible M 0,315 B par un M 0,63 B.

Pour le remplacement d'un fusible, débrancher la fiche secteur et dévisser le porte-fusible de la face arrière de l'appareil.

6 Entretien et maintenance

Le pulvérisateur n'envoie que de faibles quantités d'huile dans la chambre de Millikan. Ceci permet de ne nettoyer la chambre et son couvercle qu'à intervalles prolongés. Utiliser un chiffon doux et absorbant.

Les deux orifices du couvercle servant à injecter l'huile peuvent se boucher de temps en temps, si bien que l'huile ne peut plus pénétrer dans la chambre. Pour les déboucher, il suffit de les percer par exemple avec un trombone de bureau redressé.

Une bonne pulvérisation de l'huile n'est possible qu'avec une balle en caoutchouc en parfait état. Remplacer cette balle lorsque son usure inévitable ne permet plus un fonctionnement adéquat de l'appareil (pièce de rechange No. 68 576).

7 Complément à la section 4.3

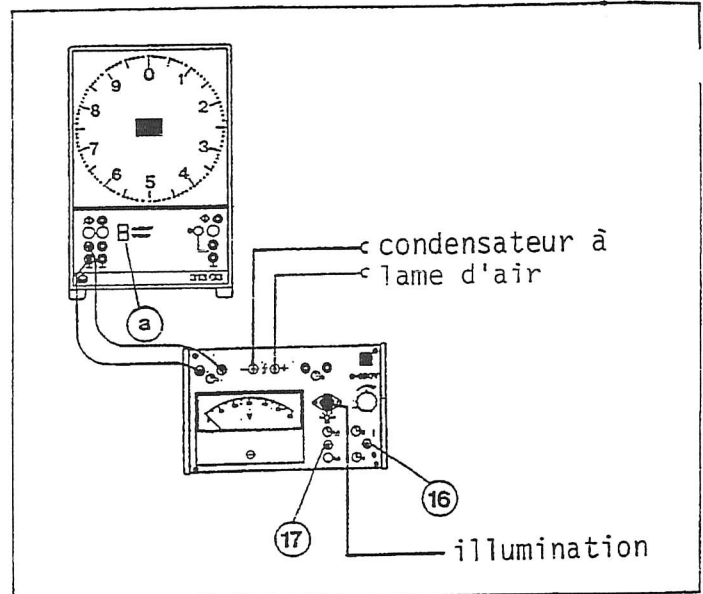


Fig. 6.1
Circuit avec le chronomètre électronique P pour la méthode d'équilibre

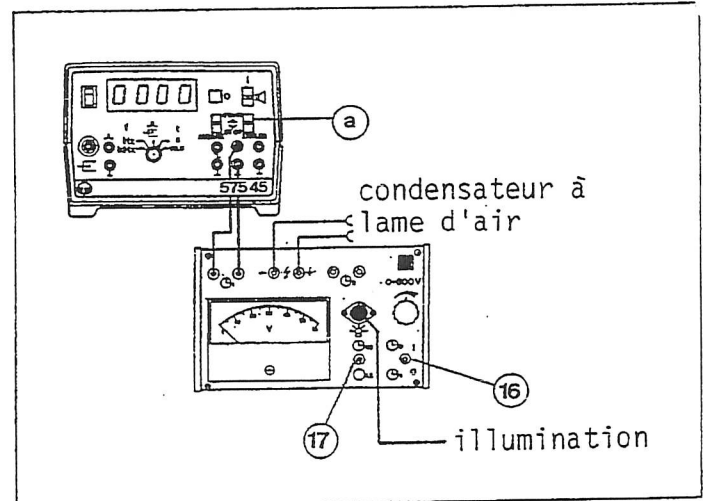


Fig. 6.2
Circuit avec le compteur P pour la méthode d'équilibre

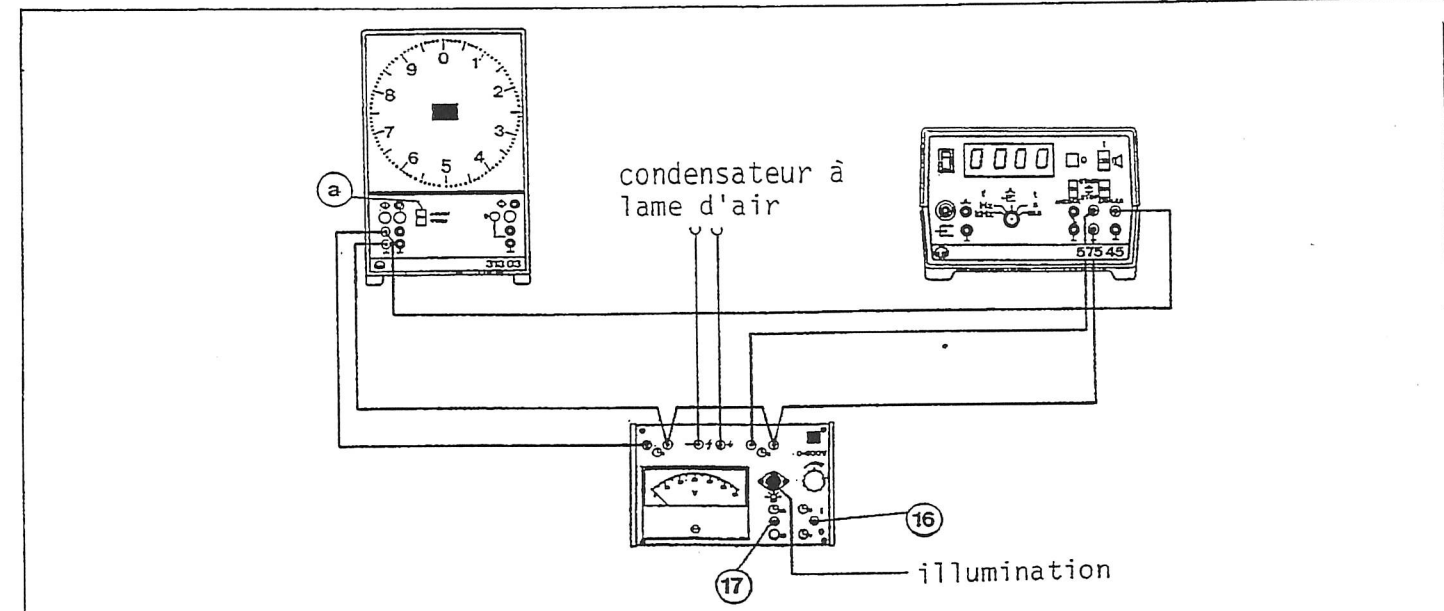


Fig. 6.3
Circuit avec le chronomètre électronique P et le compteur P pour la méthode dynamique