

MILLIKAN

1. But:

Mesure de la charge de l'électron par la méthode de la goutte de Millikan

2. Références:

- R. A. Millikan, The electron, The University of Chicago Press, Chicago 1968 (bibliothèque des T.P.II No 23)
- L. Landau et E. Lifschitz, Physique théorique, Vol. 5: Physique statistique, Mir, Moscou 1967 (bibliothèque de la Section de physique cote 202 LAN)
- Pasco scientific, instruction manual and experiment guide, model AP-8210, Millikan oil drop apparatus, version anglaise, ci après, traduction française faite par J. Edwards unige 2004.

3. Théorie:

L'expérience de Millikan permet de montrer de façon décisive qu'il existe, dans la nature, une charge élémentaire e et que seuls des multiples entiers de cette valeur sont possibles. Millikan (qui a reçu le prix Nobel pour cette expérience) a consacré, toute sa vie au développement et à la compréhension de cette expérience.

Comme nous allons tenter de le montrer dans cette brève notice, son expérience est extrêmement sophistiquée et touche à des domaines de la physique qui, même aujourd'hui, ne sont que partiellement compris

Le but du travail de Millikan est clair, premièrement montrer la quantification de la charge électronique, deuxièmement mesurer la valeur de la charge élémentaire. Mais, afin d'arriver à ce point-là, il est nécessaire d'avoir une idée sur des questions telles que:

- pourquoi une goutte se forme-t-elle ?
- pourquoi et comment peut-elle être chargée électriquement ?
- quelles sont les lois physiques qui régissent le mouvement d'un corps dans un fluide ?
- quelles sont les limites de validité, des formules empiriques connues sur le frottement visqueux et leurs éventuelles corrections ?

Nous nous attendons à ce que l'étudiant aborde l'expérience avec un esprit ouvert et vise plus loin que l'obtention d'une mesure proche de la valeur e , acceptée aujourd'hui, qui est égale à $1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Coulombs. Si l'on prête attention aux détails de l'expérience, il sera aussi possible de ressentir de la fascination, celle qui a fait que Millikan a consacré toute sa vie à ce travail. Quelques mots d'avertissement sont nécessaires:

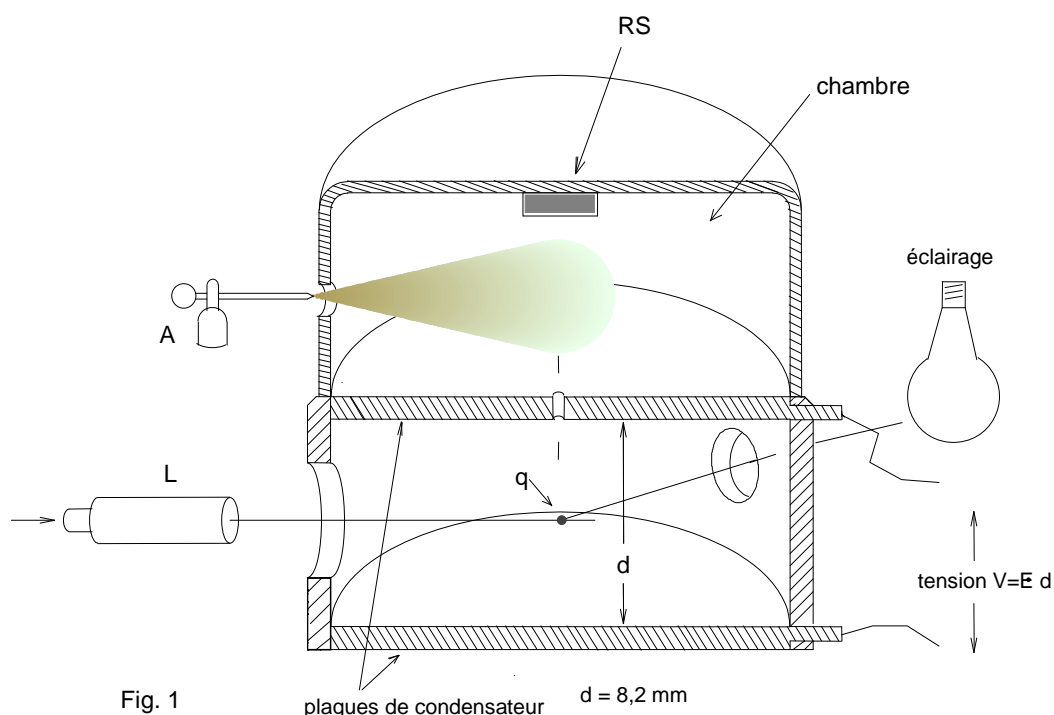
- Les étudiants qui ne prêtent pas attention aux détails de l'expérience se retrouveront, après deux semaines de travail, avec un ensemble de données qui seront sans significations.

- Soulignons qu'il n'y a pas qu'une seule façon de faire l'expérience de Millikan. D'autre part, les résultats finaux dépendent beaucoup d'une série de détails à chaque étape de la méthode utilisée.

- Nous attirerons l'attention sur les limitations qui pourraient apparaître selon la méthode choisie. Seul un travail sérieux, fait au laboratoire peut garantir une discussion sensée des résultats expérimentaux.

Voici une brève description du montage expérimental, suivie d'un survol sur la façon dont une goutte est formée et comment elle peut être chargée. Les résultats principaux de la dynamique des fluides utiles à l'expérience sont donnés ainsi que la correction de Millikan à la loi de Stokes sur les mouvements visqueux.

4. Montage expérimental:



La figure 1 montre le schéma de l'appareillage. Il y a un condensateur C dont les plaques sont séparées par une distance d . Entre les plaques, un champ électrique E peut être établi au moyen d'une tension fournie par une alimentation.

Un nuage de gouttes d'huile est produit au moyen d'un vaporisateur A; ces gouttes sont chargées à l'aide de l'ionisation produite par une source radioactive RS (nous discuterons ce point plus en détail par la suite)

Par gravité, les gouttes d'huile chargées tombent dans l'espace qui sépare les plaques. Leur mouvement peut être observé au moyen d'une lunette L. Une analyse du mouvement des gouttes d'huile, au moyen de la dynamique des fluides permet d'établir la relation entre la charge et la vitesse. Cette dernière est estimée en mesurant le temps nécessaire pour que la goutte traverse une distance prédéterminée et à partir de là, la valeur de q s'obtient.

L'appareillage de Millikan permet donc de tirer la charge à partir de mesures de vitesse. Les valeurs de q ainsi déterminées sont égales à n fois la valeur de la charge élémentaire e , nombre qui peut être obtenu en cherchant le plus grand commun diviseur de toutes les charges q mesurées.

Ci après, le manuel traduit de l'anglais fourni avec l'expérience de Millikan. On a inclus une partie de l'ancien protocole qui complète la traduction à la demande des étudiants, voir avec l'assistant la procédure à suivre.

INTRODUCTION

La charge électrique portée par une particule peut-être calculée en mesurant la force subie par celle-ci dans un champ électrique d'intensité connue. Il est relativement facile de produire un tel champ électrique, toutefois, la force exercée par celui-ci sur une particule ne portant qu'un ou plusieurs électrons d'excès est très faible. Par exemple, un champ de 1000 volts par cm exercerait seulement une force de $1.6 \cdot 10^{-9}$ dyne sur une particule avec un électron d'excès. Ceci est comparable à la force gravitationnelle agissant sur une particule de masse 10^{-12} gram.

Le succès de l'expérience de Millikan dépend de la capacité à mesurer des forces aussi faibles. Le comportement de petites gouttes d'huile chargées, ayant des masses de 10^{-12} gram ou moins, est observé dans un champ gravitationnel et électrique. En mesurant la vitesse de chute de la goutte dans l'air on peut, en utilisant la Loi de Stokes, calculer la masse de la goutte. L'observation de la vitesse de la goutte qui monte dans un champ électrique, permet le calcul de la force subie par la goutte d'huile et donc de sa charge.

Bien que cette expérience nous permette de mesurer la charge totale de la goutte, c'est seulement par une analyse des données obtenues et un certain degré d'habileté expérimentale que la charge d'un seul électron peut-être déterminée. En sélectionnant des gouttelettes qui s'élèvent et chutent lentement, on peut être certain que celles-ci ont un petit nombre d'électrons d'excès. Un certain nombre de ces gouttes doit être observé et leurs charges respectives calculées. Si les charges de ces gouttes sont des multiples entiers d'une certaine charge élémentaire, c'est une bonne indication de la nature atomique de l'électricité. Toutefois, étant donné que différentes gouttes ont été utilisées, reste à savoir quelle est l'influence de la goutte elle-même sur la charge. Cette incertitude peut-être éliminée en changeant la charge d'une goutte donnée pendant que celle-ci est en observation. Ceci est réalisé en plaçant une source d'ionisation près de la goutte. En fait, il est possible de changer la charge sur la même goutte plusieurs fois. Si les mesures sur la même goutte engendrent des résultats qui sont des multiples d'une charge élémentaire, ceci est la preuve de la nature atomique de l'électricité.

La mesure de la charge de l'électron permet aussi le calcul du nombre d'Avogadro. La quantité de courant requise pour déposer par électrolyse l'équivalent d'un gramme d'un élément sur une électrode (le faraday) est égal à la charge de l'électron multiplié par le nombre de molécules dans une mole.

La valeur du faraday soit $2.895 \cdot 10^{14}$ a été établie par des expériences d'électrolyse (plus communément exprimé dans le system mksa en tant que $9.625 \cdot 10^7$ coulombs/kg poids équivalent). En divisant le faraday par la charge de l'électron,

$$9.625 \cdot 10^5 [C \cdot mol^{-1}]$$

$$\frac{2.895 \cdot 10^{14} \text{ e.s.u. / gm poid equivalent}}{4.803 \cdot 10^{-10} \text{ e.s.u.}}$$

on obtient $6.025 \cdot 10^{23}$ molécules par mol ou le nombre d'Avogadro.

EQUATION POUR CALCULER LA CHARGE D'UNE GOUTTE

Une analyse des forces agissant sur une gouttelette d'huile nous donnera une équation pour la détermination de la charge portée par la goutte.

La Figure 1 Montre les forces agissant sur la goutte quand elle tombe dans de l'air et a atteint sa vitesse maximale (la vitesse maximale est atteinte en quelques millisecondes pour les gouttes dans cette expérience). Dans la Figure 1, v_f est la vitesse de chute (fall), k est le coefficient de friction entre l'air et la goutte, m est la masse de la goutte et g est l'accélération gravitationnelle. Vu que les forces sont égales et opposées:

$$mg = kv_f \quad (1)$$

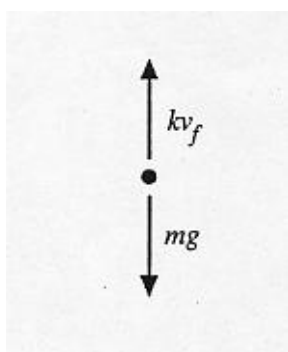


Figure 1

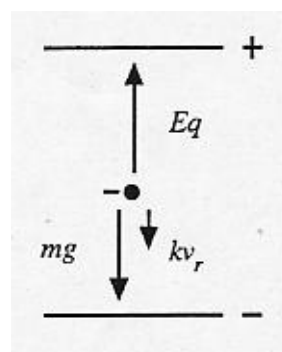


Figure 2

La Figure 2 montre les forces qui agissent sur une goutte quand elle monte sous l'effet du champ électrique. Dans la Figure 2, E est l'intensité électrique, q est la charge portée par la goutte et v_r est la vitesse d'ascension (rise). L'addition vectorielle des forces donne:

$$Eq = mg + kv_r \quad (2)$$

Dans les deux cas, la force d'Archimède joue aussi un rôle, mais vu que la densité de l'air est environ mille fois plus petite que celle de l'huile, cette force peut être négligée.

En éliminant k des équations (1) et (2) et en résolvant pour q on obtient :

$$q = \frac{mg(v_f + v_r)}{Ev_f} \quad (3)$$

Pour éliminer m de l'équation (3), on utilise l'expression pour le volume de la sphère :

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho \quad (4)$$

où a est le rayon de la gouttelette et ρ la densité de l'huile.

Pour calculer a , on utilise la Loi de Stokes, qui met en relation le rayon d'un corps sphérique avec sa vitesse de chute dans un milieu visqueux (avec coefficient de viscosité η).

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2g\rho}} \quad *$$
 (5)

Toutefois, la loi de Stokes n'est plus correcte quand la vitesse de chute des gouttelettes est inférieure à 0.1cm/s. En effet, dans ce cas les gouttelettes ont des rayons de l'ordre de 2 microns, ce qui est comparable au libre parcours moyen des molécules d'air et viole une des hypothèses faites dans la dérivation de la loi de Stokes. Etant donné que les vitesses des gouttelettes utilisées dans cette expérience se situent entre 0.01 et 0.001 cm/s, la viscosité doit être multipliée par un facteur de correction. La viscosité résultante est donc :

$$\eta_{eff} = \eta \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right)^{**}$$
 (6)

où b est une constante, p est la pression atmosphérique.

En remplaçant η par η_{eff} dans l'équation (5), et en résolvant pour a , on trouve pour le rayon :

$$a = \sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2g(\rho)}} - \frac{b}{2p}$$
 (7)

En substituant les équations (4), (5) et (6) dans l'équation (3), on obtient:

$$q = \frac{4}{3} \pi \rho g \left[\sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2g\rho}} - \frac{b}{2p} \right]^3 \frac{(v_f + v_r)}{E v_f}$$
 (8)

L'intensité du champ électrique est donnée par $E=V/d$, où V est la différence de potentiel entre les plaques parallèles séparées par une distance d . E , V et d sont tous exprimés dans le même système d'unités. Si E est exprimé en unités électrostatiques (e.s.u.), V en volts et d en centimètres, la relation est:

$$E(e.s.u.) = \frac{V(volts)}{300d(cm)}$$
 (9)

En substituant les équations (7) et (8) dans l'équation (6) et en réarrangeant les termes on a :

$$q = 400\pi d \rho g \left[\sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2g\rho}} - \frac{b}{2p} \right]^3 \frac{(v_f + v_r)}{V v_f} e.s.u.$$
 (10)

Les termes dans la première parenthèse n'ont besoin d'être déterminés qu'une fois pour chaque appareil particulier. Le deuxième terme est déterminé pour chaque gouttelette, tandis que le terme dans la troisième parenthèse doit être recalculé à chaque changement de charge de la goutte observée.

Les définitions des symboles utilisés, avec leurs unités respectives utilisées dans l'équation (10) sont*** :

q – charge, en e.s.u., portée par la gouttelette
 d – séparation des plaques du condensateur en cm
 ρ - densité de l'huile en g / cm^3
 g – accélération gravitationnelle en cm / s^2
 η - viscosité de l'air ($dyne s / cm^2$)
 b – constante, égale à $6.17 \cdot 10^{-4}$ (cm de Hg) (cm)
 p – pression barométrique en cm de mercure
 a – rayon de la goutte en cm comme calculée dans l'équation (5)
 v_f - vitesse de chute en cm/s
 v_r - vitesse d'ascension en cm/s
 V – différence de potentiel entre les plaques en volts

Note : La valeur reconnue de e est $4.803 \cdot 10^{-10}$ e.s.u., ou $1.60 \cdot 10^{-19}$ coulombs

*Pour des suppléments d'information concernant la loi de Stokes, se référer à *Introduction to theoretical Physics*, de L. Page (New York, Van Nostrand), chapitre 6.

**Une dérivation peut être trouvée dans *The Electron* de R. A. Millikan (Chicago, The University Of Chicago Press), chapitre 5.

***Les dérivations modernes de q sont généralement faites en unités SI. (Voir *Procédure Expérimentale, Calcul de la Charge d'un Electron*, page 7)

EQUIPEMENT

Equipement inclus:

- Plate-forme de l'appareil et commutateur de chargement des plaques (voir description détaillée ci-dessous et en page 6).
- transformateur DC de 12 volts pour la lampe halogène
- huile non-volatile (Huile Minérale Squibb #5597, densité = 886 kg/m^3)
- vaporisateur

Note: On a mesuré la densité de l'Huile Minérale Squibb et obtenu la valeur de 886 kg/m^3 . Toutefois, les densités de lots

différents d'huile minérale peuvent varier légèrement; c'est pourquoi, pour une plus grande précision, il faudrait déterminer la densité de l'huile minérale utilisée.

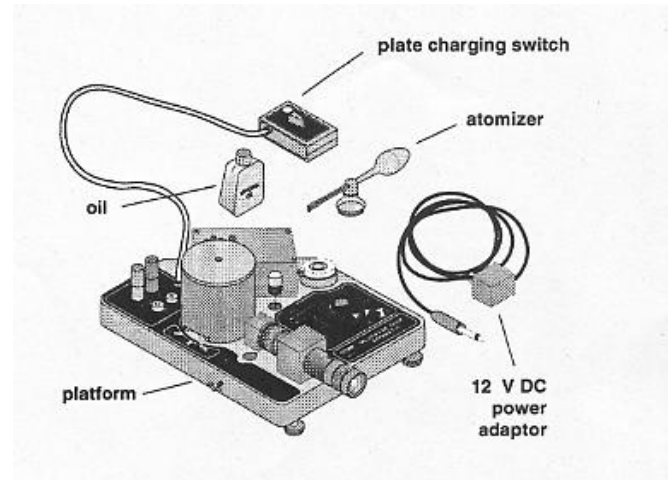
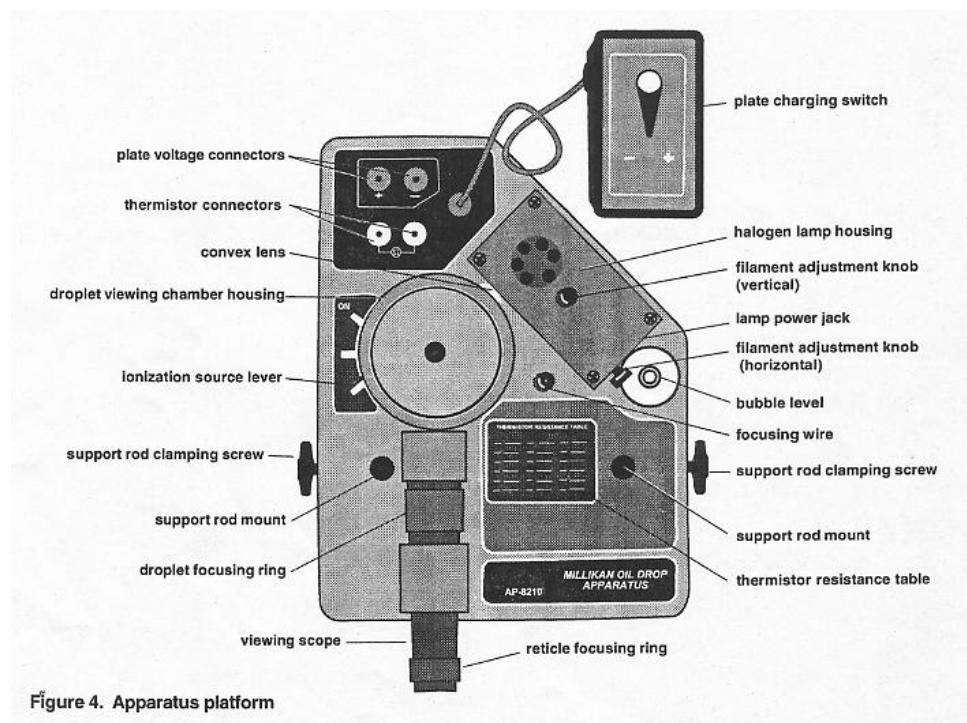


Figure 3. Equipement inclus
Figure 4 Plate-forme de l'appareil



Composantes de la plate-forme:

- chambre d'observation des gouttelettes (voir détails plus bas)

- Microscope (30X) avec réticule (séparation des lignes : grosses divisions 0.5 mm, petites divisions 0.1 mm, anneau de focalisation du réticule et anneau de focalisation des gouttes).
- Lampe halogène (ampoule halogène 12 V, 5 W et fenêtre dichroïque d'absorption de la chaleur infrarouge, boutons de réglage horizontal et vertical).
- Fil de focalisation (pour régler le microscope)
- Bornes de tension des plaques
- Bornes du thermistor (le thermistor est monté sur la plaque du fond)

ATTENTION: Ne pas appliquer de tension aux bornes du thermistor!

- Tableau du thermistor (résistance en fonction de la température)
- Commande de la source d'ionisation avec trois positions : Ionisation ON, Ionisation OFF et "Spray Droplet Position" (Position Vaporisation des Gouttes)
- Niveau à bulles
- Visser et entrée pour tiges de support (permettant le montage de la plate-forme sur un pied, afin de régler la hauteur du microscope)
- Trois pieds de réglage
- Commutateur de chargement des plaques (au bout d'un câble de 1 mètre pour éviter la vibration de la plate-forme à l'allumage)

Composantes de la chambre d'observation (Figure 5)

- Couvercle
- Carter
- Bouchon pour orifice de passage des gouttes
- Plaque supérieure du condensateur (laiton)
- Entretoise en plastique (environ 7.6 mm d'épaisseur)
- Plaque inférieure du condensateur (laiton) :
 - source α de thorium-232 (0.008 mcurie)

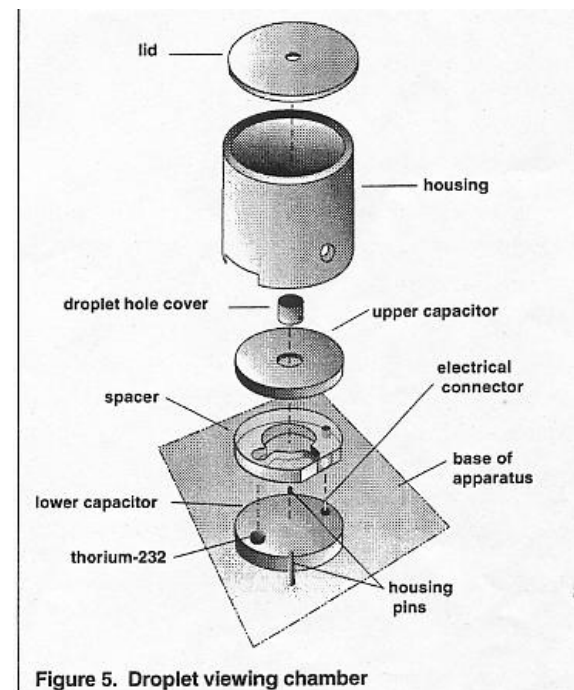
-connexion électrique à la plaque supérieure

- Lentille convexe

Note: Le Thorium-232 est un émetteur naturel faible de particules alpha avec temps de demi-vie de $1.41 \cdot 10^{10}$ années. Il n'est pas régulé dans son utilisation et n'est pas nocif pour l'utilisateur de l'Appareil à Goutte d'Huile de Millikan PASCO.

Équipement requis, non inclus:

- haute tension, alimentation bien réglée qui fournit jusqu'à 500 V DC, 10mA minimum
- multimètre digital (pour mesurer la tension et la résistance)
- Câbles de raccordement avec fiche banane mâle
- Chronomètre



INSTALLATION DE L'EQUIPEMENT

Régler l'environnement de la salle d'expérience :

1. Rendre la salle aussi sombre que possible, tout en permettant assez de lumière pour lire le multimètre et le chrono, ainsi que pour relever les données
2. S'assurer que l'arrière-plan derrière l'appareil est sombre.
3. Choisir une location libre de courants d'air ou de vibrations

Ajuster la hauteur de la plate-forme et la mettre à niveau :

1. Placer l'appareil sur une table solide et horizontale, avec le microscope à une hauteur qui permet à l'expérimentateur d'être assis droit lors de l'observation des gouttes. Si nécessaire pour atteindre la bonne hauteur, monter l'appareil avec deux tiges de support (ME-8736) sur le pied (ME-8735) (Figure 6)
2. Utiliser le niveau à bulle pour mettre à niveau l'appareil. Pour ce faire, selon l'installation, régler les vises sur le pied ou sur la plate-forme de l'appareil.

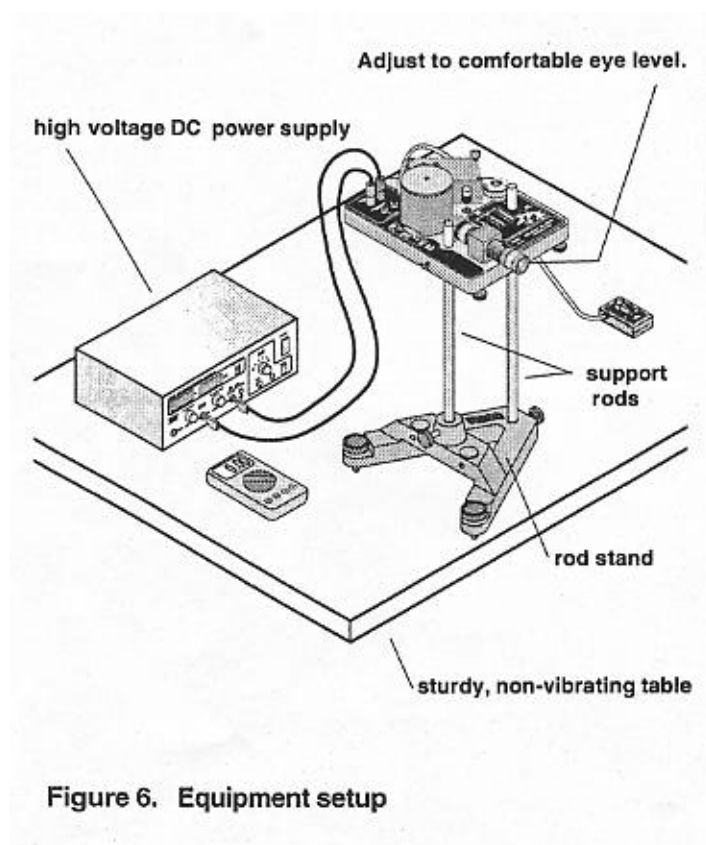


Figure 6. Installation de l'équipement

Mesure de la séparation des plaques

1. Désassembler la chambre d'observation des gouttelettes. Premièrement en soulever le carter, puis retirer la plaque supérieure du condensateur et l'entretoise (voir Figure 5). Mesurer l'épaisseur du l'entretoise en plastique (qui équivaut à la distance de séparation des plaques) avec un micromètre. N'incluez pas, dans votre mesure le bord surélevé du séparateur. La précision de cette mesure est importante pour le degré de précision des mesures expérimentales. Enregistrez la mesure.

ATTENTION : Veillez à ne pas rayer les plaques de laiton et le séparateur lors de la manipulation

ATTENTION : Toutes les surfaces impliquées dans les mesures doivent être propres pour éviter les erreurs de lecture

ALIGNER LE SYSTEME OPTIQUE

Régler le microscope

1. Ré-assembler le séparateur et la plaque supérieure du condensateur sur la plaque inférieure. Replacer le carter en alignant les trous et les chevilles (voir Figure 5)

Note: La source de Thorium-232 et la borne électrique sur la plaque inférieure du condensateur s'emboîtent respectivement dans des trous de taille appropriée.

2. Dévisser le fil de focalisation de sa place sur la plate-forme et l'insérer soigneusement dans le trou au centre de la plaque supérieure du condensateur (Figure 7)

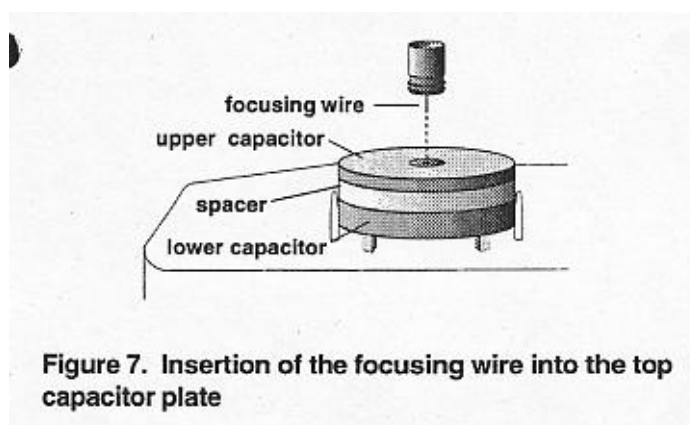


Figure 7. Insertion du fil de focalisation dans la plaque sup. du condensateur

3. Connecter le transformateur 12 V DC à la lampe

**ATTENTION : Vérifiez que le transformateur soit réglé sur la bonne tension :
100, 117, 220 ou 240 V**

4. Régler le réticule en tournant l'anneau de focalisation du réticule.
5. Observer le fil de focalisation à travers le microscope et tourner l'anneau de focalisation des gouttes jusqu'à ce que l'image soit parfaitement nette.

Note : L'observation sera plus simple pour les expérimentateurs portant des lunettes si ceux-ci règlent le microscope sans leurs lunettes.

Focalisation du filament halogène

1. Ajuster le bouton de réglage horizontal du filament halogène. La lumière est placée au mieux quand le côté droit du fil de focalisation est le plus brillant (soit avec le plus grand contraste avec le centre du fil)
2. Tout en observant le fil de focalisation avec le microscope, tourner le bouton de réglage vertical du filament halogène jusqu'à ce que la lumière soit la plus brillante dans la région du réticule.
3. Remettre le fil de focalisation à sa place

FONCTIONS DES COMMANDES

La commande de la source d'ionisation

1. Quand le levier de la commande est réglé sur la position **OFF**, la source d'ionisation est entourée de toutes parts par un bouclier de plastique, ainsi il n'y a pratiquement aucune particule alpha qui entre dans la région où se trouvent les gouttes.
2. Sur la position **ON**, le bouclier de plastique est ôté et la région où se trouvent les gouttes est exposé aux particules alpha ionisantes émises par le thorium-232
3. Sur la position **Spray Droplet**, un petit trou est ouvert dans la chambre qui permet à l'air d'y circuler lorsque les gouttelettes d'huile y sont vaporisées.

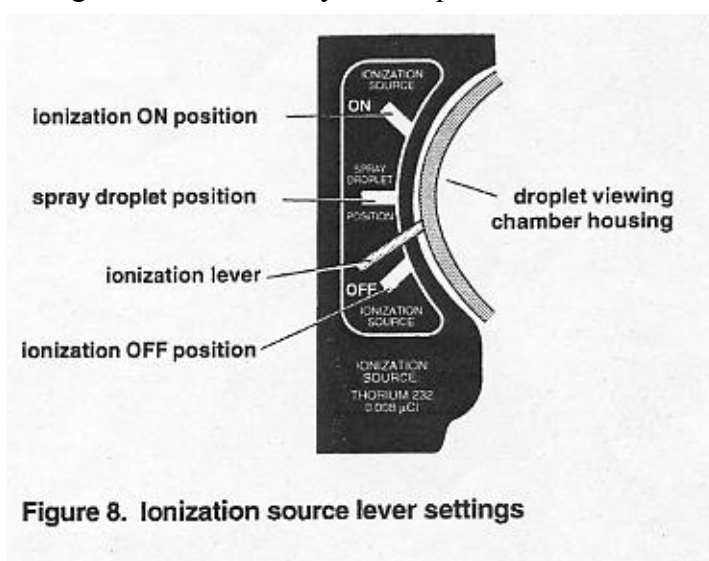


Figure 8. Réglages de la commande de la source d'ionisation

Commutateur de chargement des plaques

Le commutateur de chargement des plaques a trois positions :

1. **TOP PLATE-**: La borne négative est connectée à la plaque du haut.
2. **TOP PLATE+**: La borne négative est connectée à la plaque du bas
3. **PLATES GROUNDED**: Les plaques sont déconnectées de la source de tension et connectées électriquement.

AJUSTER ET MESURER LA TENSION

1. Relier la source de haute tension DC aux bornes de tension en utilisant les câbles de raccordement avec fiches bananes et régler sur une tension de 500 V.
2. Utiliser le multimètre digital pour mesurer la tension fournie aux plaques du condensateur.

ATTENTION : Mesurez la tension aux bornes de tension des plaques et non directement entre les plaques. Il y a une résistance de 10 M Ω en série avec chaque plaque pour prévenir les chocs électriques.

DETERMINER LA TEMPERATURE DE LA CHAMBRE D'OBSERVATION

1. Connecter le multimètre aux bornes du thermistor et mesurer la résistance du thermistor. Se référer à la Tableau de Résistance du Thermistor se trouvant sur la plate-forme pour trouver la température de la plaque inférieure. La température mesurée devrait correspondre à celle dans la chambre d'observation des gouttelettes.

ATTENTION : Bien que la fenêtre dichroïque réfléchisse une grande partie de la chaleur générée par la lampe halogène, la température dans la chambre d'observation va augmenter après une exposition prolongée à la lumière. C'est pourquoi la température à l'intérieur de la chambre d'observation doit être déterminée périodiquement (à peu près toutes les 15 minutes).

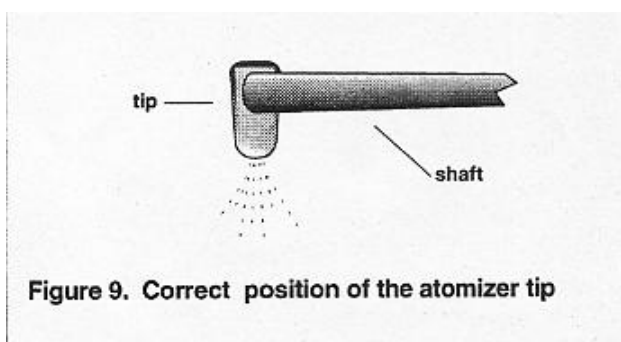
DEMARCHE EXPERIMENTALE

2. Compléter l'assemblage de la chambre d'observation en plaçant le bouchon sur l'orifice de passage des gouttes situé sur la plaque supérieure du condensateur et en installant le couvercle sur le carter (voir Figure 5).

Note : Le bouchon empêche d'autres gouttelettes de pénétrer dans la chambre une fois l'expérience entamée.

Introduire les gouttelettes dans la chambre

1. Remplir le vaporisateur d'huile de densité connue (par exemple, Squibb #5597 Mineral Oil, densité : 886 kg / m³).
2. Préparer le vaporisateur en pressant rapidement la poire jusqu'à ce que l'huile sorte. S'assurer que la pointe du vaporisateur est dirigée vers le bas (90° par rapport à l'axe du



bras, voir Figure 9)

Figure 9. Position correcte de la pointe du vaporisateur

3. Placer le levier de commande de la source d'ionisation sur "Spray Droplet Position" pour permettre à l'air de s'échapper de la chambre pendant l'introduction des gouttes.
4. Placer le bec du vaporisateur dans le trou sur le couvercle de la chambre d'observation des gouttelettes.
5. Tout en observant dans le microscope, presser sur la poire du vaporisateur une fois rapidement. Ensuite presser lentement pour forcer les gouttelettes à passer à travers le trou dans le bouchon pour orifice de passage des gouttes et le trou d'entrée dans la plaque supérieure du condensateur pour enfin arriver dans l'espace entre les plaques.
6. Lorsque vous apercevez une pluie de gouttes dans le microscope, placer le levier de commande de la source d'ionisation sur **OFF**.

ATTENTION : Si des vaporisations répétées ne produisent pas de gouttes mais une illumination nuageuse du champ, le trou dans la plaque supérieure ou dans le couvercle sont peut-être bouchés. Dans ce cas, se référer à la section de Maintenance pour les instructions de nettoyage.

Note : La technique exacte d'introduction des gouttes devra être développée par l'expérimentateur. Le but est d'obtenir un nombre réduit (et non pas un brouillard) de gouttes, dont l'une peut être sélectionnée. Il est important de se rappeler que les gouttes sont forcées dans le champ d'observation par la pression du vaporisateur. C'est pourquoi une utilisation abusive du vaporisateur peut amener à ce qu'il y ait trop de gouttes dans le champ d'observation et, plus spécifiquement, dans la région entre le mur de la chambre et le point focal du microscope.

Note : Si tout le champ d'observation devient saturé de gouttes, de telle manière à ce qu'aucune goutte ne puisse être sélectionnée, attendre trois ou quatre minutes jusqu'à ce que les gouttes disparaissent ou désassembler la chambre d'observation (après avoir éteint la source de tension DC), ce qui éliminera les gouttes. Lorsque la quantité d'huile sur les différentes parties de la chambre devient excessive, les nettoyer comme indiqué dans la section de Maintenance. Rappelez-vous: moins l'huile est vaporisée dans la chambre moins elle devra être nettoyée.

Sélection de la goutte

1. De toutes les gouttes dans le champ de vision, en sélectionner une qui à d'une part tombe lentement (entre 0.02-0.05 mm/s) lorsque le commutateur des plaques est sur la position "Plates Grounded" et d'autre part peut-être entraînée vers le haut ou vers le bas en appliquant la tension.

Conseil : Une goutte qui, en tombant, nécessite approximativement 15 secondes pour parcourir la distance entre les lignes majeures du réticule (0.5 mm), va s'élever de la même distance sous l'influence d'un champ électrique (1000 V/cm), avec les charges et dans les temps suivants : 15 s, 1 électron d'excès; 7 s, 2 électrons d'excès; 3 s, 3 électrons d'excès (Note: ces rapports sont approximatifs).

Note : S'il y a trop de gouttes dans le champ de vision, on peut s'en débarrasser en jouant avec la tension.

S'il n'y a pas assez de gouttes chargées, placer le levier de commande de la source d'ionisation sur **ON** pendant environ 5 secondes.

2. Une fois trouvé la goutte appropriée en charge et en taille, régler le microscope afin qu'elle soit nette.

Note : La goutte est focalisée au mieux lorsqu'elle apparaît comme un point brillant.

Prise de données sur l'ascension et la chute de la goutte

1. Mesurer la vitesse d'ascension (plaques chargées) et de chute (plaques non chargées) de la goutte sélectionnée entre 10 et 20 fois. Manœuvrer la goutte comme voulu en utilisant le commutateur des plaques.
2. Calculer la charge de la goutte. Si le résultat de cette première détermination est plus grande que 5 électrons d'excès, vous devrez utiliser par la suite des gouttes plus lentes
3. Introduire plus d'huile dans la chambre en utilisant la procédure vue précédemment. Sélectionner une autre goutte
4. Mesurer les vitesses d'ascension et de chute de la nouvelle goutte entre 10 et 20 fois ou jusqu'à ce que la charge change spontanément ou que la gouttelette sorte du champ de vision.
5. Amener la goutte en haut du champ de vision et positionner le levier de commande de ionisation sur **ON** quelques secondes pendant la chute de la goutte.
6. Si la vitesse d'ascension de la goutte change, faire autant de mesures de la nouvelle vitesse d'ascension que possible (10-20 mesures).
7. Si la goutte est encore visible, tentez à nouveau de changer la charge sur la gouttelette en introduisant plus de particules alpha comme décrit précédemment et mesurer la nouvelle vitesse d'ascension, 10-20 fois si possible.
8. Répéter l'étape (7) autant de fois que possible.
9. Enregistrer le potentiel des plaques, la densité d'huile, la viscosité de l'air à la température de la chambre (Appendice A) et la pression barométrique pour série de mesure de la vitesse.

Note : Il est recommandé d'essayer d'observer autant de charges différentes sur la même goutte que possible.

Calcul de la charge d'un électron

1. Utiliser la formule dérivée dans l'introduction pour calculer la charge de l'électron* :

$$q = \frac{4}{3} \pi \rho g \left[\sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2g\rho}} - \frac{b}{2p} \right]^3 \frac{v_f + v_r}{Ev_f}$$

*La formule est dérivée de l'équation (10)(page 3), en utilisant les unités SI, comme défini ci-dessous :

q – charge, en coulombs., portée par la gouttelette

d – séparation des plaques du condensateur en m

ρ - densité de l'huile en kg / m^3

g – accélération gravitationnelle en m / s^2

η - viscosité de l'air (Ns / m^2) (Appendice A)

b – constante, égale à $8.20 \cdot 10^{-3} Pa \cdot m$

p – pression barométrique en pascals

a – rayon de la goutte en m

v_f - vitesse de chute en m/s

v_r - vitesse d'ascension en m/s

V – différence de potentiel entre les plaques en volts

Note : La valeur reconnue de e est $1.60 \cdot 10^{-19}$ coulombs

Procédure suggérée pour le calcul de la charge d'un électron :

1. En utilisant l'équation (7), calculer le rayon (a) de la goutte d'huile:

$$a = \sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2g\rho}} - \frac{b}{2p}$$

2. Substituer a de l'équation ci-dessus pour trouver la masse m de la goutte d'huile :

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho$$

$$= \frac{4}{3} \pi \left[\sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2g\rho}} - \frac{b}{2p} \right]^3 \rho$$

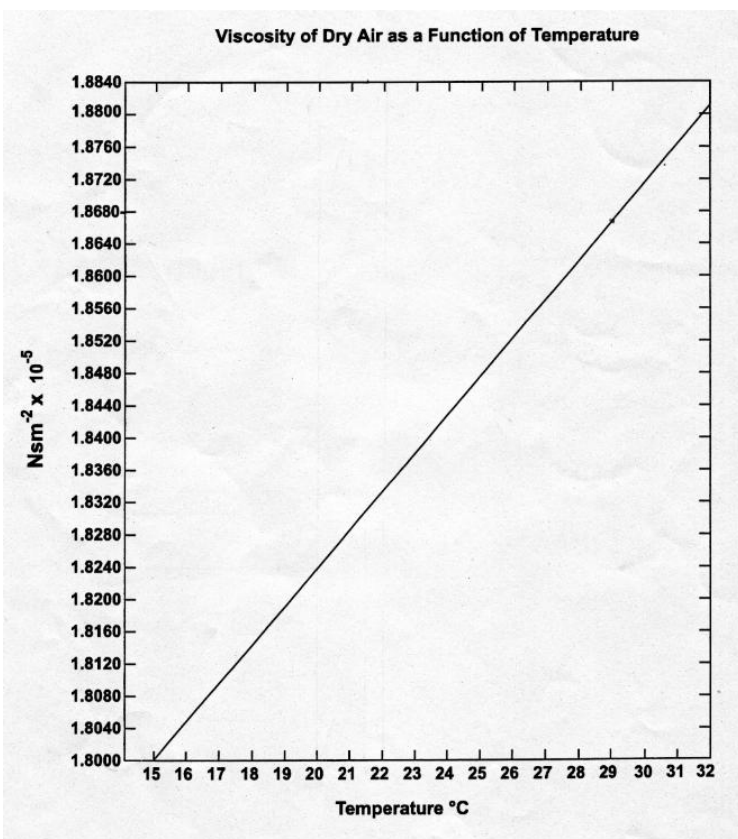
3. Substituer m de l'égalité ci-dessus dans l'équation (3) pour trouver la charge portée par la goutte (q) :

$$q = \frac{mg(v_f + v_r)}{Ev_f}$$

$$= \frac{4}{3}\pi\rho g \left[\sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2g\rho}} - \frac{b}{2p} \right]^3 \frac{(v_f + v_r)}{Ev_f}$$

Note : L'équation (10) est équivalente à l'équation ci-dessus, car:

$$E(e.s.u.) = \frac{V(\text{volts})}{300d(\text{cm})}$$



Millikan Oil Drop Apparatus Thermistor Resistance at Various Temperatures

THERMISTOR RESISTANCE TABLE					
°C	X10 ⁶ Ω	°C	X10 ⁶ Ω	°C	X10 ⁶ Ω
10	3.239	20	2.300	30	1.774
11	3.118	21	2.233	31	1.736
12	3.004	22	2.169	32	1.700
13	3.897	23	2.110	33	1.666
14	2.795	24	2.053	34	1.634
15	2.700	25	2.000	35	1.603
16	2.610	26	1.950	36	1.574
17	2.526	27	1.902	37	1.547
18	2.446	28	1.857	38	1.521
19	2.371	29	1.815	39	1.496

HISTORIQUE

NOTES HISTORIQUES

Les Grecques furent les premiers à rendre compte des effets de l'électricité lorsqu'ils notèrent que l'ambre attirait des objets légers après avoir été frotté. Cependant aucune théorie ne vit le jour avant 1747, quand Benjamin Franklin proposa qu'un fluide électrique ou feu existe dans toute matière en plus ou moins grande quantité. Un excès de ce fluide produirait une charge positive et un déficit une charge négative. Une théorie légèrement différente fut mise en avant par le physicien Symmer 12 ans plus tard. Il proposa que la matière est un état neutre qui n'exhibe aucune propriété électrique car il contient des quantités égales d'un fluide sans masse, appelées respectivement électricité positive et négative.

Franklin postula aussi l'existence d'une particule électrique assez petite pour passer à travers la matière. Les expériences d'électrolyse de Faraday démontrèrent que lorsqu'un courant passe à travers un électrolyte, les masses des éléments déposés sur les électrodes opposées sont proportionnelles aux masses molaires des éléments. Ceci renforçait le concept d'une particule élémentaire de Faraday. Les théories des fluides, ainsi qu'une théorie décrivant l'électricité comme un état de tension de la matière, étaient les principales explications des phénomènes électriques jusque tard dans le 19^e siècle.

PREMIERES DETERMINATIONS DE e

Le mot "électron" fut suggéré en premier en 1891 par Dr. G. Johnstone Stoney comme un nom pour "l'unité naturelle de l'électricité", c'est à dire, la quantité d'électricité qui doit passer à travers une solution pour libérer un atome d'hydrogène ou toute substance monovalente à une électrode. La charge de l'électron multipliée par le nombre de molécules dans un gramme mole donnerait alors la quantité d'électricité requise pour déposer un gramme mole par électrolyse. Cette quantité fut établie par Faraday à 9650 unités électromagnétiques absolues d'électricité. En utilisant cette méthode, Stoney obtint une valeur de $0.3 \cdot 10^{-10} e.s.u.$ (la Théorie Cinétique procura la base pour l'estimation de Stoney du nombre d'Avogadro).

La première tentative expérimentale pour mesurer la charge d'un ion fut faite par Townsend vers la fin des années 1890. Il avait observé que des gaz positivement chargés d'hydrogène et d'oxygène étaient produits durant l'électrolyse de l'acide sulfurique (malgré le fait qu'il y avait un billion (10^{12}) de molécules neutres pour chaque molécule chargée). Cette méthode fut utilisée pour produire un gaz ionisé qui était ensuite barboté dans de l'eau pour créer un nuage. Pour sa détermination de e , Townsend opéra de la manière suivante :

1. Il supposa que dans de la vapeur d'eau saturée, celle-ci condensait autour de chaque ion pour former des gouttelettes et qu'il y aurait par conséquent autant de gouttes que de ions.
2. Il détermina à l'aide d'un électromètre à quadrant la charge électrique totale par centimètre cube de gaz.
3. Il trouva le poids total du gaz en le passant dans des tubes à dessécher et en déterminant l'augmentation de poids de ces tubes.

4. Il établit le poids moyen des gouttelettes d'eau composant le nuage en observant leurs vitesses de chute sous l'effet de la gravitation et en calculant leur rayon moyen à l'aide d'une loi purement théorique connue sous le nom de Loi de Stokes.
5. Il divisa le poids du gaz par le poids moyen des gouttelettes d'eau pour en obtenir le nombre, qui suivant la supposition 1 est égale au nombre d'ions. Il divisa ensuite la charge totale par centimètre cube par le nombre d'ions pour en extraire la charge moyenne portée par chaque ion, c'est à dire e^1 .

Townsend parvint à des résultats de l'ordre de $3 \cdot 10^{-10} e.s.u.$ pour e . J.J. Thomson, en 1900, utilisa une méthode similaire à celle de Townsend et obtint une valeur de $6 \cdot 10^{-10} e.s.u.$ Toutefois, dans les deux méthodes la première supposition (chaque goutte formée autour d'un seul ion) s'avéra comme étant seulement approximativement correcte et les méthodes expérimentales n'étaient pas adéquates pour fournir une détermination précise de e .

H.S. Wilson améliora la méthode de Townsend et Thomson en ajoutant deux plaques de laiton connectables à une batterie de 2000 volt. Un nuage était créé entre ces plaques (non chargé) et la vitesse de chute du nuage enregistré. Un second nuage était ensuite formé et sa vitesse observé dans un champ électrique (les plaques étant chargées). Vu que les deux vitesses sont proportionnelles aux forces agissant sur les gouttes² et que la vitesse du nuage avec les plaques non-chargées détermine par la Loi de Stokes la taille et la masse des gouttes, Wilson fut capable d'obtenir la valeur de $3 \cdot 10^{-10} e.s.u.$ pour e . Etant donné que les mesures de Wilson étaient toujours faites sur le haut du nuage et donc avec les gouttes de plus faible charge (les gouttes les plus chargées étant entraînées vers le bas plus rapidement dans le champ), la supposition d'un ion par goutte était valide.

LA DETERMINATION DE e PAR MILLIKAN

Millikan améliora l'installation de Wilson en utilisant un potentiel plus élevé entre les plaques, de sorte que la vitesse de chute du nuage n'était pas seulement ralentie, mais pouvait être inversée lors de l'application du champ. Certaines gouttes se déplaçaient vers le haut tandis que d'autres continuaient leur chemin vers le bas. Quelques gouttes, qui contenaient une charge d'une magnitude telle que la force de gravité agissant sur la goutte égalait presque la force due au champ électrique, demeuraient dans le champ de vision. En variant le potentiel des plaques, Millikan pouvait équilibrer ces gouttes. Ceci était une nette amélioration, car toutes les mesures pouvaient à présent être réalisées sur une seule goutte. En utilisant cette méthode, Millikan fut capable d'observer les propriétés d'ions individuels et de déterminer si des ions différents portent une charge identique.

Dans le passage suivant, tiré du "Philosophical Magazine" de février 1910, Millikan décrit la marche à suivre de l'expérience :

"Les observations des vitesses de chute furent effectuées avec un télescope à focalisation courte placé à une distance d'environ 2 pieds des plaques. Sur la lunette étaient disposées trois réticules espacés régulièrement... Une petite section de l'espace entre les plaques était illuminée par un étroit rayon de lumière à arc, la chaleur de l'arc étant absorbée par trois cellules d'eau montées en série. L'air entre les plaques était ionisé par 200 mg de radium à une

¹ Résumé du livre *The Electron* de Robert A. Millikan (University of Chicago Press, Chicago, 1993, p. 45-46)

² Avec les plaques non chargées, la force est mg où m est la masse et g l'accélération gravitationnelle. Avec les plaques chargées la force est $mg \pm Ee_n$ où E est l'intensité du champ entre les plaques et e_n la charge de la goutte.

distance de 3 à 10 cm des plaques et dont l'activité est de 20 000. A peu près une seconde après la production du nuage, le radium était retiré... et le champ enclenché grâce à un commutateur. Si les gouttes ne se trouvaient pas immobilisées par le champ, la différence de potentiel entre les plaques était changée... Les réticules étaient positionnés près de la plaque inférieure et dès qu'une goutte stationnaire se trouvait quelque part au-dessus du réticule supérieur, elle était observée durant quelques secondes pour s'assurer qu'elle ne bougeait pas, ensuite le champ était coupé et les plaques court-circuitées grâce au commutateur, afin qu'elles ne retiennent aucune charge. La goutte était ensuite chronométrée lorsqu'elle passait à travers les réticules, l'une des deux aiguilles du chronomètre étant arrêtée à l'instant de passage du réticule central et l'autre à l'instant de passage du réticule inférieur. On vérifiera que cette méthode d'observation fournit un double contrôle sur l'évaporation; en effet si la vitesse de la goutte est constante dans un premier temps, c'est qu'elle ne s'évapore pas suffisamment pour influencer les mesures, si elle commence à s'évaporer de manière appréciable, le temps requis pour passer le deuxième espace devrait être plus grand que le temps requis pour passer le premier. On verra dans les observations qui suivent que ceci n'était généralement pas le cas.

C'est une expérience très intéressante et instructive que de regarder l'une de ces gouttes s'arrêter puis repartir ou même changer de direction, lorsque le champ est éteint ou allumé. J'ai souvent attrapé une goutte qui était simplement trop légère pour rester immobile et je l'ai déplacée quatre ou cinq fois entre les deux même réticules, la regardant dans un premier temps tomber sous l'effet de la gravité lorsque le champ était éteint, puis s'élever à l'encontre de la gravité quand le champ était allumé...

De plus, vu que les observations ... sont toutes faites sur la même goutte, toutes les incertitudes sur le fait de pouvoir reproduire les mêmes conditions pour des nuages différents, disparaissent. Il n'y a donc plus d'incertitude théorique dans la méthode à part de savoir si la Loi de Stokes s'applique à la vitesse de chute de ces gouttes sous l'effet de la gravité."

Les expériences avec gouttes d'eau fournirent une valeur de $3.422 \cdot 10^{-10} e.s.u.$ pour e . Toutefois, l'aspect le plus important de ces expériences était l'observation par Millikan qu'une goutte qui montait pouvait soudainement changer de vitesse. Ce phénomène était facilement engendré en plaçant une source radioactive près de la goutte. Ceci démontrait que la goutte avait "capturé" un ion, ce qui changeait sa charge et donc sa vitesse.

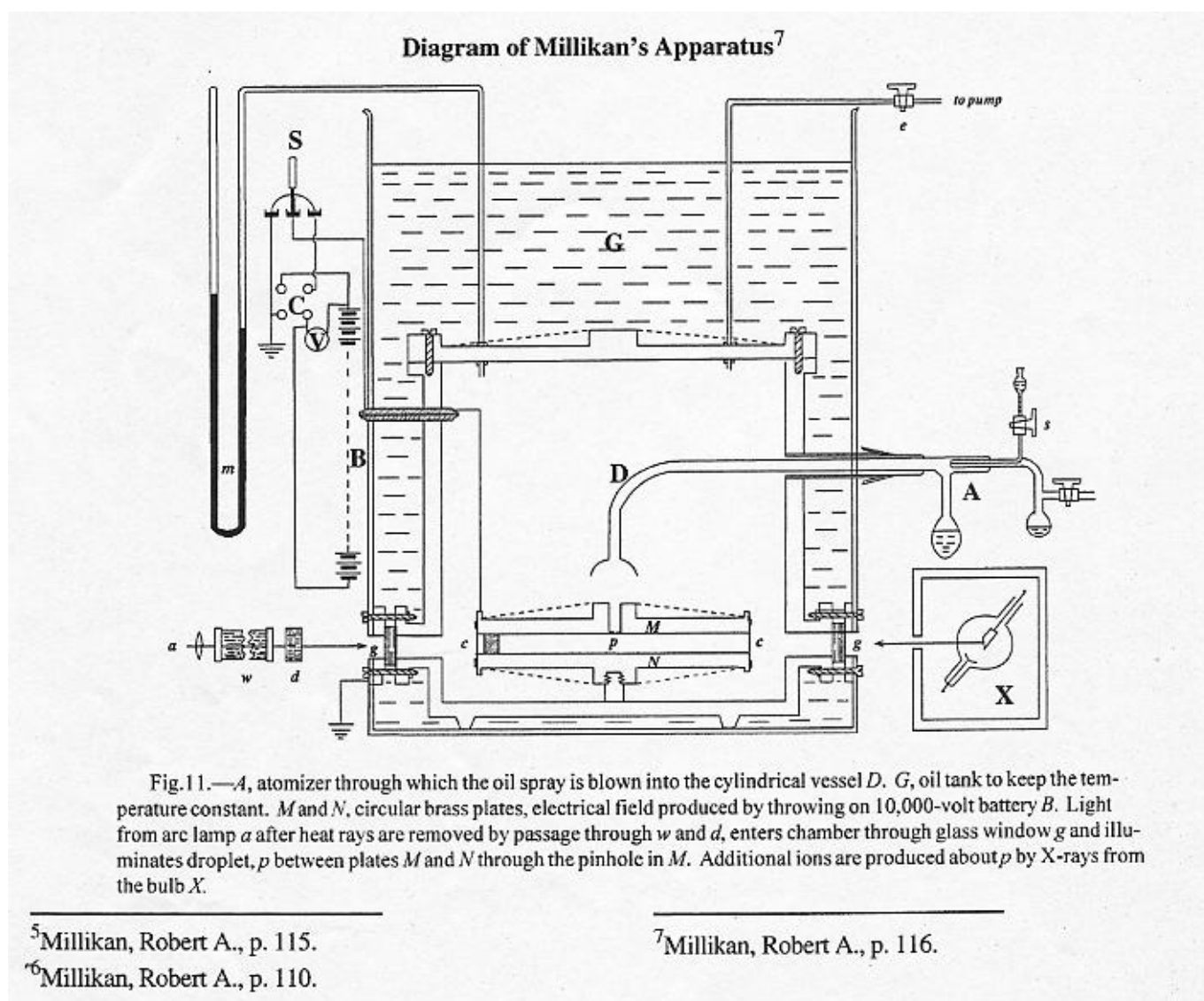
L'EVALUATION EXACTE DE e

En 1909, Millikan entreprit de construire une nouvelle pièce pour l'appareil destinée à l'observation de gouttes individuelles durant des périodes prolongées. Vu que les gouttes d'huile s'étaient montrées inadéquates pour des périodes d'observation prolongées de ce phénomène de capture d'ions, Millikan utilisa des gouttes d'huile qui ne s'évaporaient pas. L'appareil était constitué de deux plaques parallèles de laiton séparées par une distance de 16mm par des blocs d'ébonite. De l'huile non volatile était vaporisée dans une chambre au-dessus des plaques, et les gouttes trouvaient lentement leur chemin vers la région entre les plaques en passant par un petit trou dans la plaque du haut. Les gouttes étaient illuminées par un faisceau d'une lampe à arc et étaient observées à travers un microscope. Les détails de la construction de l'appareil final de Millikan construit en 1914 (qui dans l'ensemble était similaire à ses dispositifs précédents et qui pourra donc être considéré comme tel dans cette discussion) attestent de l'effort fourni pour obtenir l'évaluation de e la plus précise possible. Le passage suivant fait partie de la description de Millikan de l'appareil et inclus un schéma du dispositif :

"J'ai donc construit il y a deux ans un nouveau condensateur ayant des surfaces qui étaient polies optiquement et rendues plates à l'ordre de deux fois la longueur d'onde de la lumière de sodium. Elles avaient 22 cm de diamètre et étaient séparées par trois plaques à échelons de 14.9174 mm d'épaisseur, ayant des surfaces optiquement parfaites. Par conséquent, les dimensions du condensateur, n'introduisaient plus une erreur de plus de 1 sur 10,000."³

"La stagnation complète de l'air entre les condensateurs fut atteinte premièrement, en absorbant tous les faisceaux de chaleur provenant de la lampe à arc grâce à des cellules d'eau de 80 cm de long et une cellule en chlorure de cuivre (chlorure cuivrique) et deuxièmement, en submergeant tout le récipient dans un bain d'huile de moteur à gaz (40 litres) de température constante, qui permettait, en général, des fluctuations de moins de 0.02°C pendant l'observation."⁴

Schéma du dispositif de Millikan⁷



Avec ce nouvel appareil des centaines de mesures sur des gouttes différentes étaient faites et ceci à la fois dans le but d'établir une évaluation exacte de e et à la fois pour prouver ou contredire la théorie atomique de l'électricité. La valeur de e qui fut obtenue après cinq années

³ Millikan, Robert A., p. 115

⁴ Millikan, Robert A., p. 110

de travail était de $4.774 \cdot 10^{-10} \text{ e.s.u}$. Cette valeur de e était acceptée jusqu'en 1928 lorsqu'une détermination précise du nombre d'Avogadro par des mesures de diffraction par rayons X sur des cristaux permit d'établir la valeur de e à $4.803 \cdot 10^{-10} \text{ e.s.u}$. Plus tard, on montra que la différence entre les deux résultats était due à la valeur qu'avait utilisée Millikan pour la viscosité de l'air, qui était trop faible.

LA NATURE ATOMIQUE DE L'ELECTRICITE

La nature atomique de l'électricité est au mieux mise en avant par le tableau suivant tiré des données de Millikan :

Millikan fait les commentaires suivants sur ce tableau :

"Dans ce tableau, 4.917 n'est qu'un nombre qu'on a obtenu... par le changement de vitesse du à la capture d'ions et qui est proportionnel dans cette expérience à la charge ionique. La colonne "4.917 x n" contient tout simplement tous les multiples exacts de ce nombre de 1 à 18. La colonne "Observed Charge" donne les valeurs successives de la vitesse d'ascension de la goutte plus la vitesse de chute. On notera, que durant le temps d'observation, à peu près quatre heures, cette goutte a porté tous les multiples possibles de la charge élémentaire de 4 à 17 excepté 15. On ne trouve, dans les données amassées par les chimistes sur les pouvoirs de combinaison des éléments et sur laquelle la théorie atomique de la matière repose, aucune relation multiple plus exacte ou plus régulière que celle présente dans les résultats ci-dessus.

ATOMIC NATURE OF ELECTRICITY

The atomic nature of electricity is best exemplified by the following table taken from Millikan's data:

n	4.917 x n	Observed Charge
1	4.917
2	9.834
3	14.75
4	19.66	19.66
5	24.59	24.60
6	29.50	29.62
7	34.42	34.47
8	39.34	39.38
9	44.25	44.42
10	49.17	49.41
11	54.09	53.91
12	59.00	59.12
13	63.92	63.68
14	68.84	68.65
15	73.75
16	78.67	78.34
17	83.59	83.22
18	88.51

Millikan makes the following comments about this table.

"In this table 4.917 is merely a number obtained . . . from the change in speed due to the capture of ions and one which is proportional in this experiment to the ionic

Des tableaux comme celui-ci – et il y en a beaucoup- montrent sans conteste que la charge électrique, où qu'elle soit, dans un isolant ou un conducteur, dans un électrolyte ou dans un métal, a une structure granulaire bien définie et qu'elle est constituée par un nombre exact de particules d'électricité (électrons) tous identiques et qui, dans des phénomènes statiques sont dispersés sur la surface d'un corps chargé et qui dans des phénomènes de courant dérivent le long du conducteur. A la place d'abandonner, comme Maxwell pensait qu'on le ferait un jour, la "provisoire théorie de charges moléculaires", on se retrouve obligé de faire toutes nos interprétations des phénomènes électriques, métalliques ou électrolytiques en termes de cette théorie."⁵

Malgré le fait que les valeurs de la charge sur une goutte spécifique étaient toujours des multiples exacts d'une certaine valeur e , la valeur de e variait entre les gouttes de masses différentes. Cette différence fut établie comme étant due à l'échec de la Loi de Stokes. Par l'expérimentation on s'aperçut que la loi était fautive lorsque la taille des gouttes approchait le libre parcours moyen des molécules d'air. Dans ce cas, le milieu dans lequel chute la goutte, n'est plus homogène en relation avec la goutte. Ceci contredit l'une des hypothèses sur laquelle est basée la Loi de Stokes. Par ses travaux sur l'électron, Millikan fut capable de déterminer un facteur de correction à la loi de Stokes.

En effectuant l'expérience avec des gouttes de mercure et des gouttes d'autres matières, Millikan démontra que la charge électrique est la même pour les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs. Il montra aussi que la particule bêta a la même charge que l'électron (effectivement, c'est un électron) et que les électrons positifs et négatifs (l'électron positif étant le proton non pas le positron) sont égaux en charge.

Peu d'expériences, aussi simples dans leur principe, ont fourni une telle richesse d'information et de preuves expérimentales confirmant le théorie atomique et mesurant une constante physique importante.

Lecture suggérée

Pour l'étudiant qui désire aller plus loin dans les détails de cette expérience de référence, nous suggérons les ouvrages suivants :

1. R. A. Millikan *The Electron*, Chicago, The University Of Chicago Press, 1917.
2. R. A. Millikan "The isolation of an Ion, A Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stokes' Law", *The Physical Review*, Vol. 2, No 2, p. 109-143, Juin 1913.
3. R. A. Millikan "On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant", *The Physical Review*, Vol. 32, No 4, p. 349-397, Avril 1911
4. Shamos, M.H, *Great Experiments in Physics* (Holt-Dryden, New-York, 1959), p. 238-249.

⁵ Millikan, Robert A., p 74-75

Procédure, discuter avec l'assistant pour spécifier le travail à fournir

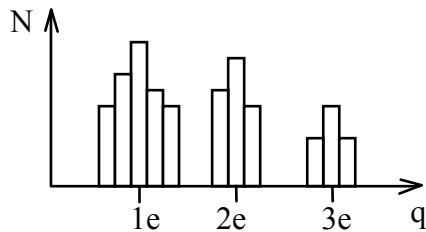
(Les références aux équations ci après ne sont pas liées avec le protocole traduit)

- 1) Mesurer ~ 30 gouttes dans le champ **E**, inverser le champ (~ 5 montées-descentes par gouttes)
- 2) A partir des équations (6) du protocole, extraire les expressions de la charge **q** et du rayon **r** en fonction de la vitesse de montée v_{\uparrow} et v_{\downarrow}
Attention aux unités et aux constantes intervenant dans les expressions à titre de référence, pour $V = 2000$ volts, on doit obtenir:

$$q = 4.93 \cdot 10^{-14} \cdot (v_{\downarrow} - v_{\uparrow})^{1/2} \cdot (v_{\uparrow} + v_{\downarrow}) \quad (\text{MKSA})$$

$$r = 6.93 \cdot 10^{-5} \cdot (v_{\downarrow} - v_{\uparrow})^{1/2}$$

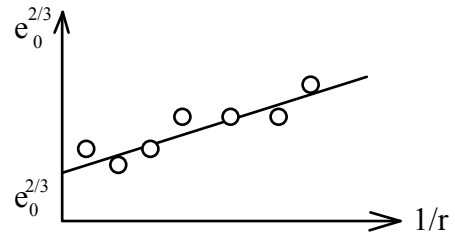
- 3) Reporter l'ensemble des résultats dans un tableau mentionnant, pour chaque goutte:
 - le nombre de montées-descentes
 - les temps de montées-descentes
 - les vitesses de montée-descente
 - les valeurs calculées pour q et r
 - la charge élémentaire e et la multiplicité n reflétée par la goutte ($q = n \cdot e$), selon le point 4
- 4) Faire un histogramme du nombre de gouttes par intervalle de charge Δq :



Si les mesures sont bonnes, on observe des maxima régulièrement espacés. En tirer la charge élémentaire e_i et la multiplicité n_i reflétées par chaque goutte.

- 5) Correction de Millikan:

en admettant que $r_{\text{exp}} = r_{\text{effectif}}$, reporter sur un graphe $e_0^{2/3}$ en fonction de $1/r$. Si les mesures sont suffisamment précises (ce n'est pas toujours le cas !), on observe une évolution linéaire:



$$e_0^{2/3} = e_0^{2/3} + (e_0^{2/3} \cdot K) \cdot 1/r$$

(voir équation (7) du protocole) e_0 =valeur effective de la charge élémentaire

Version 1983 Sanchez/gd
Mise à jour 14.1.1986 /aj
Mise en page juin 2003 lw
Mise à jour mai 2015 / lw