

« Je ne me contente plus des possibles offerts, j'en imagine d'autres et je les réalise. »

**Albert JACQUARD,
Abécédaire de l'ambiguïté**

« Pour la physique je croirais n'y rien savoir si je ne savais que dire comment les choses peuvent être sans démontrer qu'elles ne peuvent être autrement.»

Descartes, Lettre à Mersenne

Sommaire

Sommaire	page 2
Remerciements	page 3
Motivations	page 4

Partie I : L'ÉLECTRON : HISTORIQUE ET ENJEUX

I. Historique	page 6
I. 1. Découverte de l'électron	page 6
I.2. Premières mesures de la charge élémentaire	page 8
II- Enjeux scientifiques dans la recherche	page 9
II.1. Propriétés particulières de l'électron	page 9
II.2. Applications scientifiques	page 10

Partie II : EXPERIENCE DE MILLIKAN

I- Dispositif de l'appareil de Millikan et principe de l'expérience	page 12
I.1. Dispositif	page 12
I.2. Principe de la manipulation	page 13
II- Problématiques et leurs réponses	page 13
III- Notre expérience	page 18
III.1 . Notre dispositif	page 18
III.2. Détermination de la charge d'une goutte	page 18
a) Exploitation de la séquence vidéo enregistrée	page 19
b) Détermination des vitesses du rayon et de la charge d'une goutte	page 21
III.3. Détermination de la charge élémentaire	page 22
III.4. Appréciation et discussion des résultats	page 23
IV- Conclusion	page 25

Annexes

Annexe 1 : Tableau de mesures et de calculs	page 26
Annexe 2 : Graphes	page 32
Bibliographie	Page 36

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier pour l'aide apportée à ce projet, notre professeur responsable **M. MESBAHI**.

Nous sommes reconnaissants envers Mr R. **DUFFAIT** qui nous a accueilli dans son laboratoire de l'Université de LYON 1 Claude Bernard, et qui nous a aidé à mettre au point notre système par ses riches conseils.

Nous souhaitons remercier tout particulièrement M. **RAINSANT** de la société DMS-Didalab de l'intérêt qu'il a porté à notre projet en nous proposant gracieusement le prêt du matériel nécessaire pour réaliser nos expériences.

Nous souhaitons également remercier la municipalité de Saint-Priest pour leur aide financière et tous les « Condorciens » : notre direction, nos professeurs et nos camarades pour leurs soutiens et encouragements.

Motivations de ce projet

Le XIX^e siècle a peu à peu découvert la nature "atomique" du monde physique. Comment a-t-on donc pu évaluer les grandeurs caractéristiques des constituants élémentaires de la matière, apparemment inaccessibles à notre échelle ? Comment mesurer notamment la charge électrique de l'électron ?

Nous avons axé notre travail plus particulièrement sur cette fameuse particule qu'est l'électron. Dans un premier temps, l'objectif de ce projet, est de prendre conscience de la diversité des matériaux de notre environnement quotidien. Nous sommes donc amenés à prendre en compte l'importance de leurs nombreuses propriétés physico-chimiques et qualités mécaniques. En effet, l'électron est l'un des plus importants constituants universels de la matière, dont toutes les propriétés sont, d'une façon ou d'une autre, liées à sa charge électrique portée. A titre d'exemple, la physique de l'état solide s'intéresse à la cohésion de la matière, assurée par les électrons. Plusieurs technologies ont spécifiquement l'électron pour matériau: électronique, informatique, applications médicales des faisceaux d'électrons, etc.

L'un des objectifs visés par le programme de 1S, que nous étudions actuellement, est de préciser la conception des interactions fondamentales newtoniennes et colombiennes (effet d'une force sur la nature du mouvement) et aussi d'introduire une grandeur fondamentale: l'énergie.

En classe de Terminale S: Le programme exige d'étudier l'évolution temporelle des systèmes mécaniques. Cette partie constitue l'aboutissement de l'enseignement de mécanique commencé en classe de seconde et approfondi en Première S. L'appropriation des lois de Newton, à travers les exemples de mouvements étudiés, nous permet de pratiquer les différents aspects de la démarche scientifique :

- ✍ modéliser un système et lui appliquer les lois de la dynamique pour prévoir son comportement, en utilisant une résolution analytique et/ou une méthode numérique
- ✍ réaliser des mesures quantitatives et les confronter aux prédictions d'une théorie, dans le but éventuel d'améliorer la modélisation.

Ces notions et connaissances exigibles par le programme, peuvent être parfaitement élucidées, développées et approfondies par ce projet proposé: Détermination de la charge électrique de l'électron par la méthode de Millikan.

Monsieur MESBAHI nous a proposé, de nous présenter au concours des Olympiades de Physique. Cette idée nous a semblé intéressante et attrayante, sortant du contexte de l'enseignement classique. Elle nous a permis de prendre contact avec d'autres personnes extérieures au Lycée, de travailler en équipe et de confronter nos idées et nos recherches.

De plus, c'est un sujet qui traite des différents aspects de la physique :

- La mécanique des fluides
- La mécanique classique
- La mécanique des particules chargées dans un champ électrique

Tous ces aspects nous ont permis de nous poser quelques questions et de dégager différentes problématiques auxquelles nous avons tenté de répondre par nos recherches bibliographiques et expérimentales afin de mieux comprendre ce que M. MILLIKAN (qui reçut en 1920 le prix Nobel pour cette expérience) a pu développer pendant toute sa carrière

Dans la première partie de ce rapport, nous rappellerons l'historique de la découverte de l'électron et son lien avec l'électricité et les progrès technologiques.

Dans la deuxième partie nous centrerons notre travail sur l'expérience de Millikan que nous avons réalisée et développée par un traitement informatique des données enregistrées.

« Si l'électron nous a servi à comprendre beaucoup de choses, nous n'avons jamais bien compris l'électron lui-même. »

Louis de Broglie

Partie I :

L'électron : historique et enjeux

I. Historique

I.1 Découverte de l'électron

La découverte de l'électron a été l'aboutissement d'une longue série d'études et d'expériences. Déjà depuis l'Antiquité, des philosophes tels que le savant grec **Thalès** (640-546 av.J.C) avaient observé que , après avoir été frotté, l'ambre jaune (en grec, ???????? *ELEKTRON*), avait la propriété d'attirer des corps légers. Quant à **Leucippe** et **Démocrite** (460-370 av. J.C), ils émettaient l'hypothèse que la matière était constituée d'éléments indivisibles, incassables !

On peut cependant considérer que le début de l'étude des phénomènes d'électrisation, remonte au physicien anglais William **Gilbert** (1544-1603) qui sut faire la différence entre l'électrisation et l'aimantation. L'Anglais Stephen **Gray** (1666-1736) fit ensuite la distinction entre conducteurs et isolants. Le Français Charles **Du Fay** (1698-1739) montra qu'il existe seulement deux types d'électrisation: l'électrisation «vitrée» (corps s'électrisant comme le verre) et l'électrisation «résineuse» (corps s'électrisant comme les résines).

Mais c'est à partir du XVIII^e siècle que l'on commença réellement à faire de grandes découvertes :

- ✍ En 1730, on fit la distinction entre électricité positive et négative.
- ✍ En 1780, fut établie la loi de **Coulomb** sur les interactions répulsives et attractives entre charges.

Le XIX^e siècle fut une époque très riche et intéressante où se succédèrent de nombreuses inventions et découvertes dans le domaine de l'électricité:

- ✍ En 1800, Alessandro **Volta** produit un courant électrique grâce à l'invention de la pile électrique.
- ✍ En 1819, **Oersted** découvre le champ magnétique produit par le courant.
- ✍ En 1831, **Faraday** découvre l'induction magnétique.
- ✍ En 1826, la Loi d'**Ohm** est établie.
- ✍ En 1833, **Faraday** établit les lois de l'électrolyse «Pour une même quantité d'électricité traversant différents électrolytes, la masse de matière se déposant sur les électrodes est proportionnelle à la «masse chimique» (que l'on appelle aujourd'hui masse molaire) de cette matière». Cette fois, les expériences suggéraient non seulement l'atomicité de la matière, mais aussi celle de l'électricité.
- ✍ En 1881, le phénomène de l'électrolyse conduit **Helmholtz** à penser qu'il existait des particules plus petites que l'atome.
- ✍ Le 8 Novembre 1895, Wilhelm Conrad **Röntgen** découvrit les rayons X.
- ✍ La même année, Jean **Perrin** réussit à prouver la nature corpusculaire des rayons cathodiques et démontra que ces rayons transportaient des charges négatives.
- ✍ En 1896, Le Néerlandais Pieter **Zeeman** réussit à observer un effet du champ magnétique sur les raies jaunes du sodium. L'effet Zeeman démontrait que la lumière est affectée par le magnétisme comme le sont les vibrations des particules chargées. Il trouva plus tard que le rapport e/m nécessaire pour reproduire les expériences était de plus de 1000 fois celui de l'ion hydrogène.
- ✍ En 1897, J.J **Thomson** réussit à isoler les rayons cathodiques. Il avait conçu dans son laboratoire de Cambridge un montage permettant de suivre la trajectoire de rayons issus d'un tube cathodique, l'ancêtre des tubes de télévision (**figure 1**) et soumis à un champ magnétique ou électrique (**figure 2**).

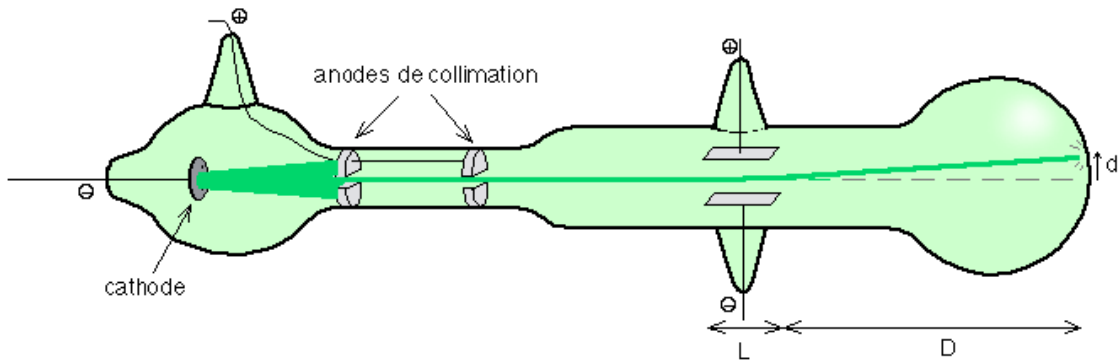
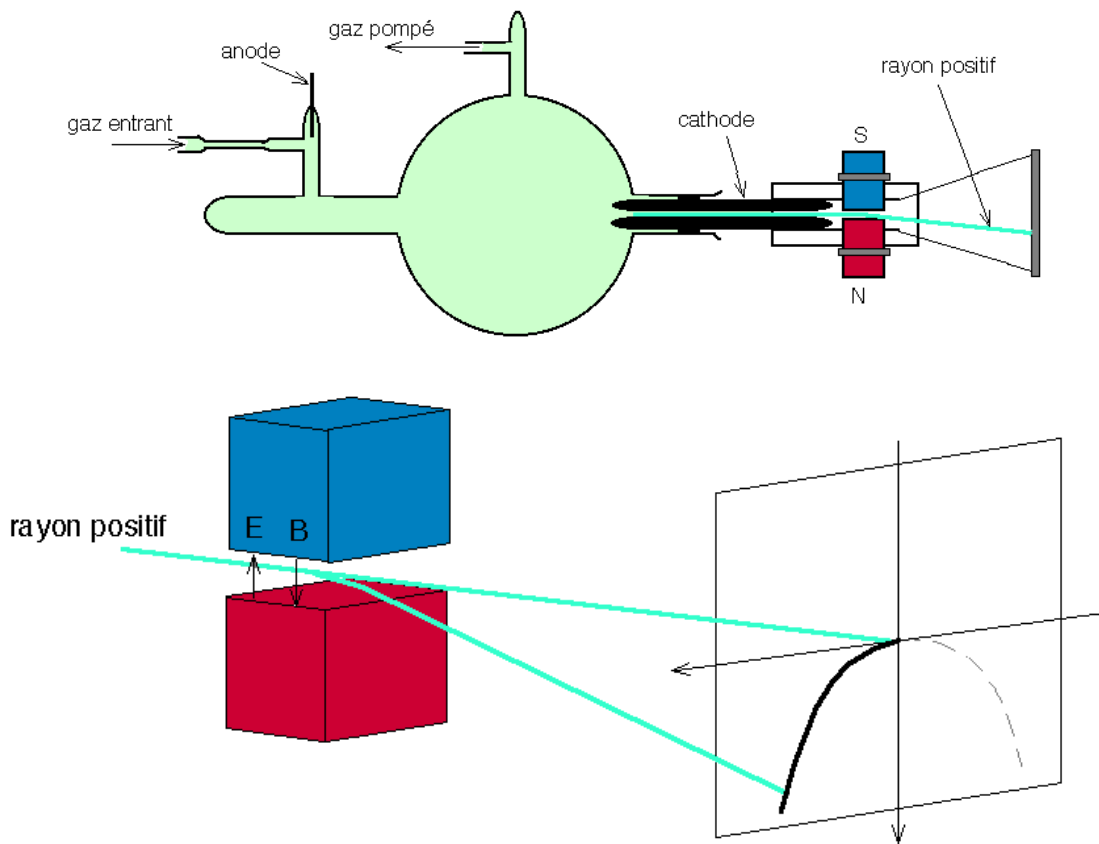


Figure 1 Tube cathodique de J.J Thomson



Figures 2 : Déviation des rayons cathodiques sous l'influence d'un champ électromagnétique

Il réussit ainsi tout d'abord à montrer que ces rayons cathodiques étaient véhiculés par des particules matérielles et porteuses d'une charge négative. Il appliqua des champs magnétiques et électriques et put ainsi mesurer la vitesse et déterminer le rapport de la charge élémentaire e par la masse m des constituants de ces rayons. Il trouva un résultat près de 2 000 fois plus grand que pour les ions hydrogène. Compte tenu de la constance de cette valeur pour toutes sortes de matériaux et de gaz, il en conclut que les rayons cathodiques étaient constitués de matière dans un nouvel état, où la subdivision de la matière est bien plus extrême que dans les gaz. Il s'agissait bien évidemment de l'électron, un nouveau composant universel. Malgré le scepticisme de ses confrères, Thomson réussit à imposer sa théorie « l'atome est une sphère remplie

d'une substance *électrique positive et fourrée d'électrons négatifs un peu comme des raisins dans un pudding* ».

- ✍ En 1911, J.J. Thomson demanda à **Rutherford** de vérifier l'exactitude de son modèle atomique. Il accomplit donc l'expérience où il réalisa son propre modèle atomique ressemblant à peu près à la réalité. En bombardant de très minces feuilles d'or par des rayons γ émis par une source radioactive, il met en évidence la structure lacunaire (comme une passoire) des atomes. En effet ces particules γ traversent la matière comme si de rien n'était, sauf celles qui ricochent sur des sortes de « points durs » appelés les noyaux atomiques. Il proposa par la suite un modèle de type planétaire où les électrons gravitent autour du noyau atomique sur des orbites analogues à celles des planètes autour du soleil.
- ✍ Durant cette même époque, une confirmation indirecte, qui montre bien les liens entre les divers domaines de la physique, avait été fournie par Pierre et Marie **Curie**. Ils démontrèrent que les rayons γ de la radioactivité (qui avait été découverte par Henri **Becquerel** en 1896) étaient eux aussi formés de corpuscules chargés négativement (radioactivité β^-) pour lesquels **Becquerel** trouva une valeur du rapport « charge électrique / masse » similaire à celle des rayons cathodiques.

I.2. Les premières mesures de la charge élémentaire

Les premières mesures de la charge électrique des particules chargées furent effectuées grâce à l'invention de l'appareil de Charles Thomson **Rees Wilson** (1869/1959): Prix Nobel de Physique en 1907. A la fin des années 1890, ce jeune prodige entreprit ses premières expériences en réalisant une chambre à brouillard, appareil destiné à observer les interactions entre la vapeur d'eau et la lumière (les rayons X). Les physiciens de l'époque pensaient que les gouttelettes d'eau ne se formaient qu'autour des particules de poussière. Wilson constata en fait qu'elles pouvaient aussi se former autour de particules chargées, c'est à dire des ions, notamment ceux que créent sur leur passage les rayons X.

Plus tard, J.S.E **Townsend** (1868-1957) s'en servit afin de pouvoir déterminer la charge d'ions dans des gaz produits par électrolyse. Ces ions, sous forme de gouttelettes qui sont en mouvement sous l'effet de leur poids et freinées par l'air, se déplacent à vitesse constante vers le bas. En déterminant la masse moyenne des gouttelettes et le rapport de la charge électrique des gouttes par leur masse, il pu obtenir la valeur de la charge moyenne q .

Les résultats qu'il obtint furent :

$q = 0,9 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ pour les ions positifs

$q = 1,0 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ pour les ions négatifs

J.J Thomson (1856-1940) détermina la charge d'un électron à l'aide de la chambre à brouillard. Cependant il s'y prit différemment que Townsend : il ionisa l'air de la chambre par des rayons X. Tout comme Townsend, il déterminait la taille des gouttelettes en mesurant leur vitesse limite. Mais pour évaluer la masse et la charge des gouttelettes formées, il mesurait la conductivité de l'air ainsi que la différence de température produite dans la chambre par les rayons X.

Il obtint les résultats suivants en 1898:

$$q = 2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

En 1901 après avoir amélioré sa méthode, il obtint un résultat plus précis :

$$q = 1,1 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Un autre physicien, **H.A Wilson**, utilisa comme Thomson les rayons X pour produire des ions. Il étudiait leur mouvement et déterminait plusieurs vitesses limites en les soumettant à un champ électrique variable. Ainsi il a pu calculer directement la charge des ions

En 1903, il publia les résultats suivants :

$$q = 1,03 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Tous ces résultats obtenus ont permis de donner un bon ordre de grandeur de la valeur de la charge élémentaire. En 1910, **Robert Andrews Millikan**, au terme d'une expérience particulièrement délicate selon des méthodes similaires, mais en employant de l'huile pulvérisée, établit la valeur de q_e avec une précision extraordinaire pour l'époque. Il trouva une valeur de :

$$q_e = -(1,592 \pm 0,003) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

La valeur théorique actuelle de la charge élémentaire est : $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

II. Enjeux scientifiques dans la recherche

II.1. Propriétés particulières de l'électron

L'électron est une particule élémentaire, constituant fondamental des atomes, au même titre que les protons et les neutrons.

Il subit l'interaction gravitationnelle (puisque'il a une masse), l'interaction faible, et enfin l'interaction électromagnétique du fait de sa charge électrique. C'est cette dernière qui fait que l'électron est aujourd'hui indispensable en chimie, en électricité, en électronique et dans la grande majorité des processus qui se trouvent à la base des techniques industrielles.

Dans les isolants, la mobilité des électrons est réduite si bien que la conduction se fait très mal. Dans certains métaux, les électrons sont libres de circuler et constituent donc d'excellents conducteurs. Les semi-conducteurs constituent la situation intermédiaire : la majorité des électrons participent à la stabilité de la structure sauf quelques uns que l'on réussit à arracher : ces électrons présentent des propriétés de conductibilité électrique.

Comme toutes les particules élémentaires connues aujourd'hui, l'électron a une nature paradoxale et imprévisible. Cette nature se traduit notamment par une propriété particulière : la dualité onde-particule.

Si on imagine l'électron comme une particule, on pourrait comparer son comportement à l'intérieur d'un semi-conducteur comme à celui d'un ballon dans un sous-bois. Si on frappe sur un ballon dans un sous-bois, il est tout de suite arrêté par les buissons et les troncs d'arbre. Dans un semi-conducteur, les noyaux des atomes font office de troncs d'arbres et pourraient constituer autant d'obstacles pour les électrons. Si l'électron était uniquement une particule, il ne pourrait pas circuler à l'intérieur d'un tel milieu. À chaque fois que l'on réussirait à arracher un électron au noyau d'un atome, il serait aussitôt stoppé dans sa course par un autre noyau et il ne pourrait pas transporter de courant électrique.

Mais l'électron est aussi une onde. Et contrairement aux objets matériels, les ondes ne sont pas stoppées de la même manière par des obstacles physiques. Alors que le ballon de l'exemple est rapidement arrêté par les troncs d'arbre, les ondes sonores, telles le bruit du coup de pied ou celui du ballon frappant les troncs d'arbre, se répandent très bien dans le sous-bois.

De la même façon, étant à la fois une onde et une particule, l'électron peut contourner les obstacles, se propager dans le semi-conducteur sans se laisser arrêter par les noyaux des atomes.

II.2. Applications scientifiques:

Aujourd'hui, de nombreuses recherches sont effectuées dans différents domaines où l'électron occupe une part importante. Lors de la troisième rencontre Eléa à Grenoble en 2001, certains chercheurs tels que Gilles Cohen-Tannoudji (Prix Nobel 1997), Bernard Joffrey (Ecole centrale de Paris) et d'autres sont intervenus au sujet des enjeux scientifiques autour de l'électron. Nous en avons conclu qu'ils étaient nombreux, importants et que de nouveaux progrès technologiques sont attendus dans les années à venir dans différents domaines tels que:

- ✍ **la microélectronique** : dans cette branche les scientifiques sont toujours à la recherche de nouveaux matériaux semi-conducteurs comme le silicium dans lesquels l'électron a des propriétés particulières. La vitesse du traitement de l'information ainsi que la capacité de mémoire et la complexité des circuits intégrés sont sans cesse en progrès.
- ✍ **la microscopie électronique** : depuis les années 30, la compétition de la recherche mondiale a permis de faire des progrès dans l'optique électronique. Le choix d'électrons accélérés, pour produire un rayonnement de courte longueur d'onde, est déterminé par plusieurs critères :
 - ? la masse faible de ces particules qui peuvent être accélérées et focalisées au moyen de champ électrique ou magnétique.
 - ? une source d'électrons est aisée à mettre en œuvre.
 - ? les électrons sont plus facilement focalisés que les particules plus lourdes.
 - ? l'interaction des électrons avec la matière est plus faible que pour des particules plus lourdes.
- ✍ **le génie électrique** : les chercheurs doivent découvrir des matériaux performants dans lesquels l'électron occupe une place importante. De nombreuses recherches sont en cours dans le but d'appliquer la supraconductivité en génie électrique.
- ✍ **les télécommunications** : l'électron est une pièce maîtresse dans le développement des techniques de transport de l'information. Même si l'optique finira un jour par remplacer l'électronique, l'électron continuera à jouer un rôle fondamental car tous les signaux sont de nature électrique.

Par conséquent, les différents domaines de l'énergie électrique se développent constamment aujourd'hui grâce en partie aux propriétés de l'électron.

« Deux choses instruisent l'homme de toute sa nature : l'instinct et l'expérience »

Blaise Pascal

Extrait des Pensées sur la religion

Partie II

Expérience de Millikan

I. Dispositif de l'appareil de Millikan et principe de l'expérience

I.1. Le dispositif

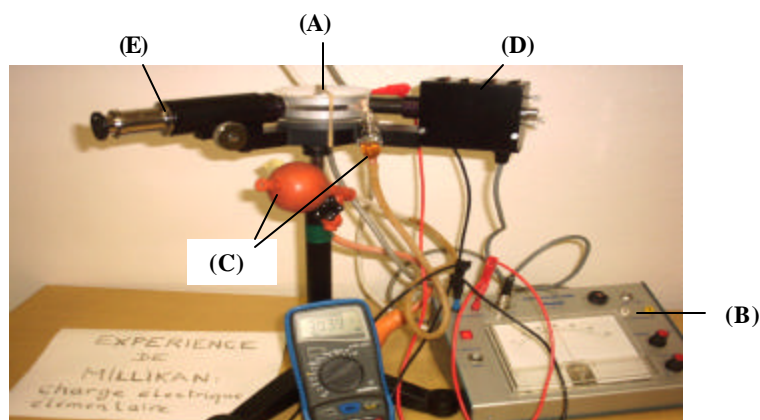


Figure 3: Dispositif de Millikan (modèle récent)

Le dispositif classique de l'appareil de Millikan comprend une cellule composée :

- ? D'un condensateur (figure 3-A). Il est formé de deux plaques métalliques qui sont parallèles et distantes de 6mm. Elles sont isolées avec un capot de plexiglas qui protège le dispositif et permet donc manipuler dans des conditions de sécurité optimales. Il empêche l'air de circuler librement entre les armatures du condensateur. Ces deux plaques sont connectées aux bornes de l'alimentation haute tension (figure 3-B)
- ? D'un pulvérisateur (figure 3-C) muni d'une poire d'injection



- ? d'une source d'éclairage latéral (figure 3-D)
- ? et d'un viseur microscope (figure 3-E)

Le viseur est un instrument d'optique destiné à observer un objet à une distance finie. Il comprend trois tubes coaxiaux qui peuvent coulisser les uns par rapport aux autres et qui portent : une lentille convergente L_1 du côté de l'objet (l'objectif), une échelle graduée sur une plaque de verre (micromètre oculaire M) et une lentille convergente L_2 du côté de l'œil (oculaire)

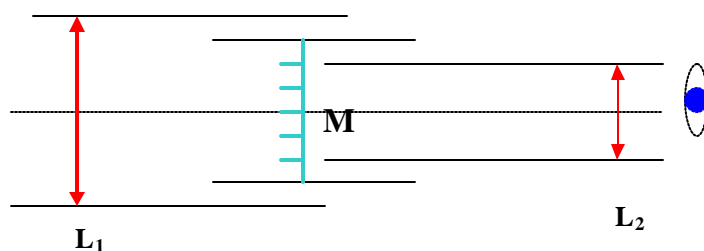


Figure 4 : Schéma optique du viseur-microscope

I.2. Le Principe de la manipulation

On introduit des gouttelettes d'huile entre les armatures du condensateur en positionnant l'ouverture du nébuliseur en face des trous percés de la cellule et en appuyant vivement sur la poire d'injection.

On éclaire les gouttelettes à l'aide d'un éclairage latéral par rapport à la direction d'observation. Nous pouvons alors observer les gouttelettes grâce au viseur (**Figure 5**)

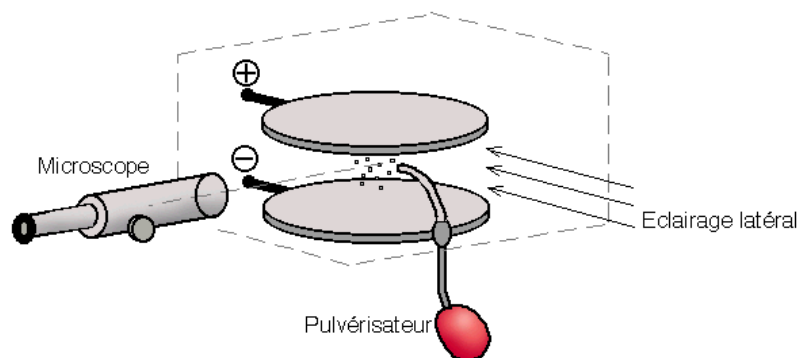


Figure 5 : Schéma du principe de l'expérience

Les gouttelettes sont alors en suspension dans l'air et soumises à un champ électrique. La méthode de Millikan consistait à immobiliser les gouttelettes. Pour cela, il augmentait progressivement la tension aux bornes du condensateur jusqu'à ce que la force gravitationnelle agissant sur les gouttelettes soit compensée par la force électrostatique provenant du champ électrique du condensateur. En observant le comportement de ces gouttelettes en fonction des paramètres (tension appliquée, masse de la goutte d'huile, vitesse,...), Millikan conclut que les charges électriques portées par les gouttelettes étaient multiples de la charge élémentaire. Toutes ses mesures étaient bien sûr effectuées à l'œil nu au microscope et les calculs étaient fait à la main.

Malgré tout, il détermina en 1910, avec une très bonne précision à l'époque, une valeur approchée de la charge élémentaire $q_e = (1,591 \pm 0,003) \cdot 10^{-19} \text{ C}$

La valeur théorique, admise actuellement, de la charge élémentaire est $e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

II- Problématiques et leurs réponses.

Dans ce travail, nous avons souhaité reproduire cette expérience afin d'obtenir une valeur de la charge élémentaire avec une précision raisonnable. Nous nous sommes posées plusieurs problématiques auxquelles nous avons pu apporter des réponses .

⚡ Première problématique : comment une gouttelette peut-elle se charger électriquement ?

Chaque gouttelette formée est initialement neutre électriquement. Elle peut se charger grâce à deux phénomènes d'électrisation différents :

- ? l'électrisation par frottement (les gouttelettes arrachent des électrons au verre du pulvérisateur lors de la pulvérisation)
- ? l'électrisation par contact, avec un ion présent dans l'air. En effet, il existe dans l'air des rayons cosmiques qui ionisent certains grains de poussière. Il suffit qu'une particule chargée soit présente parmi les vapeurs du liquide pulvérisé (huile) pour qu'un certain nombre de gouttelettes soient chargées du même signe que l'ion. La charge portée par la gouttelette se répartie d'une manière uniforme à la surface, ce qui a pour effet de produire

une force répulsive qui compense l'effet de compression provoqué par la force de la tension superficielle (tension qui existe à la surface libre d'une gouttelette en contact avec l'air, et dont la force tend à faire s'effondrer la gouttelette).

☞ **Deuxième problématique : quelles sont les lois physiques qui permettent d'étudier et d'expliquer le mouvement des gouttelettes dans l'air ?**

Nous nous sommes dans un premier temps intéressés aux lois physiques qui régissent le mouvement d'un corps sphérique dans un fluide.

Un tel mouvement est gouverné par l'équation de Naviers-Stockes. Cette loi ne s'applique que pour des corps sphériques rigides (non déformables) de surface parfaitement lisse, et dont le rayon est beaucoup plus grand que les dimensions des molécules du milieu dans lequel elles sont placées (ici dans notre cas le fluide est l'air). Elle suppose de plus que la température soit constante et qu'il n'existe aucun tourbillon au sein du fluide.

Il est évident que plusieurs des suppositions faites ci-dessus ne peuvent être posées comme des choses établies dans le cas d'une gouttelette d'huile dans l'air. Cependant, en toute première approximation, on considérera pour notre expérience que les gouttelettes d'huile placées dans l'air satisfont aux conditions qui permettent d'utiliser la loi de Stokes.

On se propose maintenant de s'intéresser au mouvement d'une gouttelette dans la cellule du condensateur.

Avant d'aborder la considération théorique, on définit les grandeurs physiques suivantes :

1. r est le rayon de la gouttelette, m sa masse, et $q=-Q$ sa charge (avec $Q>0$)
2. v est le vecteur vitesse de la gouttelette : $v = v \cdot u$ (u est le vecteur unitaire selon l'axe vertical (Oy) orienté positivement dans le sens descendant)
3. d est la distance entre les armatures du condensateur : $d= 6,0.10^{-3}$ m
4. U est la différence de potentiel à l'intérieur de la chambre du condensateur
5. $E = E \cdot u$ est le champ électrique à l'intérieur de la cellule du condensateur ; ce champ est considéré constant
6. ρ_h est la masse volumique de l'huile : $\rho_h = 800 \text{ kg.m}^{-3}$
7. ρ_{air} est la masse volumique de l'air : $\rho_{\text{air}} = 1,25 \text{ kg.m}^{-3}$
8. η est le coefficient de viscosité de l'air : $\eta = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ N.s.m}^{-2}$

Examinons donc la situation d'une gouttelette d'huile qui se déplace de haut en bas entre les armatures du condensateur ; elle est soumise à différentes forces (**figure 6**) : (on précise que le référentiel attaché au Laboratoire est considéré comme galiléen)

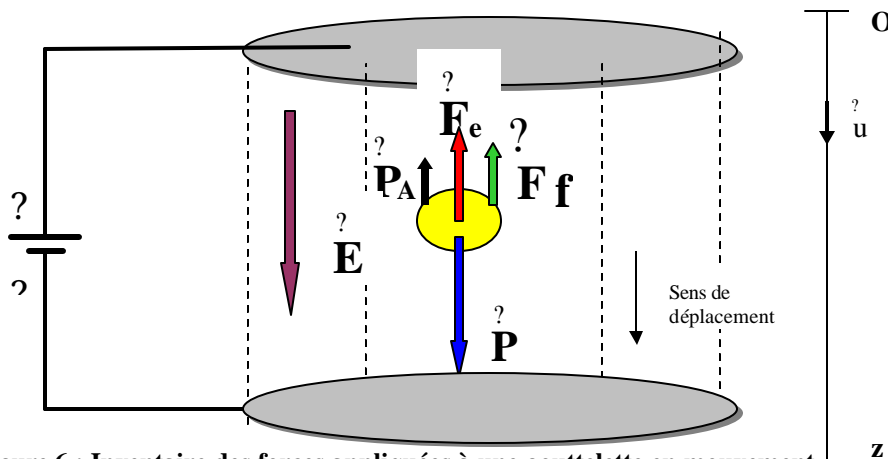


Figure 6 : Inventaire des forces appliquées à une gouttelette en mouvement

Les différentes forces extérieures appliquées à une des gouttelettes chargées en mouvement sont :

le poids

$$P = m \cdot g = \rho_h \cdot V_{goutte} \cdot g$$

Le volume d'une gouttelette, considérée comme une sphère, étant : $V_{goutte} = \frac{4}{3}\pi r^3$

$$\text{on a : } P = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_h \cdot g \quad (1)$$

la poussée d'Archimède exercée par l'air

Elle correspond à l'opposé du poids de la quantité d'air déplacé par l'immersion du corps (la gouttelette)

$$P = \rho_{air} \cdot V_{air} \cdot g$$

Puisque le volume d'air déplacé est égal au volume de la gouttelette,

$$\text{on a : } P = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{air} \cdot g \quad (2)$$

les forces de frottement exercées par l'air, modélisées par la loi de Stokes

$$F_f = 6\pi r \eta \cdot v \quad (3), \text{ elles s'opposent au mouvement.}$$

la force électrique (imposée entre les armatures du condensateur)

$$F_e = q \cdot E = Q \cdot E \quad (4)$$

Avec $q = -Q = k \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (k entier) et $E = U/d$ (intensité du champ électrique)

Il nous est possible de faire varier la valeur du champ électrique en agissant sur U

La 2^{ème} loi de Newton appliquée à une gouttelette en mouvement nous donne l'équation du mouvement :

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_h - \rho_{air}) g - 6\pi r \eta \cdot v - Q \frac{U}{d} \quad (5)$$

(par projection selon l'axe (Oy) orienté positivement dans le sens descendant)

Cette équation différentielle a pour solution la vitesse instantanée

$$v(t) = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_h - \rho_{air}) g - Q \frac{U}{d}}{6\pi r \eta} \left[1 - \exp\left(-\frac{6\pi r \eta}{m} t\right) \right] \quad (6)$$

Le graphe ci-contre (**figure 7**) représente une simulation de la variation de la vitesse v de la gouttelette au cours du temps pour des valeurs particulières des paramètres:

$$r = 1,44 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$m = 1,12 \cdot 10^{-14} \text{ kg}$$

(T) est la tangente à la courbe $v = f(t)$ à l'instant de date $t = 0$.

Le temps caractéristique

$$\tau = \frac{m}{6\pi r \eta} = \frac{2r^2 \rho_h}{9\eta} \text{ du "régime transitoire" est de l'ordre de } 10^{-4} \text{ s, si bien que la goutte tombe, pratiquement immédiatement à vitesse constante. Cette vitesse est une vitesse limite.}$$

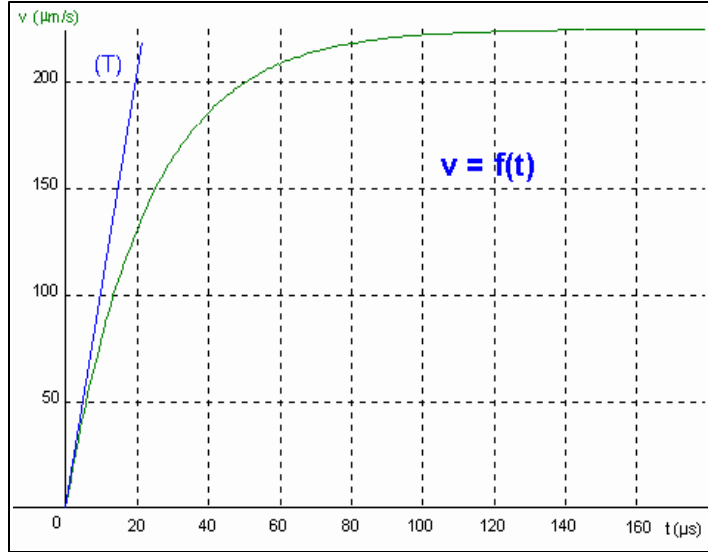


Figure 7: Courbe représentative de la variation de la vitesse en fonction du temps

Nous pouvons expliquer la variation de la vitesse au cours du temps :

A $t = 0$, la gouttelette est entraînée vers le bas et sa vitesse augmente ; la force de freinage apparaît. Au fur et à mesure que la vitesse de chute augmente, la force de freinage associée croît jusqu'à atteindre la valeur telle que la valeur de la résultante des forces opposées au poids est égale à celle du poids : $F_f + F_e + P_A = P$ (ceci à l'instant de date $t = 5 = 120 \text{ ms}$). Dès lors, la gouttelette est soumise au principe d'inertie, son mouvement est rectiligne et uniforme de vitesse v_{\square} .



Figure 8 : Mise en évidence de l'application du principe d'inertie

Le régime transitoire étant très rapide on peut donc appliquer le principe d'inertie. L'équation de l'expression (5) devient, pour un mouvement **descendant** :

$$0 = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_h - \rho_{air}) g - 6\pi r \eta v_{\square} - Q \frac{U}{d} \quad (7)$$

La vitesse limite a donc pour expression :

$$v_{\square} = \frac{\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_h - \rho_{air}) g - Q \frac{U}{d}}{6\pi r \eta} \quad (8)$$

Relation pour laquelle les deux seules inconnues sont la charge Q portée par la gouttelette d'huile et son rayon r , v_{\square} et U sont des grandeurs mesurables.

Pour déterminer Q , nous avons donc cherché à exprimer Q en fonction de r , des grandeurs mesurées et des autres paramètres connus.

On mesure dans un premier temps la vitesse de montée V_d d'une gouttelette en l'absence de tension. L'expression établie de cette vitesse est :

$$v_d = \frac{\frac{4}{3}pr^3(\rho_h - \rho_{air})g}{6pr} = \frac{2r^2(\rho_h - \rho_{air})g}{9} \quad (9)$$

On en déduit l'expression du rayon : $r = \sqrt{\frac{9v_d}{2(\rho_h - \rho_{air})g}}$ (10)

Connaissant le rayon de la gouttelette, on détermine sa charge à partir de la vitesse de montée V_m lorsqu'une tension est appliquée. L'expression établie de cette vitesse est :

$$v_m = \frac{Q \frac{U}{d} - \frac{4}{3}r^3(\rho_h - \rho_{air})g}{6r} \quad (11)$$

En remplaçant r par son expression (10) et en isolant Q , on obtient la relation :

$$Q = (v_d - v_m) \cdot \frac{\sqrt{v_d}}{U} \cdot \frac{18d^{3/2}}{\sqrt{2(\rho_h - \rho_{air})g}} \quad (12)$$

De plus, on pose : $K = \frac{18d^{3/2}}{\sqrt{2(\rho_h - \rho_{air})g}} = 2,14 \cdot 10^7 \text{ (S.I)}$

Pour déterminer la charge d'une gouttelette, il suffit donc de déterminer les vitesses V_d et V_m ; les autres paramètres nous étant connus.

Pour la réalisation de son expérience, Millikan avait utilisé une méthode quelque peu différente : après avoir calculé le rayon d'une gouttelette en fonction de sa vitesse de descente, il déterminait la charge de la gouttelette sans faire intervenir de vitesse de montée. En effet, le physicien ne s'intéressait qu'à des gouttelettes immobilisées sous l'action du champ électrique. La vitesse de montée que nous avons calculé était donc nulle pour ces gouttelettes. Il obtenait ainsi l'expression suivante pour Q , pour une valeur bien déterminée de U :

$$v_m = 0 = \frac{4}{3}r^3(\rho_h - \rho_{air})g - Q \frac{U}{d} \quad (12) \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{4r^3(\rho_h - \rho_{air})g \cdot d}{3U} \quad (13)$$

En remplaçant ensuite r par son expression $r = \sqrt{\frac{9v_d}{2(\rho_h - \rho_{air})g}}$,

Millikan en avait déduit l'expression suivante pour $Q = \frac{6r^3 d v_d}{U} \sqrt{\frac{9v_d}{2(\rho_h - \rho_{air})g}}$

ou encore $Q = \frac{18d^{3/2} v_d^{3/2}}{\sqrt{2(\rho_h - \rho_{air})g}} \cdot \frac{v_d}{U}$ (14)

Sa méthode avait l'avantage de ne nécessiter la détermination que d'une seule vitesse.

Cependant, notre méthode était plus intéressante pour notre expérience. La méthode utilisée par Millikan est en fait un cas particulier de notre méthode (où V_m est nulle).

III. Notre expérience

III.1. Notre dispositif

La manipulation consiste à étudier le mouvement d'une gouttelette d'huile chargée électriquement en suspension dans l'air et soumise ou non à un champ électrique créé entre les armatures d'un condensateur plan. On se place dans l'obscurité et les gouttes sont éclairées par le faisceau lumineux et observées à travers le microscope. Pour pouvoir mesurer plus précisément leurs vitesses, on a placé devant l'oculaire du viseur une webcam reliée à un micro-ordinateur (**figure 8**). Nous pouvons ainsi enregistrer les séquences filmées et traiter les données récupérées.

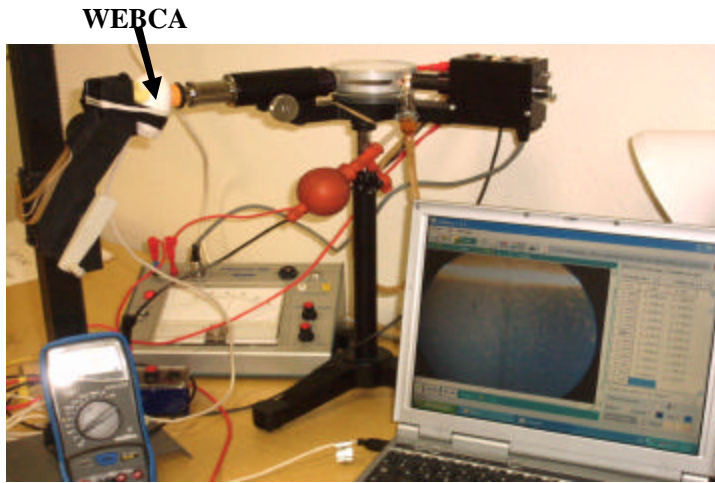


Figure 8: Dispositif de Millikan équipé d'une webcam :

III.2. Détermination de la charge d'une goutte

Dans un premier temps, on enregistre une séquence vidéo à l'aide du logiciel de capture fourni avec la webcam (Philips TOUCAM). Tout ce qui est filmé est enregistré sur le disque dur de l'ordinateur sous format AVI. On remarque que le sens du mouvement des gouttelettes sur la vidéo est opposé au sens réel : l'image est inversée (**figure 9**).

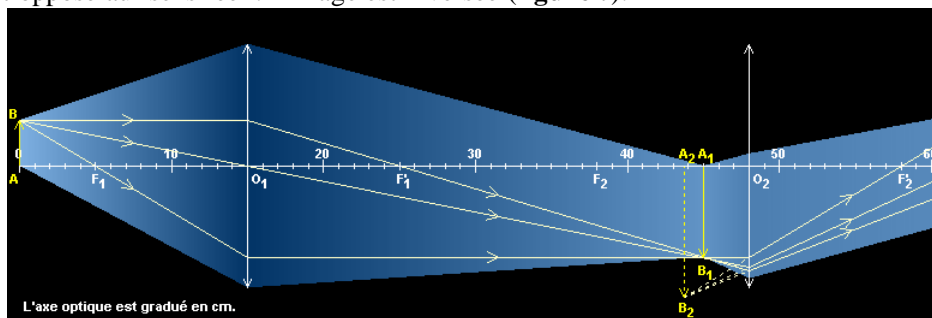


Figure 9 : Construction de l'image d'un objet réel à travers d'un système optique de deux lentilles minces : Principe d'un microscope

La séquence vidéo enregistrée pourra être traitée à l'aide d'un logiciel de pointage par la suite.

Pour déterminer la charge électrique portée par une gouttelette, il nous faut déterminer ses vitesses de descente et de montée avec et sans tension U .

a) Exploitation de la séquence vidéo enregistrée

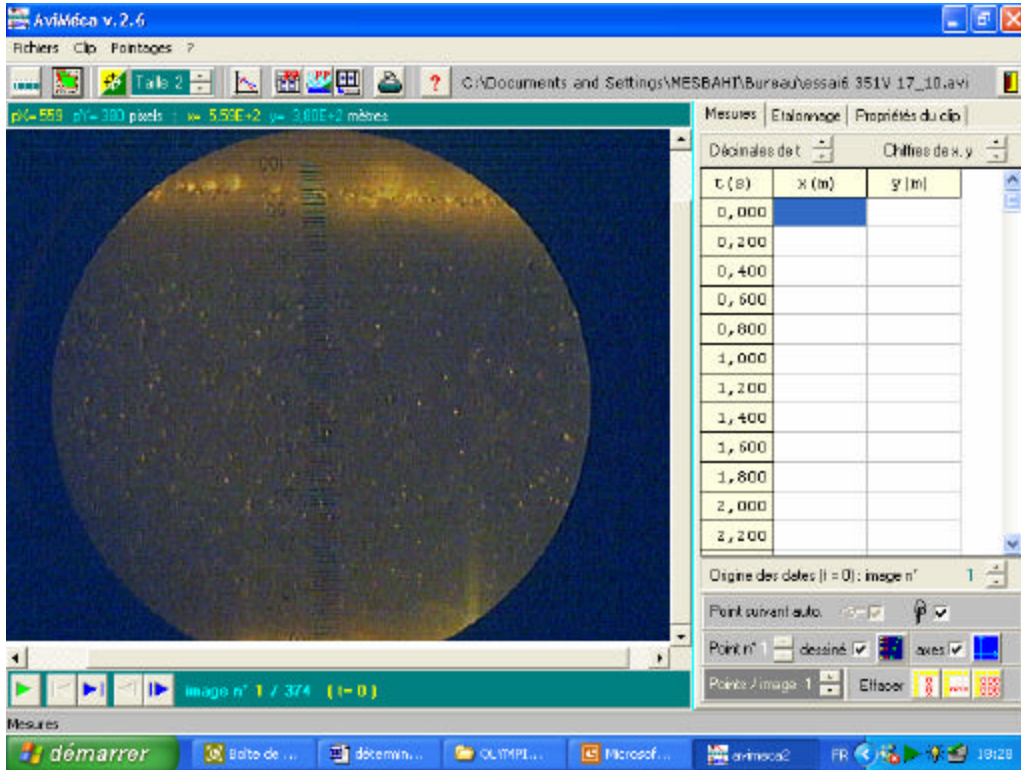


Figure 10 : Exploitation d'une séquence vidéo par le logiciel Aviméca

Plusieurs logiciels (Dynamic , Animation Marqueur , Synchronie , Aviméca...) permettent de déterminer les positions successives d'une gouttelette dans un repère et donc la distance parcourue par celle-ci. Nous avons utilisé **Aviméca v.2.6**(**figure 10**) très pratique et simple d'utilisation

Après avoir ouvert la séquence vidéo, nous pouvons vérifier les **propriétés du clip** en particulier la fréquence d'image qui est de 5 images par seconde, soit une durée entre deux images successives : $\Delta t = 0,200$ s.

Afin de déterminer les vitesses de descente et de montée des gouttelettes, il est nécessaire de réaliser un **étalonnage**. Pour cela, on pointe successivement les extrémités de l'échelle verticale graduée. Cette échelle est celle du viseur micrométrique, elle est graduée de 0 à 100 divisions. Connaissant la distance entre deux divisions (10^{-4} m), on peut en déduire la distance réelle entre la première et la dernière division ($100 \cdot 10^{-4} = 10^{-2}$ m). Il faut aussi tenir compte des caractéristiques du microscope viseur, en particulier le grandissement

Γ_{obj} de l'objectif ($\Gamma_{obj} = 2,5$).

On peut alors déterminer la distance s entre les deux divisions 0 et 100.

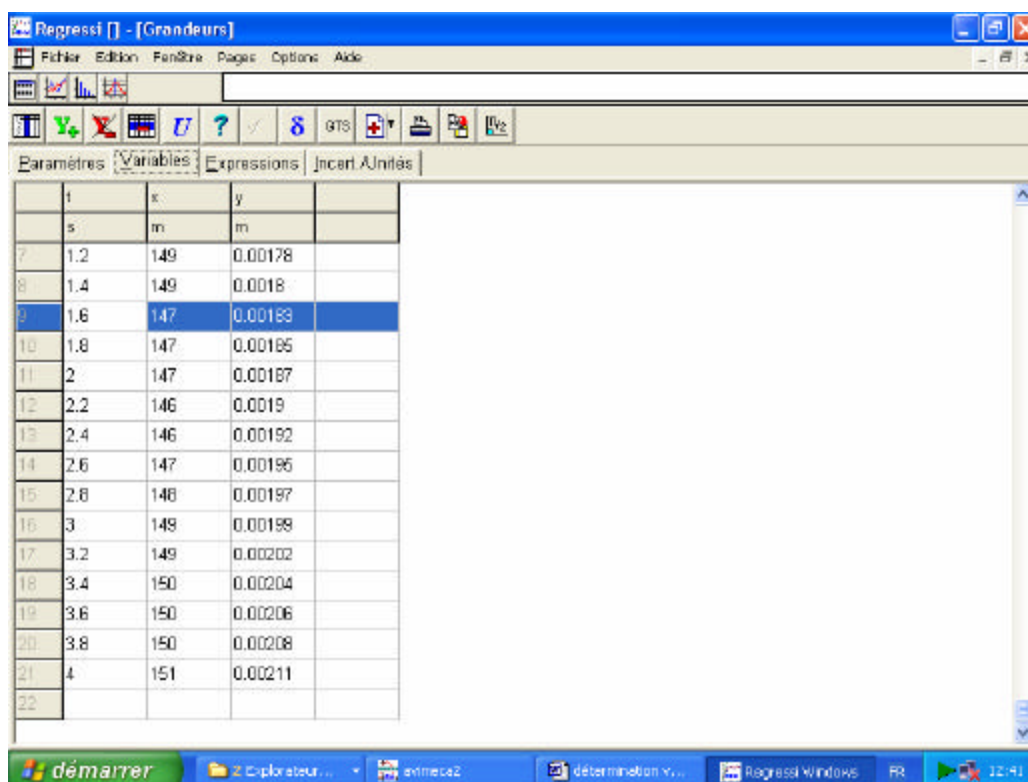
$$s \approx \frac{100}{2,5} \cdot 10^{-4} \approx 4,00 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Cette opération d'étalonnage est nécessaire afin de déterminer la distance parcourue réellement par la gouttelette entre deux pointages.

On visionne une première fois la vidéo, on constate que lorsque la tension est nulle, certaines gouttelettes montent, d'autres descendent. Lorsque l'on applique brutalement une tension, le mouvement de certaines gouttelettes change de sens alors que d'autres s'immobilisent ou se déplacent dans le même sens mais avec une vitesse différente.

En cliquant sur l'onglet «Mesures » on voit afficher un tableau de mesures indiquant les coordonnées (x,y) en fonction du temps toutes les 0,200 s .Il suffit de pointer une des gouttelettes en plusieurs positions successives, les coordonnées de ces positions s'affichent automatiquement compte tenu de l'étalonnage effectué auparavant.

On pourra montrer que le mouvement des gouttelettes est quasiment vertical et uniforme. Pour cela, on pointe successivement une gouttelette en mouvement (par exemple ascendant). On copie le tableau de mesures obtenues que l'on colle dans un tableur REGRESSI (figure 11).



	t	x	y	
	s	m	m	
7	1.2	149	0.00178	
8	1.4	149	0.0018	
9	1.6	147	0.00183	
10	1.8	147	0.00185	
11	2	147	0.00187	
12	2.2	146	0.0019	
13	2.4	146	0.00192	
14	2.6	147	0.00195	
15	2.8	146	0.00197	
16	3	149	0.00199	
17	3.2	149	0.00202	
18	3.4	150	0.00204	
19	3.6	150	0.00206	
20	3.8	150	0.00208	
21	4	151	0.00211	
22				

Figure 11 : Utilisation du tableur Regressi

L'option graphe (**Figure 12**) de ce tableau permet de visualiser la représentation graphique séparément des coordonnées $x(t)$ (graphe en bleu) et $y(t)$ (graphe en rouge).

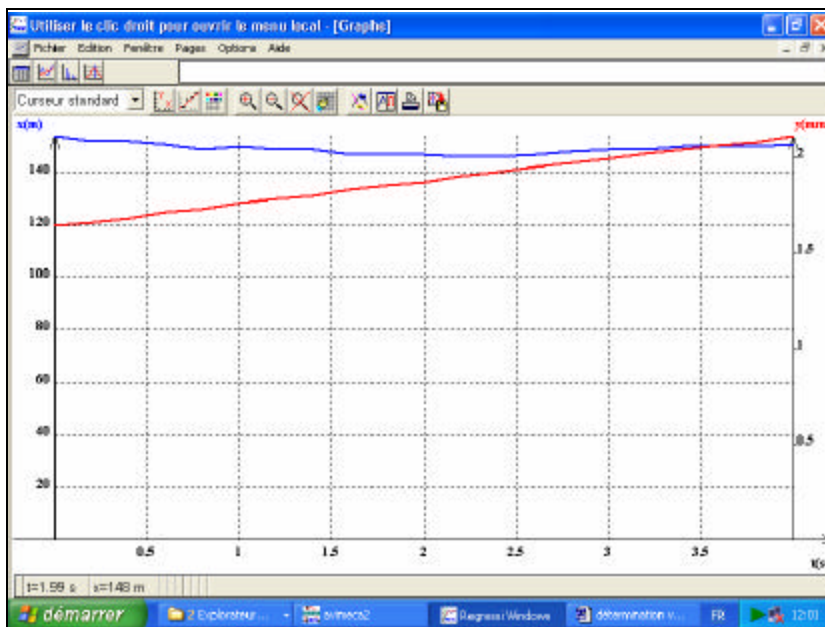


Figure 12 : Utilisation de l'option graphe du tableau Regressi : variation des coordonnées $x(t)$ (en bleu) et $y(t)$ (en rouge) .

On constate que l'abscisse $x(t)$ est quasiment constante , alors que $y(t)$ varie linéairement. La représentation graphique est quasiment une droite dont le coefficient directeur est égal à la vitesse. On peut donc considérer que le mouvement des gouttelettes est rectiligne verticalement uniforme.

b) Détermination des vitesses, du rayon et de la charge d'une goutte

Afin de déterminer rapidement et aisément la vitesse de descente ou de montée, nous avons procédé de la manière suivante : on repère par exemple une gouttelette qui a un mouvement descendant en l'absence du champ électrique ($U = 0$ V), et qui prend un mouvement ascendant lorsque on applique brutalement une tension. Après l'avoir repérée, on la pointe à 2 positions successives lorsque $U = 0$. On obtient les coordonnées (x_1, y_1) à l'instant t_1 pour le premier pointage et (x_2, y_2) à l'instant t_2 pour le second. On fait de même lorsque la tension est appliquée puis on obtient les coordonnées (x'_1, y'_1) à l'instant t'_1 et (x'_2, y'_2) à l'instant t'_2 .

Nous pouvons maintenant déterminer les vitesses de descente et de montée de la gouttelette.

Tout d'abord, on importe les données du tableau de mesures du logiciel Aviméca que l'on colle dans le tableau Excel. On détermine séparément :

la vitesse de descente $V_d = (y_2 - y_1) / (t_2 - t_1)$

puis la vitesse de montée $(V_m = (y'_2 - y'_1) / (t'_2 - t'_1))$ de la gouttelette :

Phase de montée réelle avec U					Phase de chute réelle sans U				
t_1 (s)	y_1 (m)	t_2 (s)	y_2 (m)	v_m (m/s)	t'_1 (s)	y'_1 (m)	t'_2 (s)	y'_2 (m)	v_d (m/s)
1,8	1,31E-03	12	1,01E-03	3,1E-05	13,5	1,07E-03	45,6	2,75E-03	5,2E-05

Dans le second tableau, on saisit les valeurs des vitesses. On peut ainsi déterminer la charge électrique portée par la gouttelette grâce à l'équation 12 puis son rayon grâce à l'équation 10 :

v_m (m/s)	v_d (m/s)	U (V)	Q_{exp} (C)	$Q/1,6E-19$ (C)	N	$e_{exp}=Q_{exp}/N$ (C)	r (m)
3,1E-05	5,2E-05	150	7,98E-19	5,0	5	1,596E-19	7,05E-07

Connaissant les différentes charges portées par les gouttelettes, en supposant que celles-ci étant multiples d'une valeur commune, nous pouvons dès lors déterminer la valeur expérimentale de la charge élémentaire e .

III.3 Détermination de la charge élémentaire

Nous avons étudié 175 gouttes dans des conditions de tensions appliquées différentes (voir tableau de mesures et calculs en annexe). Nous avons représenté sous forme d'un histogramme (Annexe 2: **figure 13 a et figure 13. b**) les valeurs de la charge électrique portée par chaque gouttelette. Les traits horizontaux rouges indiquent les multiples de la valeur théorique de la charge élémentaire $e=1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

Grâce aux calculs effectués, on ne détermine que la charge totale portée par la goutte. Pour obtenir la charge d'un électron (la "charge élémentaire") on doit encore diviser la charge de la goutte obtenue par un nombre entier N. Malheureusement on ne connaît pas N. On doit donc l'estimer.

Pour cela on utilise la valeur théorique connue c'est-à-dire $1,602 \cdot 10^{-19}$ C. On divise alors les charges totales des gouttes par cette valeur théorique, puis on prend la valeur entière arrondie du résultat obtenue. De cette manière, nous estimons le nombre entier N que nous utilisons ensuite pour diviser la valeur de la charge totale de la goutte.

Ainsi nous obtenons une valeur de la charge élémentaire. Cette valeur, ainsi que le nombre N estimé sont mentionnés dans le tableau.

Faisant de même pour chaque goutte étudiée, nous obtenons 275 valeurs différentes de la charge élémentaire (**figure 14**).

Enfin, nous avons fait une moyenne de toutes ces valeurs. On trouve :

$$e_{exp} = 1,625 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Nous avons également procédé différemment afin de montrer le caractère discontinu de la charge électrique

Dans un premier temps, nous avons consigné les différentes charges dans des gammes allant de $0,2 \cdot 10^{-19}$ C en $0,2 \cdot 10^{-19}$ C

Puis nous avons comptabilisé le nombre n de fois où apparaissaient les charges électriques dans chaque gamme (comme dans le cas d'un dépouillement aux élections). Par exemple dans la gamme allant de $1,6 \cdot 10^{-19}$ à $1,8 \cdot 10^{-19}$, nous avons trouvé 21 valeurs. Nous avons procédé de la même manière pour toutes les gammes, et avons pu tracer un graphique (**figure 15**), en portant n

en fonction de la charge dans chaque gamme. On remarque alors que les charges sont groupées par « paquets » passant par des maxima régulièrement espacés. Ce qui montre la structure discontinue des charges électriques c'est-à-dire qu'elles sont des multiples d'une valeur commune, ici représentée par cet écart. La valeur commune est donc le PGCD de ces différentes valeurs successives.

La moyenne de cette valeur commune a été calculée de la façon suivante :

$$e_{\text{moy}} = \frac{\sum Q_{i,\text{max}}}{\sum N_i}$$

C'est à dire la somme des charges maximales par la somme des multiples N

successifs correspondants.

$$\begin{aligned} \text{Soit : } e_{\text{moy}} &= (Q1+Q2+Q3+Q4+Q5+Q6) / (1+2+3+4+5+6) \\ \text{Donc } e_{\text{moy}} &= (1.6+3.2+4.6+6.2+8.2+10.2) \cdot 10^{-19} / (1+2+3+4+5+6) \\ &= 1.627 \cdot 10^{-19} \text{ C} \end{aligned}$$

Ce résultat est tout a fait compatible avec le précédent.

III.4 Appréciation et discussion des résultats

Dans cette partie nous tentons de répondre à une troisième problématique :

⚡ **Quelles sont les sources d'erreurs et d'imprécisions qui interviennent dans nos mesures ?**

Lorsque l'on compare la valeur moyenne de la charge élémentaire que nous avons déterminé avec la valeur exacte $e_h = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, on constate qu'elle est un peu plus élevée. Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de cette différence.

On peut tout d'abord prendre en compte les sources d'erreurs provenant des imprécisions sur les différentes grandeurs de l'expression de Q (d, v, g, et U).

$$Q = \frac{18}{\sqrt{2}} \cdot \frac{d \cdot v^{3/2}}{(g)^{1/2}} \cdot \frac{v^{3/2}}{U}$$

En appliquant l'opérateur logarithme népérien sur Q on a :

$$\ln Q = \ln\left(\frac{18}{\sqrt{2}}\right) + \ln d + \frac{3}{2} \ln v - \frac{1}{2} \ln g - \frac{3}{2} \ln U$$

Par dérivation on obtient :

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{d}{d} + \frac{3}{2} \frac{dv}{v} - \frac{1}{2} \frac{dg}{g} - \frac{3}{2} \frac{dU}{U}$$

L'expression de l'incertitude relative sur Q peut donc s'écrire de la forme :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{3}{2} \frac{\Delta v}{v} - \frac{1}{2} \frac{\Delta g}{g} - \frac{3}{2} \frac{\Delta U}{U}$$

Avec les estimations de l'ordre de grandeur suivant :

$$\frac{\Delta d}{d} \approx 1.10^{-4} ; \frac{\Delta v}{v} \approx 0,001 \cdot 10^{-5} \text{ N.s.m}^{-2}$$

$$\frac{\Delta g}{g} \approx 2,5 \cdot 10^{-2} ; \frac{\Delta U}{U} \approx \text{kg.m}^{-3} = 20 \text{ g.L}^{-1}$$

$$\Delta U \approx 0,2 \text{ V} ; \text{ soit pour } U=100 \text{ V } \frac{\Delta U}{U} \approx 2 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{\Delta v}{v} \approx 4.10^{-2}$$

Ce qui donne une estimation de l'incertitude relative sur la charge portée par les gouttelettes de l'ordre de : $\frac{\Delta Q}{Q} \approx 0,105$ soit **10,5%**.

On peut considérer que les sources d'erreurs systématiques proviennent principalement de la mesure de la vitesse et de la masse volumique de l'huile.

- ? Notre mesure de la masse volumique de l'huile utilisée, a été effectuée avec un échantillon de faible volume (10 mL) en pesant sa masse (avec une balance au centigramme près).
- ? La mauvaise coaxialité du viseur et de la webcam (que nous avons fixé sur un support maintenu par des élastiques et de la patte à fixe), engendre des imprécisions supplémentaires non négligeables sur la détermination de la vitesse.

D'autres études plus approfondies ont montré que l'écart entre la valeur expérimentale de la charge et la valeur théorique provient de la validité de la loi de Stokes.

$$F_f = 6\pi \eta r v$$

Rappelons ici les conditions de validité de cette loi :

1. Les constituants du fluide (ici l'air) sont petits par rapport au rayon de la sphère(gouttes).
2. La sphère est lisse et rigide.
3. Le milieu adhère sur la surface.
4. La force de frottement est purement visqueuse.

On constate inmanquablement que ces critères notamment le premier et le troisième ne sont pas respectés. Le rayon des gouttes que nous avons estimé (de l'ordre du micromètre) n'est en fait pas assez grand devant le libre parcours moyen des molécules d'air (celui des molécules de dioxygène et de diazote est de l'ordre de $6,00.10^{-8}$ m), pour pouvoir appliquer la loi de Stokes.

Le rapport η/r sert de critère de validité. Il faut que $\eta/r \ll 1$

Il est donc nécessaire d'apporter une correction à cette loi : Millikan remplaça la viscosité de l'air par une viscosité efficace. Il supposa qu'elle est de la forme suivante :

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\eta}{(1 + A \cdot \frac{\eta}{r})}$$

Des études approfondies donnent une valeur théorique à $A=0,788$, mais Millikan remarqua que la valeur de 0,874 était plus appropriée.

Nous avons donc souhaité (voir Tableau de mesure en annexe 1) corriger la valeur expérimentale de la charge que nous avons déterminée auparavant. En tenant compte de l'ordre de cette correction apportée par Millikan, nous avons simplement calculé q_{eff} en reprenant les valeurs de r (en gardant la valeur de la viscosité non corrigée). En reportant cette valeur de la viscosité efficace dans la formule donnant la charge Q , on obtient la valeur corrigée de la charge de la goutte.

Après avoir estimé le nombre N (multiple de e théorique = $1,602.10^{-19}$ C), nous avons calculé la valeur expérimentale de la charge élémentaire corrigée e_{cor} . En faisant la moyenne de toutes les valeurs ainsi corrigées pour chacune des gouttes étudiées, on obtient :

$$e_{\text{cor,exp}} = (1,597.10^{-19} \text{ C} \pm 0,4\%)$$

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

IV. Conclusion

Le but principal de ce projet a été de reproduire l'expérience faite par Millikan qui permet de déterminer la charge élémentaire. Pour mener à bien ce projet, il nous a fallu adopter une démarche scientifique. Nous nous sommes donc posés plusieurs problématiques auxquelles nous avons répondu. Enfin, nous avons réussi à trouver une valeur moyenne de la charge élémentaire en procédant de deux façons, dont l'une d'elle se calculait à partir des mesures en faisant abstraction de la valeur connue. Nous avons également tenté de démontrer le caractère discontinu de la charge électrique. La valeur corrigée que nous avons estimée en moyenne égale à $1,597 \cdot 10^{-19}$ C, est très satisfaisante compte tenu des erreurs systématiques sur les différentes grandeurs intervenant dans les expressions.

En fait, en 1910 Millikan annonça une valeur de $(1,592 \pm 0,003) \cdot 10^{-19}$ C. Mais il avait une mesure approchée de la viscosité de l'air : il la considérait égale à $1,825 \cdot 10^{-5}$ N.s.m⁻², alors qu'on l'évalue aujourd'hui à $1,843 \cdot 10^{-5}$ N.s.m⁻² à 25°C. En tenant compte de ceci, il aurait dû trouver une valeur de la charge élémentaire de $(1,616 \pm 0,003) \cdot 10^{-19}$ C

Par ailleurs, nous aurions pu utiliser d'autres techniques que par frottement pour charger plus de gouttelettes. On aurait pu utiliser par exemple une source radioactive ionisante comme ce qu'avait fait Millikan avec les rayons X.

L'outil informatique nous a été indispensable, car il nous a permis de multiplier les mesures et donc d'obtenir une valeur de la charge élémentaire, proche de celle trouvée par Millikan.

L'expérience de Millikan ne permet que de démontrer la nature quantifiée des charges. Pour aller plus loin, il serait intéressant d'étudier d'autres propriétés que la charge porte avec elle, à savoir qu'elle est une grandeur additive et qu'elle est conservée. Sur ces deux points, l'expérience de Millikan ne donne aucune information.

Voilà donc le fruit de notre travail, c'est aussi notre manière à nous de célébrer l'anniversaire des cents ans de l'électron, depuis sa reconnaissance en tant que particule élémentaire en 1901. Cent ans qui est par ailleurs dix fois l'âge de notre lycée qui fête cette année 2003/2004 sa dixième rentrée depuis sa construction.

ANNEXE 1 :

TABLEAU DE CALCUL DE LA CHARGE DE LA GOUTTE Q_{exp} ET ESTIMATION DE LA CHARGE ELEMENTAIRE e AVANT ET APRES CORRECTION .

$$Q = (v_d - v_m) \cdot \frac{\sqrt{v_d}}{U} \cdot \frac{18 \rho d^3}{\sqrt{2(\rho_h - \rho_{\text{air}})g}} ; K = \frac{18 \rho d^3}{\sqrt{2(\rho_h - \rho_{\text{air}})g}} \cdot 2,14 \cdot 10^{-10} \text{ (S.I)}$$

	Vitesse de montée	Vitesse de descente	tension	Charge portée par la goutte	Nbr e	Charge élémentaire	Rayon de la goutte	viscosité efficace de l'air	Charge de la goutte après correction		Charge élémentaire corrigée	erreur relative
n° goutte	v_m (U>0) (m/s)	v_d (m/s)	U (V)	Q_{exp} (C)	N	e_{exp} (C)	r (m)	η_{eff} (N.s.m ⁻²)	Q_{cor} (C)	N	e_{cor} (C)	$\eta e/e$
1	3,06E-05	5,2E-05	150	8,36E-19	5	1,672E-19	7,4E-07	1,72E-05	7,716E-19	5	1,543E-19	0,037
2	6,2E-05	2,6E-05	150	6,23E-19	4	1,557E-19	5,2E-07	1,67E-05	5,513E-19	3	1,838E-19	0,147
3	2,65E-05	1,9E-05	150	2,79E-19	2	1,396E-19	4,5E-07	1,65E-05	2,419E-19	2	1,209E-19	0,245
4	1,03E-05	3,8E-05	150	4,13E-19	3	1,378E-19	6,3E-07	1,7E-05	3,749E-19	2	1,874E-19	0,17
5	2,17E-05	3,3E-05	150	4,33E-19	3	1,444E-19	5,8E-07	1,69E-05	3,894E-19	2	1,947E-19	0,215
6	0,000045	1,5E-05	150	3,26E-19	2	1,631E-19	4E-07	1,63E-05	2,77E-19	2	1,385E-19	0,135
7	0,00008	3,3E-05	200	6,84E-19	4	1,709E-19	5,9E-07	1,69E-05	6,155E-19	4	1,539E-19	0,04
8	6,73E-05	3,3E-05	200	6E-19	4	1,5E-19	5,8E-07	1,69E-05	5,397E-19	3	1,799E-19	0,123
9	3,79E-05	4,8E-05	200	6,2E-19	4	1,55E-19	7,1E-07	1,71E-05	5,696E-19	4	1,424E-19	0,111
10	4,64E-05	4,8E-05	200	6,87E-19	4	1,718E-19	7,1E-07	1,71E-05	6,317E-19	4	1,579E-19	0,014
11	5,29E-05	5,8E-05	200	8,78E-19	5	1,756E-19	7,7E-07	1,72E-05	8,143E-19	5	1,629E-19	0,017
12	0,0001	1,9E-05	250	4,3E-19	3	1,433E-19	4,4E-07	1,64E-05	3,716E-19	2	1,858E-19	0,16
13	2,21E-05	3,5E-05	250	2,85E-19	2	1,425E-19	6,1E-07	1,69E-05	2,574E-19	2	1,287E-19	0,197
14	8,77E-05	3,5E-05	500	3,03E-19	2	1,517E-19	6E-07	1,69E-05	2,739E-19	2	1,37E-19	0,145
15	4,99E-05	2,9E-05	500	1,76E-19	1	1,76E-19	5,5E-07	1,68E-05	1,569E-19	1	1,569E-19	0,02
16	0,000121	2,2E-05	500	2,8E-19	2	1,402E-19	4,8E-07	1,66E-05	2,454E-19	2	1,227E-19	0,234
17	0,00011	3E-05	500	3,23E-19	2	1,617E-19	5,6E-07	1,68E-05	2,894E-19	2	1,447E-19	0,097
18	7,22E-05	6,7E-05	500	4,74E-19	3	1,58E-19	8,3E-07	1,73E-05	4,425E-19	3	1,475E-19	0,079
19	4,17E-05	2,8E-05	500	1,53E-19	1	1,53E-19	5,4E-07	1,68E-05	1,361E-19	1	1,361E-19	0,15
20	0,000103	4,6E-05	500	4,25E-19	3	1,415E-19	6,9E-07	1,71E-05	3,894E-19	2	1,947E-19	0,216
21	4,17E-05	2,8E-05	500	1,53E-19	1	1,53E-19	5,4E-07	1,68E-05	1,361E-19	1	1,361E-19	0,15
22	6,25E-05	7,9E-05	450	5,83E-19	4	1,458E-19	9,1E-07	1,74E-05	5,484E-19	3	1,828E-19	0,141
23	4,52E-05	0,00012	450	8,12E-19	5	1,624E-19	1,1E-06	1,76E-05	7,749E-19	5	1,55E-19	0,033
24	2,86E-05	2,8E-05	450	1,38E-19	1	1,379E-19	5,4E-07	1,68E-05	1,227E-19	1	1,227E-19	0,234
25	0,000144	4,8E-05	450	6,17E-19	4	1,542E-19	7,1E-07	1,71E-05	5,666E-19	4	1,417E-19	0,116
26	6,77E-05	5,1E-05	450	3,9E-19	2	1,952E-19	7,2E-07	1,72E-05	3,597E-19	2	1,799E-19	0,123
27	4,52E-05	5,2E-05	450	3,27E-19	2	1,636E-19	7,4E-07	1,72E-05	3,018E-19	2	1,509E-19	0,058
28	4,29E-05	4,4E-05	450	2,68E-19	2	1,339E-19	6,8E-07	1,71E-05	2,45E-19	2	1,225E-19	0,235
29	2,74E-05	3,1E-05	450	1,52E-19	1	1,522E-19	5,7E-07	1,68E-05	1,365E-19	1	1,365E-19	0,148
30	5,58E-05	0,00002	450	1,57E-19	1	1,575E-19	4,6E-07	1,65E-05	1,368E-19	1	1,368E-19	0,146
31	8,1E-05	3,5E-05	450	3,19E-19	2	1,593E-19	6E-07	1,69E-05	2,876E-19	2	1,438E-19	0,102
32	4,29E-05	2,8E-05	450	1,71E-19	1	1,714E-19	5,3E-07	1,68E-05	1,523E-19	1	1,523E-19	0,049
33	7,26E-05	3,7E-05	450	3,09E-19	2	1,547E-19	6,2E-07	1,7E-05	2,802E-19	2	1,401E-19	0,125
34	2,98E-05	5,3E-05	450	2,82E-19	2	1,412E-19	7,4E-07	1,72E-05	2,608E-19	2	1,304E-19	0,186
35	5,12E-05	6,4E-05	450	4,31E-19	3	1,437E-19	8,2E-07	1,73E-05	4,018E-19	3	1,339E-19	0,164
36	7,38E-05	3,8E-05	450	3,23E-19	2	1,617E-19	6,3E-07	1,7E-05	2,936E-19	2	1,468E-19	0,084
37	2,39E-05	8,3E-05	350	5,77E-19	4	1,442E-19	9,3E-07	1,74E-05	5,434E-19	3	1,811E-19	0,131
38	7,02E-05	6,3E-05	350	6,27E-19	4	1,567E-19	8,1E-07	1,73E-05	5,832E-19	4	1,458E-19	0,09

Olympiades de Physique 2004 – Expérience de Millikan- Lycée Condorcet à Saint-Priest (69)

39	2,27E-05	2,8E-05	350	1,61E-19	1	1,61E-19	5,4E-07	1,68E-05	1,434E-19	1	1,434E-19	0,105
40	9,08E-05	5,3E-05	350	6,3E-19	4	1,574E-19	7,5E-07	1,72E-05	5,816E-19	4	1,454E-19	0,092
41	6,42E-05	7,6E-05	350	7,34E-19	5	1,468E-19	8,9E-07	1,74E-05	6,891E-19	4	1,723E-19	0,075
42	7,63E-05	9,5E-05	350	1E-18	6	1,667E-19	1E-06	1,75E-05	9,474E-19	6	1,579E-19	0,014
43	5,91E-05	7,6E-05	350	7E-19	4	1,749E-19	8,9E-07	1,74E-05	6,566E-19	4	1,641E-19	0,025
44	6,89E-05	5,8E-05	153	1,33E-18	8	1,658E-19	7,8E-07	1,72E-05	1,231E-18	8	1,538E-19	0,04
45	7,02E-05	5,9E-05	201	1,03E-18	6	1,713E-19	7,8E-07	1,72E-05	9,541E-19	6	1,59E-19	0,007
46	9,71E-05	2,9E-05	201	7E-19	4	1,75E-19	5,5E-07	1,68E-05	6,242E-19	4	1,56E-19	0,026
47	3,49E-05	3,9E-05	201	4,86E-19	3	1,62E-19	6,4E-07	1,7E-05	4,418E-19	3	1,473E-19	0,081
48	0,00005	4,8E-05	251	5,61E-19	3	1,869E-19	7E-07	1,71E-05	5,15E-19	3	1,717E-19	0,071
49	8,18E-05	5,4E-05	251	8,31E-19	5	1,662E-19	7,5E-07	1,72E-05	7,68E-19	5	1,536E-19	0,041
50	0,000062	0,00014	514	9,31E-19	6	1,551E-19	1,2E-06	1,76E-05	8,922E-19	6	1,487E-19	0,072
51	0,000075	0,00011	514	7,73E-19	5	1,547E-19	1,1E-06	1,75E-05	7,358E-19	5	1,472E-19	0,081
52	0,000043	9,8E-05	514	5,68E-19	3	1,892E-19	1E-06	1,75E-05	5,381E-19	3	1,794E-19	0,12
53	4,93E-05	6E-05	299	5,91E-19	4	1,477E-19	7,9E-07	1,73E-05	5,489E-19	3	1,83E-19	0,142
54	6,89E-05	5,1E-05	299	5,96E-19	4	1,491E-19	7,3E-07	1,72E-05	5,497E-19	3	1,832E-19	0,144
55	2,52E-05	5,1E-05	351	3,25E-19	2	1,626E-19	7,3E-07	1,72E-05	2,998E-19	2	1,499E-19	0,064
56	7,07E-05	3E-05	351	3,29E-19	2	1,646E-19	5,6E-07	1,68E-05	2,944E-19	2	1,472E-19	0,081
57	0,000025	5,1E-05	351	3,21E-19	2	1,606E-19	7,3E-07	1,72E-05	2,959E-19	2	1,479E-19	0,076
58	0,000135	9,3E-05	404	1,13E-18	7	1,619E-19	9,8E-07	1,75E-05	1,072E-18	7	1,532E-19	0,044
59	0,000108	4E-05	404	4,82E-19	3	1,608E-19	6,4E-07	1,7E-05	4,388E-19	3	1,463E-19	0,087
60	5,38E-05	2,1E-05	404	1,74E-19	1	1,744E-19	4,6E-07	1,65E-05	1,518E-19	1	1,518E-19	0,052
61	2,18E-05	5,6E-05	404	3,01E-19	2	1,503E-19	7,6E-07	1,72E-05	2,782E-19	2	1,391E-19	0,132
62	6,49E-05	4E-05	454	3,03E-19	2	1,514E-19	6,4E-07	1,7E-05	2,752E-19	2	1,376E-19	0,141
63	3,44E-05	2,9E-05	454	1,57E-19	1	1,567E-19	5,5E-07	1,68E-05	1,397E-19	1	1,397E-19	0,128
64	0,00008	5,3E-05	454	4,47E-19	3	1,489E-19	7,4E-07	1,72E-05	4,125E-19	3	1,375E-19	0,142
65	0,000053	4,8E-05	454	3,23E-19	2	1,614E-19	7,1E-07	1,71E-05	2,967E-19	2	1,483E-19	0,074
66	5,63E-05	6,4E-05	454	4,44E-19	3	1,48E-19	8,2E-07	1,73E-05	4,137E-19	3	1,379E-19	0,139
67	4,67E-05	9,1E-05	454	6,04E-19	4	1,51E-19	9,7E-07	1,75E-05	5,709E-19	4	1,427E-19	0,109
68	7,05E-05	4,3E-05	501	3,11E-19	2	1,555E-19	6,7E-07	1,71E-05	2,841E-19	2	1,421E-19	0,113
69	6,89E-05	4,3E-05	501	3,03E-19	2	1,516E-19	6,7E-07	1,71E-05	2,768E-19	2	1,384E-19	0,136
70	6,39E-05	4,6E-05	501	3,09E-19	2	1,545E-19	6,9E-07	1,71E-05	2,832E-19	2	1,416E-19	0,116
71	3,79E-05	3,3E-05	501	1,68E-19	1	1,684E-19	5,8E-07	1,69E-05	1,514E-19	1	1,514E-19	0,055
72	2,97E-05	3,2E-05	501	1,47E-19	1	1,473E-19	5,8E-07	1,69E-05	1,323E-19	1	1,323E-19	0,174
73	3,06E-05	5,2E-05	150	8,36E-19	5	1,672E-19	7,4E-07	1,72E-05	7,716E-19	5	1,543E-19	0,037
74	0,000065	3,8E-05	454	2,89E-19	2	1,445E-19	6,2E-07	1,7E-05	2,619E-19	2	1,31E-19	0,183
75	1,39E-05	2,4E-05	240	1,59E-19	1	1,592E-19	5E-07	1,66E-05	1,401E-19	1	1,401E-19	0,125
76	4,44E-05	1,5E-05	240	1,99E-19	1	1,986E-19	3,9E-07	1,62E-05	1,683E-19	1	1,683E-19	0,051
77	0,000118	4,4E-05	240	9,27E-19	6	1,544E-19	6,7E-07	1,71E-05	8,471E-19	5	1,694E-19	0,058
78	0,000119	3E-05	200	8,46E-19	5	1,693E-19	5,6E-07	1,68E-05	7,564E-19	5	1,513E-19	0,056
79	3,91E-05	2E-05	200	2,73E-19	2	1,366E-19	4,5E-07	1,65E-05	2,372E-19	1	2,372E-19	0,481
80	0,000162	0,00005	200	1,57E-18	9	1,744E-19	7,2E-07	1,72E-05	1,445E-18	9	1,606E-19	0,002
81	1,92E-05	4,3E-05	200	4,27E-19	3	1,422E-19	6,7E-07	1,71E-05	3,898E-19	2	1,949E-19	0,217
82	8,15E-05	4,7E-05	299	6,21E-19	4	1,551E-19	7E-07	1,71E-05	5,698E-19	4	1,425E-19	0,111
83	4,95E-05	6,1E-05	299	6,08E-19	4	1,519E-19	8E-07	1,73E-05	5,65E-19	4	1,412E-19	0,118
84	6,89E-05	5,7E-05	299	6,61E-19	4	1,652E-19	7,7E-07	1,72E-05	6,122E-19	4	1,531E-19	0,045
85	4,1E-05	4E-05	299	3,61E-19	2	1,804E-19	6,5E-07	1,7E-05	3,284E-19	2	1,642E-19	0,025
86	0,000141	5,6E-05	299	1,04E-18	6	1,732E-19	7,7E-07	1,72E-05	9,629E-19	6	1,605E-19	0,002
87	0,000131	4,9E-05	299	8,82E-19	5	1,764E-19	7,1E-07	1,71E-05	8,111E-19	5	1,622E-19	0,013
88	0,000134	0,00012	351	1,61E-18	10	1,614E-19	1,1E-06	1,76E-05	1,54E-18	10	1,54E-19	0,039
89	0,000145	5,2E-05	351	8,51E-19	5	1,702E-19	7,4E-07	1,72E-05	7,855E-19	5	1,571E-19	0,019
90	0,000102	3,1E-05	351	4,41E-19	3	1,471E-19	5,7E-07	1,68E-05	3,954E-19	2	1,977E-19	0,234
91	4,82E-05	5,5E-05	351	4,52E-19	3	1,507E-19	7,5E-07	1,72E-05	4,18E-19	3	1,393E-19	0,13

92	1,01E-05	3,8E-05	351	1,74E-19	1	1,736E-19	6,2E-07	1,7E-05	1,574E-19	1	1,574E-19	0,018
93	0,00014	0,00011	351	1,59E-18	10	1,595E-19	1,1E-06	1,75E-05	1,52E-18	9	1,688E-19	0,054
94	2,41E-05	0,00005	351	3,12E-19	2	1,56E-19	7,2E-07	1,72E-05	2,873E-19	2	1,437E-19	0,103
95	0,000265	7,8E-05	404	1,57E-18	10	1,572E-19	9E-07	1,74E-05	1,478E-18	9	1,642E-19	0,025
96	0,000246	7,5E-05	404	1,44E-18	9	1,597E-19	8,8E-07	1,74E-05	1,348E-18	8	1,685E-19	0,052
97	5,21E-05	2,5E-05	153	5,3E-19	3	1,768E-19	5,1E-07	1,67E-05	4,687E-19	3	1,562E-19	0,025
98	6,31E-05	4,9E-05	153	1,07E-18	7	1,525E-19	7,1E-07	1,71E-05	9,814E-19	6	1,636E-19	0,021
99	3,06E-05	5,1E-05	201	6,01E-19	4	1,503E-19	7,3E-07	1,72E-05	5,541E-19	3	1,847E-19	0,153
100	4,77E-05	6,7E-05	201	9,83E-19	6	1,639E-19	8,4E-07	1,73E-05	9,183E-19	6	1,531E-19	0,045
101	2,4E-05	3,1E-05	201	3,13E-19	2	1,565E-19	5,6E-07	1,68E-05	2,803E-19	2	1,401E-19	0,125
102	6,97E-05	6E-05	201	1,05E-18	7	1,503E-19	7,9E-07	1,73E-05	9,779E-19	6	1,63E-19	0,017
103	2,53E-05	4,3E-05	201	4,66E-19	3	1,553E-19	6,7E-07	1,71E-05	4,257E-19	3	1,419E-19	0,114
104	9,56E-05	2,7E-05	201	6,65E-19	4	1,664E-19	5,3E-07	1,67E-05	5,911E-19	4	1,478E-19	0,077
105	3,37E-05	6,9E-05	201	8,87E-19	5	1,775E-19	8,5E-07	1,73E-05	8,295E-19	5	1,659E-19	0,036
106	7,6E-05	2,2E-05	201	4,72E-19	3	1,573E-19	4,7E-07	1,66E-05	4,124E-19	3	1,375E-19	0,142
107	5,63E-05	7,9E-05	251	1E-18	6	1,669E-19	9,1E-07	1,74E-05	9,416E-19	6	1,569E-19	0,02
108	2,56E-05	7,5E-05	251	7,29E-19	5	1,459E-19	8,8E-07	1,74E-05	6,844E-19	4	1,711E-19	0,068
109	2,73E-05	1,9E-05	251	1,72E-19	1	1,715E-19	4,5E-07	1,65E-05	1,487E-19	1	1,487E-19	0,072
110	3,47E-05	5,7E-05	251	5,76E-19	4	1,439E-19	7,7E-07	1,72E-05	5,334E-19	3	1,778E-19	0,11
111	6,13E-05	4,8E-05	251	6,31E-19	4	1,576E-19	7,1E-07	1,71E-05	5,793E-19	4	1,448E-19	0,096
112	6,05E-05	1,8E-05	160	4,27E-19	3	1,422E-19	4,3E-07	1,64E-05	3,668E-19	2	1,834E-19	0,145
113	2,8E-05	1,9E-05	160	2,63E-19	2	1,317E-19	4,4E-07	1,64E-05	2,277E-19	1	2,277E-19	0,421
114	1,38E-05	3,4E-05	160	3,67E-19	2	1,835E-19	6E-07	1,69E-05	3,308E-19	2	1,654E-19	0,033
115	3,58E-05	3,1E-05	160	4,8E-19	3	1,602E-19	5,6E-07	1,68E-05	4,302E-19	3	1,434E-19	0,105
116	1,81E-05	1,3E-05	160	1,44E-19	1	1,436E-19	3,6E-07	1,61E-05	1,201E-19	1	1,201E-19	0,251
117	1,91E-05	2,9E-05	160	3,43E-19	2	1,715E-19	5,5E-07	1,68E-05	3,064E-19	2	1,532E-19	0,044
118	3,46E-05	2,2E-05	160	3,5E-19	2	1,75E-19	4,8E-07	1,66E-05	3,066E-19	2	1,533E-19	0,043
119	0,000111	5,1E-05	280	8,68E-19	5	1,737E-19	7,3E-07	1,72E-05	8,006E-19	5	1,601E-19	5E-04
120	2,26E-05	5,3E-05	280	4,13E-19	3	1,377E-19	7,4E-07	1,72E-05	3,816E-19	2	1,908E-19	0,191
121	6,97E-05	3,3E-05	280	4,41E-19	3	1,47E-19	5,9E-07	1,69E-05	3,969E-19	2	1,984E-19	0,239
122	0,000045	1,9E-05	380	1,52E-19	1	1,523E-19	4,4E-07	1,64E-05	1,317E-19	1	1,317E-19	0,178
123	0,000153	6,2E-05	380	9,25E-19	6	1,542E-19	8E-07	1,73E-05	8,606E-19	5	1,721E-19	0,074
124	5,27E-05	1,8E-05	380	1,68E-19	1	1,675E-19	4,4E-07	1,64E-05	1,446E-19	1	1,446E-19	0,097
125	0,00013	8,1E-05	380	1,05E-18	6	1,742E-19	9,2E-07	1,74E-05	9,84E-19	6	1,64E-19	0,024
126	7,37E-05	1,5E-05	380	1,92E-19	1	1,917E-19	4E-07	1,63E-05	1,63E-19	1	1,63E-19	0,018
127	5,51E-05	1,7E-05	380	1,65E-19	1	1,646E-19	4,2E-07	1,64E-05	1,413E-19	1	1,413E-19	0,118
128	8,33E-05	3,5E-05	380	3,87E-19	2	1,936E-19	6,1E-07	1,69E-05	3,497E-19	2	1,749E-19	0,092
129	5,47E-05	5,5E-05	460	3,67E-19	2	1,836E-19	7,5E-07	1,72E-05	3,396E-19	2	1,698E-19	0,06
130	0,000116	0,00012	460	1,14E-18	7	1,626E-19	1,1E-06	1,76E-05	1,086E-18	7	1,551E-19	0,032
131	0,000113	0,00011	460	1,09E-18	7	1,556E-19	1,1E-06	1,76E-05	1,038E-18	6	1,73E-19	0,08
132	2,16E-05	5,3E-05	180	6,33E-19	4	1,581E-19	7,4E-07	1,72E-05	5,842E-19	4	1,461E-19	0,088
133	1,21E-05	3,4E-05	180	3,1E-19	2	1,55E-19	5,9E-07	1,69E-05	2,792E-19	2	1,396E-19	0,129
134	9,72E-06	3,1E-05	180	2,66E-19	2	1,33E-19	5,7E-07	1,68E-05	2,384E-19	1	2,384E-19	0,488
135	1,43E-05	1,8E-05	180	1,62E-19	1	1,622E-19	4,4E-07	1,64E-05	1,399E-19	1	1,399E-19	0,126
136	3,92E-05	4,4E-05	180	6,45E-19	4	1,614E-19	6,8E-07	1,71E-05	5,906E-19	4	1,476E-19	0,078
137	2,8E-05	6,7E-05	180	8,98E-19	6	1,497E-19	8,3E-07	1,73E-05	8,382E-19	5	1,676E-19	0,046
138	2,64E-05	3,5E-05	180	4,23E-19	3	1,411E-19	6E-07	1,69E-05	3,824E-19	2	1,912E-19	0,193
139	1,76E-05	4,3E-05	180	4,55E-19	3	1,516E-19	6,6E-07	1,71E-05	4,151E-19	3	1,384E-19	0,136
140	3,72E-05	4,7E-05	180	6,67E-19	4	1,668E-19	7E-07	1,71E-05	6,122E-19	4	1,531E-19	0,045
141	2,76E-05	6,8E-05	180	9,21E-19	6	1,535E-19	8,4E-07	1,73E-05	8,609E-19	5	1,722E-19	0,075
142	1,87E-05	4,4E-05	180	4,81E-19	3	1,603E-19	6,7E-07	1,71E-05	4,397E-19	3	1,466E-19	0,085
143	4,49E-05	9,4E-05	360	7,77E-19	5	1,555E-19	9,9E-07	1,75E-05	7,357E-19	5	1,471E-19	0,082
144	2,43E-05	3,2E-05	360	1,83E-19	1	1,829E-19	5,7E-07	1,69E-05	1,641E-19	1	1,641E-19	0,024

Olympiades de Physique 2004 – Expérience de Millikan- Lycée Condorcet à Saint-Priest (69)

145	3,65E-05	4,3E-05	360	3E-19	2	1,498E-19	6,7E-07	1,71E-05	2,735E-19	2	1,368E-19	0,146
146	4,85E-05	2,4E-05	360	2,04E-19	1	2,039E-19	5E-07	1,66E-05	1,794E-19	1	1,794E-19	0,12
147	0,00005	5,8E-05	360	4,8E-19	3	1,601E-19	7,8E-07	1,72E-05	4,456E-19	3	1,485E-19	0,073
148	3,61E-05	4,7E-05	360	3,27E-19	2	1,637E-19	7E-07	1,71E-05	3,004E-19	2	1,502E-19	0,063
149	4,19E-05	6,8E-05	360	5,29E-19	3	1,763E-19	8,4E-07	1,73E-05	4,943E-19	3	1,648E-19	0,029
150	1,67E-05	5,5E-05	360	3,09E-19	2	1,543E-19	7,6E-07	1,72E-05	2,855E-19	2	1,427E-19	0,109
151	4,74E-05	5,8E-05	360	4,69E-19	3	1,562E-19	7,8E-07	1,72E-05	4,348E-19	3	1,449E-19	0,095
152	3,09E-05	5,9E-05	360	4,03E-19	2	2,017E-19	7,8E-07	1,72E-05	3,745E-19	2	1,872E-19	0,169
153	4,58E-05	6,8E-05	360	5,48E-19	3	1,826E-19	8,4E-07	1,73E-05	5,12E-19	3	1,707E-19	0,065
154	4,78E-05	3,3E-05	360	2,66E-19	2	1,329E-19	5,8E-07	1,69E-05	2,389E-19	1	2,389E-19	0,491
155	0,000035	6,8E-05	360	4,93E-19	3	1,644E-19	8,4E-07	1,73E-05	4,607E-19	3	1,536E-19	0,041
156	3,86E-05	4,2E-05	360	3,03E-19	2	1,513E-19	6,6E-07	1,7E-05	2,761E-19	2	1,38E-19	0,138
157	2,47E-05	8,4E-05	360	5,79E-19	4	1,447E-19	9,3E-07	1,74E-05	5,457E-19	3	1,819E-19	0,135
158	8,91E-05	6,8E-05	440	6,12E-19	4	1,531E-19	8,4E-07	1,73E-05	5,718E-19	4	1,43E-19	0,108
159	0,000021	0,00011	440	6,33E-19	4	1,584E-19	1,1E-06	1,75E-05	6,026E-19	4	1,507E-19	0,06
160	2,74E-05	9,3E-05	440	5,54E-19	3	1,847E-19	9,8E-07	1,75E-05	5,243E-19	3	1,748E-19	0,091
161	2,61E-05	9,8E-05	440	5,87E-19	3	1,958E-19	1E-06	1,75E-05	5,571E-19	3	1,857E-19	0,159
162	5,27E-05	2,2E-05	440	1,69E-19	1	1,686E-19	4,8E-07	1,66E-05	1,478E-19	1	1,478E-19	0,078
163	2,56E-05	3,7E-05	440	1,81E-19	1	1,81E-19	6,2E-07	1,7E-05	1,64E-19	1	1,64E-19	0,023
164	2,86E-05	3,2E-05	440	1,61E-19	1	1,61E-19	5,7E-07	1,69E-05	1,445E-19	1	1,445E-19	0,098
165	2,89E-05	7,2E-05	440	4,08E-19	2	2,038E-19	8,7E-07	1,73E-05	3,818E-19	2	1,909E-19	0,192
166	1,71E-05	3,8E-05	260	2,72E-19	2	1,36E-19	6,3E-07	1,7E-05	2,467E-19	2	1,234E-19	0,23
167	2,38E-05	2,3E-05	260	1,8E-19	1	1,8E-19	4,9E-07	1,66E-05	1,58E-19	1	1,58E-19	0,013
168	1,35E-05	4,7E-05	260	3,31E-19	2	1,657E-19	7E-07	1,71E-05	3,041E-19	2	1,521E-19	0,051
169	1,69E-05	4,3E-05	260	3,15E-19	2	1,577E-19	6,7E-07	1,71E-05	2,881E-19	2	1,44E-19	0,101
170	2,05E-05	2,5E-05	260	1,82E-19	1	1,817E-19	5,1E-07	1,67E-05	1,604E-19	1	1,604E-19	0,001
171	0,000145	6,3E-05	480	7,19E-19	4	1,797E-19	8,1E-07	1,73E-05	6,694E-19	4	1,674E-19	0,045
172	8,17E-05	7,1E-05	480	5,64E-19	3	1,878E-19	8,6E-07	1,73E-05	5,276E-19	3	1,759E-19	0,098
173	3,33E-05	7E-05	480	3,75E-19	2	1,875E-19	8,5E-07	1,73E-05	3,507E-19	2	1,754E-19	0,095
174	0,00019	6,3E-05	480	8,75E-19	5	1,751E-19	8,1E-07	1,73E-05	8,151E-19	5	1,63E-19	0,018
175	7,88E-05	5,4E-05	480	4,22E-19	3	1,406E-19	7,5E-07	1,72E-05	3,896E-19	2	1,948E-19	0,216
176	0,000196	2,1E-05	480	4,39E-19	3	1,463E-19	4,7E-07	1,66E-05	3,832E-19	2	1,916E-19	0,196
177	0,00007	2,6E-05	480	2,14E-19	1	2,143E-19	5,2E-07	1,67E-05	1,899E-19	1	1,899E-19	0,186
178	2,88E-05	3,1E-05	480	1,45E-19	1	1,446E-19	5,7E-07	1,68E-05	1,296E-19	1	1,296E-19	0,191
179	0,000108	7,4E-05	480	6,78E-19	4	1,696E-19	8,8E-07	1,74E-05	6,359E-19	4	1,59E-19	0,008
180	0,000165	2,6E-05	480	4,25E-19	3	1,417E-19	5,2E-07	1,67E-05	3,768E-19	2	1,884E-19	0,176
181	0,00002	2,3E-05	140	3,01E-19	2	1,505E-19	4,8E-07	1,66E-05	2,638E-19	2	1,319E-19	0,177
182	1,28E-05	3,4E-05	140	4,03E-19	2	2,017E-19	5,9E-07	1,69E-05	3,634E-19	2	1,817E-19	0,134
183	0,000016	0,00002	140	2,4E-19	1	2,403E-19	4,6E-07	1,65E-05	2,088E-19	1	2,088E-19	0,304
184	0,000013	2,8E-05	140	3,17E-19	2	1,585E-19	5,3E-07	1,68E-05	2,819E-19	2	1,409E-19	0,12
185	0,000045	1,4E-05	140	3,25E-19	2	1,626E-19	3,8E-07	1,62E-05	2,738E-19	2	1,369E-19	0,145
186	0,00002	1,1E-05	140	1,56E-19	1	1,565E-19	3,4E-07	1,6E-05	1,292E-19	1	1,292E-19	0,193
187	1,93E-05	1,1E-05	140	1,5E-19	1	1,498E-19	3,4E-07	1,59E-05	1,234E-19	1	1,234E-19	0,229
188	4,89E-05	1,6E-05	140	3,92E-19	2	1,96E-19	4,1E-07	1,63E-05	3,349E-19	2	1,675E-19	0,045
189	3,33E-05	1,8E-05	140	3,17E-19	2	1,587E-19	4,3E-07	1,64E-05	2,729E-19	2	1,365E-19	0,148
190	1,67E-05	1,9E-05	140	2,29E-19	1	2,289E-19	4,4E-07	1,64E-05	1,979E-19	1	1,979E-19	0,235
191	4,99E-05	1,8E-05	140	4,22E-19	3	1,406E-19	4,3E-07	1,64E-05	3,628E-19	2	1,814E-19	0,132
192	2,19E-05	2,4E-05	300	1,59E-19	1	1,587E-19	5E-07	1,67E-05	1,399E-19	1	1,399E-19	0,126
193	4,43E-05	1,5E-05	300	1,59E-19	1	1,589E-19	3,9E-07	1,62E-05	1,347E-19	1	1,347E-19	0,159
194	1,88E-05	2,6E-05	300	1,57E-19	1	1,568E-19	5,2E-07	1,67E-05	1,388E-19	1	1,388E-19	0,134
195	0,000119	2,6E-05	300	5,09E-19	3	1,697E-19	5,2E-07	1,67E-05	4,506E-19	3	1,502E-19	0,062
196	0,000109	6,8E-06	300	2,09E-19	1	2,088E-19	2,6E-07	1,54E-05	1,63E-19	1	1,63E-19	0,017
197	4,55E-05	4,6E-05	300	4,33E-19	3	1,442E-19	6,9E-07	1,71E-05	3,966E-19	2	1,983E-19	0,238

Olympiades de Physique 2004 – Expérience de Millikan- Lycée Condorcet à Saint-Priest (69)

198	4,24E-05	5,9E-05	300	5,45E-19	3	1,816E-19	7,8E-07	1,72E-05	5,058E-19	3	1,686E-19	0,052
199	3,48E-05	1,2E-05	300	1,14E-19	1	1,142E-19	3,6E-07	1,6E-05	9,506E-20	1	9,506E-20	0,407
200	0,00005	1,3E-05	300	1,6E-19	1	1,596E-19	3,7E-07	1,61E-05	1,338E-19	1	1,338E-19	0,165
201	3,71E-05	1,5E-05	300	1,4E-19	1	1,395E-19	3,9E-07	1,62E-05	1,183E-19	1	1,183E-19	0,262
202	7,42E-05	7E-05	300	8,38E-19	5	1,675E-19	8,5E-07	1,73E-05	7,834E-19	5	1,567E-19	0,022
203	8,47E-05	4,2E-05	300	5,71E-19	4	1,427E-19	6,6E-07	1,7E-05	5,208E-19	3	1,736E-19	0,084
204	5,53E-05	9E-06	300	1,34E-19	1	1,341E-19	3,1E-07	1,57E-05	1,081E-19	1	1,081E-19	0,325
205	2,26E-05	2,5E-05	300	1,66E-19	1	1,657E-19	5,1E-07	1,67E-05	1,464E-19	1	1,464E-19	0,086
206	5,97E-05	3,1E-05	300	3,53E-19	2	1,763E-19	5,7E-07	1,68E-05	3,159E-19	2	1,58E-19	0,014
207	3,52E-05	5,4E-05	515	2,64E-19	2	1,319E-19	7,5E-07	1,72E-05	2,437E-19	2	1,218E-19	0,239
208	0,000101	6,5E-05	515	5,43E-19	3	1,809E-19	8,2E-07	1,73E-05	5,058E-19	3	1,686E-19	0,052
209	0,000143	5,9E-05	515	6,3E-19	4	1,575E-19	7,8E-07	1,72E-05	5,848E-19	4	1,462E-19	0,087
210	0,000071	5,4E-05	515	3,73E-19	2	1,866E-19	7,5E-07	1,72E-05	3,449E-19	2	1,724E-19	0,076
211	0,000036	7,7E-05	515	4,01E-19	2	2,004E-19	8,9E-07	1,74E-05	3,764E-19	2	1,882E-19	0,175
212	7,07E-05	3,6E-05	340	3,91E-19	2	1,954E-19	6,1E-07	1,69E-05	3,532E-19	2	1,766E-19	0,102
213	5,82E-05	3E-05	340	3E-19	2	1,499E-19	5,6E-07	1,68E-05	2,683E-19	2	1,341E-19	0,163
214	0,000106	1,6E-05	340	2,99E-19	2	1,497E-19	4,1E-07	1,63E-05	2,555E-19	1	2,555E-19	0,595
215	5,73E-05	4E-05	340	3,8E-19	2	1,902E-19	6,5E-07	1,7E-05	3,462E-19	2	1,731E-19	0,08
216	6,56E-05	5,7E-05	340	5,7E-19	4	1,426E-19	7,7E-07	1,72E-05	5,287E-19	3	1,762E-19	0,1
217	3,06E-05	5,5E-05	150	8,9E-19	6	1,483E-19	7,6E-07	1,72E-05	8,235E-19	5	1,647E-19	0,028
218	0,000017	3,5E-05	150	4,3E-19	3	1,433E-19	6E-07	1,69E-05	3,883E-19	2	1,941E-19	0,212
219	6,29E-05	2,8E-05	150	6,8E-19	4	1,699E-19	5,4E-07	1,68E-05	6,057E-19	4	1,514E-19	0,055
220	2,87E-05	3,3E-05	150	4,9E-19	3	1,634E-19	5,8E-07	1,69E-05	4,407E-19	3	1,469E-19	0,083
221	1,86E-05	3,5E-05	150	4,39E-19	3	1,462E-19	6E-07	1,69E-05	3,959E-19	2	1,979E-19	0,236
222	4,32E-05	0,00005	200	6,89E-19	4	1,722E-19	7,2E-07	1,72E-05	6,344E-19	4	1,586E-19	0,01
223	7,4E-05	5,7E-05	200	1,03E-18	6	1,718E-19	7,7E-07	1,72E-05	9,55E-19	6	1,592E-19	0,006
224	5,89E-05	3,5E-05	200	5,75E-19	4	1,438E-19	6E-07	1,69E-05	5,189E-19	3	1,73E-19	0,08
225	2,48E-05	2,3E-05	250	1,9E-19	1	1,896E-19	4,9E-07	1,66E-05	1,663E-19	1	1,663E-19	0,038
226	0,000155	7,4E-05	250	1,64E-18	10	1,64E-19	8,7E-07	1,74E-05	1,537E-18	10	1,537E-19	0,04
227	7,76E-05	4,5E-05	250	6,89E-19	4	1,724E-19	6,9E-07	1,71E-05	6,314E-19	4	1,579E-19	0,015
228	9,73E-05	1,9E-05	250	4,29E-19	3	1,43E-19	4,5E-07	1,65E-05	3,718E-19	2	1,859E-19	0,161
229	9,36E-05	2,3E-05	250	4,72E-19	3	1,574E-19	4,9E-07	1,66E-05	4,15E-19	3	1,383E-19	0,136
230	2,27E-05	9,6E-05	300	8,15E-19	5	1,63E-19	1E-06	1,75E-05	7,724E-19	5	1,545E-19	0,036
231	6,29E-05	4,3E-05	300	4,82E-19	3	1,608E-19	6,7E-07	1,71E-05	4,407E-19	3	1,469E-19	0,083
232	8,75E-05	4,9E-05	300	6,65E-19	4	1,664E-19	7,1E-07	1,71E-05	6,12E-19	4	1,53E-19	0,045
233	6,48E-05	3E-05	300	3,6E-19	2	1,798E-19	5,6E-07	1,68E-05	3,213E-19	2	1,607E-19	0,003
234	2,09E-05	9,6E-05	300	8E-19	5	1,6E-19	1E-06	1,75E-05	7,579E-19	5	1,516E-19	0,054
235	5,72E-05	7,4E-05	350	6,69E-19	4	1,673E-19	8,7E-07	1,74E-05	6,273E-19	4	1,568E-19	0,021
236	7,68E-05	2,7E-05	350	3,18E-19	2	1,59E-19	5,3E-07	1,67E-05	2,821E-19	2	1,411E-19	0,119
237	5,22E-05	3E-05	350	2,71E-19	2	1,356E-19	5,6E-07	1,68E-05	2,426E-19	1	2,426E-19	0,514
238	2,33E-05	6,5E-05	350	4,23E-19	3	1,408E-19	8,2E-07	1,73E-05	3,939E-19	2	1,969E-19	0,229
239	0,00004	9,4E-05	350	7,77E-19	5	1,554E-19	9,9E-07	1,75E-05	7,356E-19	4	1,839E-19	0,148
240	0,000189	3,9E-05	400	7,41E-19	5	1,482E-19	6,4E-07	1,7E-05	6,729E-19	4	1,682E-19	0,05
241	0,000148	4,8E-05	400	7,13E-19	4	1,783E-19	7,1E-07	1,71E-05	6,556E-19	4	1,639E-19	0,023
242	8,33E-05	1,7E-05	400	2,14E-19	1	2,14E-19	4,2E-07	1,63E-05	1,833E-19	1	1,833E-19	0,144
243	0,000192	0,00005	400	8,94E-19	6	1,491E-19	7,2E-07	1,72E-05	8,235E-19	5	1,647E-19	0,028
244	0,000156	3,9E-05	400	6,33E-19	4	1,583E-19	6,3E-07	1,7E-05	5,751E-19	4	1,438E-19	0,102
245	5,24E-05	6,3E-05	450	4,25E-19	3	1,415E-19	8,1E-07	1,73E-05	3,952E-19	2	1,976E-19	0,234
246	2,39E-05	5,3E-05	450	2,61E-19	2	1,303E-19	7,4E-07	1,72E-05	2,407E-19	1	2,407E-19	0,502
247	6,19E-05	3,7E-05	450	2,78E-19	2	1,389E-19	6,2E-07	1,7E-05	2,516E-19	2	1,258E-19	0,215
248	5,12E-05	7,6E-05	450	5,19E-19	3	1,729E-19	8,9E-07	1,74E-05	4,87E-19	3	1,623E-19	0,013
249	4,63E-05	0,00005	450	3,16E-19	2	1,582E-19	7,2E-07	1,72E-05	2,912E-19	2	1,456E-19	0,091
250	0,000103	4,2E-05	500	3,92E-19	2	1,96E-19	6,6E-07	1,7E-05	3,575E-19	2	1,788E-19	0,116

251	6,86E-05	2,8E-05	500	2,16E-19	1	2,157E-19	5,4E-07	1,68E-05	1,922E-19	1	1,922E-19	0,2
252	7,79E-05	2,2E-05	500	1,96E-19	1	1,958E-19	4,8E-07	1,66E-05	1,714E-19	1	1,714E-19	0,07
253	0,000111	4,7E-05	500	4,5E-19	3	1,501E-19	7E-07	1,71E-05	4,13E-19	3	1,377E-19	0,141
254	8,14E-05	2,8E-05	500	2,43E-19	1	2,427E-19	5,4E-07	1,68E-05	2,161E-19	1	2,161E-19	0,349
255	6,39E-05	9,7E-05	320	1,03E-18	6	1,721E-19	1E-06	1,75E-05	9,787E-19	6	1,631E-19	0,018
256	4,36E-05	4E-05	320	3,41E-19	2	1,707E-19	6,4E-07	1,7E-05	3,104E-19	2	1,552E-19	0,031
257	0,000123	6,4E-05	320	9,75E-19	6	1,625E-19	8,1E-07	1,73E-05	9,084E-19	6	1,514E-19	0,055
258	3,54E-05	2,2E-05	320	1,74E-19	1	1,736E-19	4,7E-07	1,66E-05	1,518E-19	1	1,518E-19	0,053
259	1,63E-05	8,6E-05	320	6,2E-19	4	1,551E-19	9,5E-07	1,74E-05	5,853E-19	4	1,463E-19	0,087
260	7,69E-06	4E-05	320	1,96E-19	1	1,955E-19	6,4E-07	1,7E-05	1,778E-19	1	1,778E-19	0,11
261	2,68E-05	5,7E-05	320	4,17E-19	3	1,391E-19	7,7E-07	1,72E-05	3,868E-19	2	1,934E-19	0,207
262	4,25E-05	7,1E-05	320	6,22E-19	4	1,555E-19	8,6E-07	1,73E-05	5,821E-19	4	1,455E-19	0,092
263	4,88E-05	6,4E-05	320	5,88E-19	4	1,469E-19	8,1E-07	1,73E-05	5,474E-19	3	1,825E-19	0,139
264	4,39E-05	5,3E-05	320	4,56E-19	3	1,52E-19	7,4E-07	1,72E-05	4,21E-19	3	1,403E-19	0,124
265	3,33E-05	5,2E-05	320	4,04E-19	2	2,019E-19	7,4E-07	1,72E-05	3,726E-19	2	1,863E-19	0,163
266	0,000148	4,3E-05	500	5,24E-19	3	1,748E-19	6,7E-07	1,71E-05	4,791E-19	3	1,597E-19	0,003
267	0,000165	2,6E-05	500	4,08E-19	2	2,038E-19	5,2E-07	1,67E-05	3,61E-19	2	1,805E-19	0,127
268	0,000194	2,9E-05	500	5E-19	3	1,666E-19	5,5E-07	1,68E-05	4,459E-19	3	1,486E-19	0,072
269	0,000112	2,7E-05	500	3,04E-19	2	1,521E-19	5,3E-07	1,68E-05	2,703E-19	2	1,351E-19	0,156
270	0,000189	2,9E-05	500	4,86E-19	3	1,619E-19	5,4E-07	1,68E-05	4,328E-19	3	1,443E-19	0,099
271	3,27E-05	4,3E-05	500	2,05E-19	1	2,051E-19	6,6E-07	1,71E-05	1,872E-19	1	1,872E-19	0,169
272	6,25E-05	1,6E-05	500	1,29E-19	1	1,291E-19	4E-07	1,63E-05	1,099E-19	1	1,099E-19	0,314
273	9,77E-05	4,8E-05	500	4,2E-19	3	1,399E-19	7E-07	1,71E-05	3,854E-19	2	1,927E-19	0,203
274	4,84E-05	6,2E-05	500	3,63E-19	2	1,815E-19	8E-07	1,73E-05	3,377E-19	2	1,689E-19	0,054
275	0,000234	2,6E-05	500	5,48E-19	3	1,826E-19	5,2E-07	1,67E-05	4,845E-19	3	1,615E-19	0,008

moyenne	e=	1,628E-19	moy e=	1,596E-19	0,004
avant correction			après correction		

ANNEXE 2 : GRAPHES

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages :

- 1) Manuel de PHYSIQUE Première S et Terminale S- Microméga Hatier
- 2) La mécanique des fluides / cours par M. HANAUER- BTS et IUT- Editions Bréard
- 3) Les particules élémentaires. Michel CROZON et François VANNUCCI- Editions : Que sais- je ?
- 4) La physique des particules – Robert ZITOUN – Nathan Université
- 5) Sous l'atome, les particules- Etienne KLEIN – Ed Dominos- Flammarion

Périodiques

- 1) Le monde des particules : de l'électron aux quarks- de Steven Weinberg Pour La Science :1985
- 2) Les bulles font de la résistance : Sciences et Vie – N°546-Aout 1992

Sites Internet :

- 1) Utilisation d'une webcam en mécanique- Pierre Guidicelli ac -LYON
<http://pierre.guidicelli.free.fr/>
- 2) Histoire de l'électron :
<http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/Fwheelct.html-7>
- 3) La nature paradoxale de l'électron :
www.radio-canada.ca/actualité/découverte/dossiers/10_quant/2b.html-
- 4) la découverte de l'atome
www.ac-nantes.fr/peda/disc/scphy/dohtml/3ieme/atome/1david/decatom.htm
- 5) L'expérience de Millikan par JL DUGARDIN, M.BAUDRY et P. NAIDON
www.sciences.univ-nantes.fr/physique/enseignement/tp/millikan/millikan.html
- 6) TP : expérience de Millikan : www.unine.ch/phys
- 7) TP-Ecole Fédérale Polytechnique de Lausanne
www.bboxbbs.ch/home/rich/physics/h3.htm

CDROM

- 1) Encyclopédie- Encarta 98
- 2) Encyclopédie Larousse 2002
- 3) Encyclopédie SCIENCE INTERACTIVE - HACHETTE