

## Exercice N°1 :

Le problème posé par la nature des « rayons cathodiques » à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle fut résolu en 1897 par l'Anglais J.J. Thomson : il s'agissait de particules chargées négativement baptisées par la suite « électrons ». La découverte de l'électron valut à Thomson le prix Nobel de physique en 1906.



J.J. Thomson

Le défi pour les scientifiques de l'époque fut alors de déterminer les caractéristiques de cette particule : sa charge électrique et sa masse. Dans un premier temps, Thomson lui-même, en étudiant la déviation d'un faisceau d'électrons dans un champ électrique, put obtenir le « rapport  $e/m_e$  » de ces deux caractéristiques.



R. Millikan

C'est cependant l'Américain R. Millikan qui, réalisant de multiples expériences entre 1906 et 1913 sur des gouttelettes d'huile, détermina la valeur de la charge de l'électron.

En 1927, G.P. Thomson, le fils de J.J. Thomson, réalise une expérience de diffraction des électrons par des cristaux.



G.P. Thomson

Actuellement, les valeurs admises de la masse et de la charge de l'électron sont :

$$m_e = 9,1093826 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad \text{et} \quad e = 1,602176565 \times 10^{-19} \text{ C.}$$

**Donnée :** Constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

Cet exercice comprend **trois parties indépendantes**, en lien avec les travaux de ces trois physiciens.

### 1. L'expérience de J.J. Thomson

Lors de ses recherches dans son laboratoire de Cambridge, Thomson conçoit un dispositif dans lequel un faisceau d'électrons est dévié lors de son passage entre deux plaques où règne un champ électrique. La mesure de la déviation du faisceau d'électrons lui permet alors de déterminer le rapport  $e/m_e$ .

L'étude suivante porte sur le mouvement d'un électron du faisceau qui pénètre entre deux plaques parallèles et horizontales  $P_1$  et  $P_2$ , dans une zone où règne un champ électrique  $\vec{E}$  supposé uniforme et perpendiculaire aux deux plaques.

À l'instant  $t = 0 \text{ s}$ , l'électron arrive en un point O avec une vitesse horizontale  $\vec{v}_0$ .

La trajectoire de l'électron dans un repère (O,x,y) est fournie sur **L'ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**.

L'électron de masse  $m_e$  et de charge  $q = -e$ , dont le mouvement étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen, est soumis à la seule force électrostatique  $\vec{F}_e$ .

1.1. Sur le document de **L'ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**, représenter sans souci d'échelle et en justifiant les tracés :

- le vecteur force  $\vec{F}_e$  en un point de la trajectoire de l'électron ;
- le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  en un point quelconque situé entre les plaques  $P_1$  et  $P_2$ .

1.2. En utilisant la deuxième loi de Newton, déterminer les équations horaires  $x(t)$  et  $y(t)$  du mouvement de l'électron.

1.3. Vérifier que la trajectoire de l'électron a pour équation :  $y = \frac{e.E}{2.m_e.v_0^2}.x^2$ .

1.4. À la sortie de la zone entre les plaques  $P_1$  et  $P_2$ , l'électron a subi une déviation verticale SH comme l'indique le schéma de **L'ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**. On mesure  $SH = y_s = 2,0 \times 10^{-2}$  m.

Déterminer, dans cette expérience, la valeur du rapport  $e/m_e$  de l'électron.

Conclure.

**Données :** Longueur des plaques :  $L = 9,0 \times 10^{-2}$  m  
Vitesse initiale de l'électron :  $v_0 = 2,4 \times 10^7$  m.s<sup>-1</sup>  
Valeur du champ électrique :  $E = 1,6 \times 10^4$  V.m<sup>-1</sup>

## 2. L'expérience de Millikan

L'objectif de Millikan est de montrer qu'un corps chargé ne peut porter qu'une charge électrique multiple d'une « charge élémentaire ».

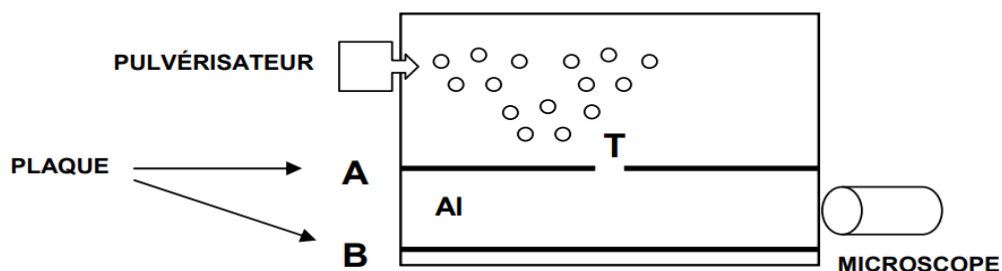
### Document 1 : Principe de l'expérience menée en 1910 par Millikan

Millikan pulvérise des gouttelettes d'huile chargées par irradiation entre deux plaques planes où règne un champ électrique et les observe à l'aide d'un microscope.

Sa méthode consiste à immobiliser les gouttelettes en augmentant le champ électrique jusqu'à ce que le poids de la gouttelette soit compensé par la force électrostatique.

Millikan parvint ainsi à obtenir une valeur approchée de la charge élémentaire  $e = 1,591 \times 10^{-19}$  C, très proche de la valeur admise aujourd'hui.

### Document 2 : Description d'une expérience menée de nos jours en laboratoire



Un pulvérisateur produit un nuage de gouttelettes d'huile chargées négativement qui tombent dans la chambre supérieure du dispositif. Lorsque l'une d'elles passe à travers le trou T, elle tombe verticalement à une vitesse constante  $v_1$ , son poids étant très vite compensé par la force de frottement exercée par l'air. Lors de cette première étape, la chute verticale de la gouttelette dans l'air en l'absence de champ électrique est observée à l'aide d'un microscope et permet de déterminer le rayon  $r$  de la gouttelette qui n'est pas mesurable directement.

Lors d'une deuxième étape, lorsque la gouttelette parvient en bas du dispositif, un champ électrique uniforme est créé entre les plaques A et B. La gouttelette remonte alors verticalement à une vitesse constante  $v_2$ .

La charge électrique portée par la gouttelette est ensuite déduite des mesures des vitesses  $v_1$  et  $v_2$ .

Lors de l'expérience menée au laboratoire, une gouttelette de masse  $m$  et de charge  $q$  négative arrive entre les plaques A et B.

La poussée d'Archimède est négligée. La gouttelette étudiée est soumise à son poids  $\vec{P}$  et à la force de frottement  $\vec{f}$  exercée par l'air s'exprimant par la relation  $\vec{f} = -6.\pi.\eta.r.\vec{v}$  dans laquelle  $\eta$  est la viscosité de l'air,  $r$  le rayon de la gouttelette et  $\vec{v}$  sa vitesse.

**Données :** Masse volumique de l'huile :  $\rho = 890 \text{ kg.m}^{-3}$   
Valeur du champ de pesanteur :  $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$   
Viscosité de l'air :  $\eta = 1,8 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$

## 2.1. Chute verticale de la gouttelette

2.1.1. Lors de la chute de la gouttelette en l'absence de champ électrique, écrire la relation vectorielle entre la force de frottement et le poids lorsque la vitesse constante  $v_1$  est atteinte.

En déduire l'expression de  $v_1$  en fonction de  $\eta$ ,  $r$ ,  $m$  et  $g$ .

2.1.2. La relation précédente peut également s'écrire  $v_1 = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho.g.r^2}{\eta}$

où  $\rho$  est la masse volumique de l'huile.

Déterminer le rayon  $r$  de la gouttelette sachant qu'elle parcourt, lors de sa chute, une distance de 2,11 mm pendant une durée  $\Delta t = 10,0 \text{ s}$ .

2.1.3. Afin de faciliter la mesure au microscope, la gouttelette ne doit pas être trop rapide.

En déduire s'il est préférable de sélectionner une grosse gouttelette ou au contraire une petite gouttelette.

## 2.2. Remontée de la gouttelette

Un champ électrique uniforme étant établi entre les plaques A et B, la gouttelette subit une force supplémentaire  $\vec{F}_e$  verticale et remonte alors avec une vitesse constante  $v_2$  atteinte presque instantanément.

On peut montrer que la charge  $q$  de la gouttelette est donnée par la relation :

$$q = - \frac{6.\pi.\eta.r.(v_1 + v_2)}{E}$$

Plusieurs mesures ont été réalisées pour différentes gouttelettes et rassemblées dans le tableau du document 3.

**Document 3 : Mesures de  $v_1$  et  $v_2$  pour différentes gouttelettes**

Numéro de la gouttelette	Rayon $r$ de la gouttelette ( $\mu\text{m}$ )	Vitesse de descente $v_1$ ( $\times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ )	Vitesse de remontée $v_2$ ( $\times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ )	Charge $q$ de la gouttelette (C)
1	1,2	1,55	1,59	$- 6,4 \times 10^{-19}$
2	1,3	1,82	1,81	$- 8,0 \times 10^{-19}$
3	1,5	2,42	1,35	$- 9,6 \times 10^{-19}$
4	1,6	2,76	3,13	$- 1,6 \times 10^{-18}$
5		1,82	2,53	$- 9,6 \times 10^{-19}$

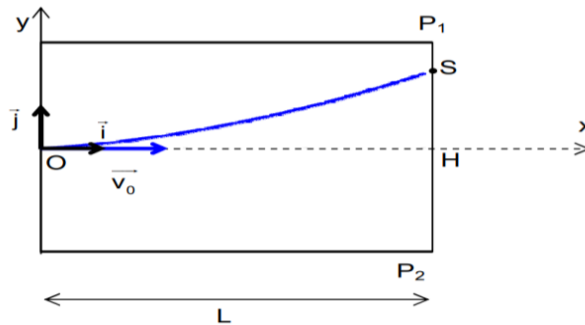
2.2.1. Les gouttelettes n°2 et n°5 du document 3 ont la même vitesse de descente  $v_1$  mais des vitesses de remontée  $v_2$  différentes.

Déterminer sans calcul le rayon de la gouttelette n°5. Justifier.

Pourquoi leurs vitesses de remontée sont-elles différentes ?

2.2.2. Montrer, à partir des résultats expérimentaux du document 3, que la charge de ces gouttelettes est « quantifiée », c'est-à-dire qu'elle ne prend que des valeurs multiples d'une même charge élémentaire égale à  $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

2.3. En quoi le protocole de l'expérience effectuée par Millikan diffère-t-il de celui réalisé au laboratoire par J.J. Thomson ?



**Justification :**

Sens de  $\vec{F}_e$  :

Sens de  $\vec{E}$  :

**Exercice N°2 :**

Afin de prévenir des risques d'incendies, l'installation de détecteurs de fumées est obligatoire dans tous les logements depuis janvier 2016. Il existe différents types de détecteurs comme les détecteurs optiques ou les détecteurs ioniques.

Dans cet exercice, on étudiera ces deux types de détecteurs de fumées, puis on s'intéressera au choix de l'emplacement du détecteur dans le cadre de la protection des personnes.

**1. Détecteur optique de fumées**

Le principe de fonctionnement de ce détecteur de fumées (figure 1) repose sur le fait qu'une diode électroluminescente (ou DEL) produit en continu un rayonnement. Lorsqu'il rencontre des particules de fumées, le rayonnement est dévié dans toutes les directions. Un récepteur photosensible détecte alors le rayonnement et génère un courant électrique qui déclenche une alarme sonore avertissant les usagers de la présence de fumées.

La longueur d'onde du rayonnement émis par la DEL dépend du matériau utilisé pour sa fabrication. Pour produire un rayonnement infrarouge, on peut utiliser de l'arséniure de gallium (GaAs). Dans ce cas, l'énergie des photons émis est de l'ordre de 1,4 eV.

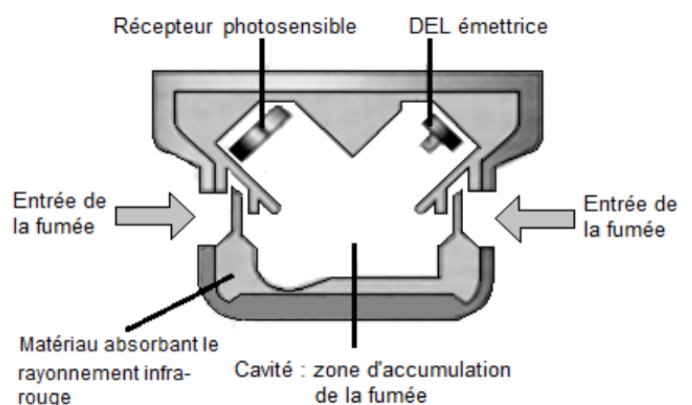


Figure 1. Schéma de principe d'un détecteur optique de fumées

### Données :

- 1 électronvolt (eV) =  $1,6 \times 10^{-19}$  J ;
- constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s ;
- la valeur de la célérité de la lumière dans le vide est supposée connue du candidat.

1.1. Le récepteur photosensible ne détecte que les rayonnements appartenant au domaine de l'infrarouge. Vérifier que le rayonnement lumineux émis par la DEL utilisée dans le détecteur optique de fumées appartient bien à ce domaine.

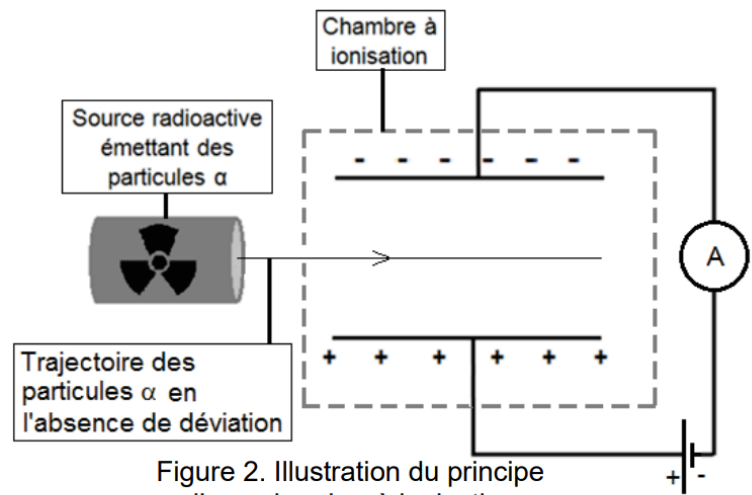
1.2. On admet que les particules solides présentes dans la fumée ont une taille comprise 0,1  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ . Quel phénomène physique peut contribuer à la déviation du faisceau lumineux si des fumées sont présentes ? Justifier.

1.3. En présence de fumées, le rayonnement émis par la DEL est dévié dans toutes les directions. Expliquer brièvement pourquoi l'alarme ne se déclenche qu'en présence de fumées.

## 2. Détecteur ionique de fumées

Le principe de ce détecteur de fumées repose sur l'ionisation de l'air par des particules  $\alpha$ . En l'absence de fumées, ces particules arrachent des électrons aux molécules de dioxygène et de diazote présentes dans la chambre à ionisation. Pour le dioxygène, l'ionisation nécessite un apport d'énergie de 12 eV par molécule.

Les ions et les électrons formés par l'ionisation de l'air sont soumis à un champ électrique uniforme entre deux plaques. Un courant électrique de faible intensité apparaît alors dans le circuit électrique (figure 2).



Lorsque la fumée pénètre dans la chambre à ionisation, une partie des électrons et des ions issus de l'ionisation se fixe aux poussières de fumées. La baisse de l'intensité du courant électrique qui en résulte déclenche un avertisseur sonore.

D'après « La physique par les objets quotidiens », C. Ray et J-C Poizat, éditions Belin

### Données :

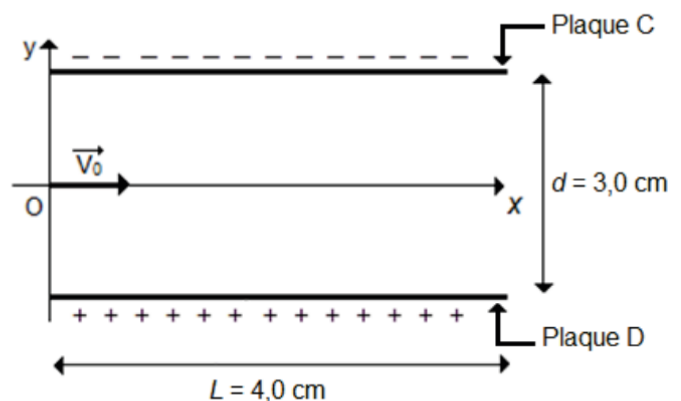
- 1 électronvolt (eV) =  $1,6 \times 10^{-19}$  J ;
- charge élémentaire :  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  C ;
- pour un condensateur plan, le champ électrostatique  $E$  est reliée à la tension  $U$  et à la distance  $d$  qui sépare les plaques par la relation :  $E = \frac{U}{d}$  ;
- charge de la particule  $\alpha$  :  $q_\alpha = +2e$  ;
- masse d'une particule  $\alpha$  :  $m_\alpha = 6,64 \times 10^{-27}$  kg ;
- intensité du champ de pesanteur terrestre :  $g = 9,81$  m.s<sup>-2</sup>.

On s'intéresse au mouvement d'une particule  $\alpha$  arrivant dans la chambre à ionisation en l'absence de fumée. Cette particule arrive en un point O avec un vecteur vitesse initiale  $\vec{V}_0$  parallèle aux plaques C et D du condensateur plan (voir figure 3).

Une tension constante  $U = 9,0$  V est appliquée entre les deux plaques C et D. La valeur de la vitesse initiale  $v_0$  est égale à  $1,6 \times 10^7$  m.s<sup>-1</sup>.

On étudie le mouvement de la particule  $\alpha$  dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

À l'instant  $t = 0$ , la particule  $\alpha$  est au point O.



Lors de cette étude, on négligera les éventuelles collisions avec les molécules de l'air ainsi que la valeur du poids de la particule  $\alpha$  devant la valeur de la force électrostatique  $\vec{F}_e$  subie par cette particule.

2.1. Vérifier quantitativement que l'hypothèse concernant le poids de la particule  $\alpha$  est justifiée.

2.2. Reproduire sur la copie le schéma de la figure 3 puis y représenter le champ électrostatique  $\vec{E}$  et la force électrostatique  $\vec{F}_e$  que subit la particule  $\alpha$  au point O. Justifier.

2.3. Établir que les équations horaires du mouvement de la particule  $\alpha$  sont :

$$\begin{cases} x(t) = v_0.t \\ y(t) = \left(\frac{e.U}{m_\alpha.d}\right).t^2 \end{cases}$$

2.4. Déterminer la valeur de la coordonnée  $y_L$  de la particule lorsqu'elle a parcouru une distance suivant l'axe Ox égale à  $L = 4,0$  cm. Expliquer pourquoi le mouvement de cette particule peut être considéré comme rectiligne dans la chambre d'ionisation.

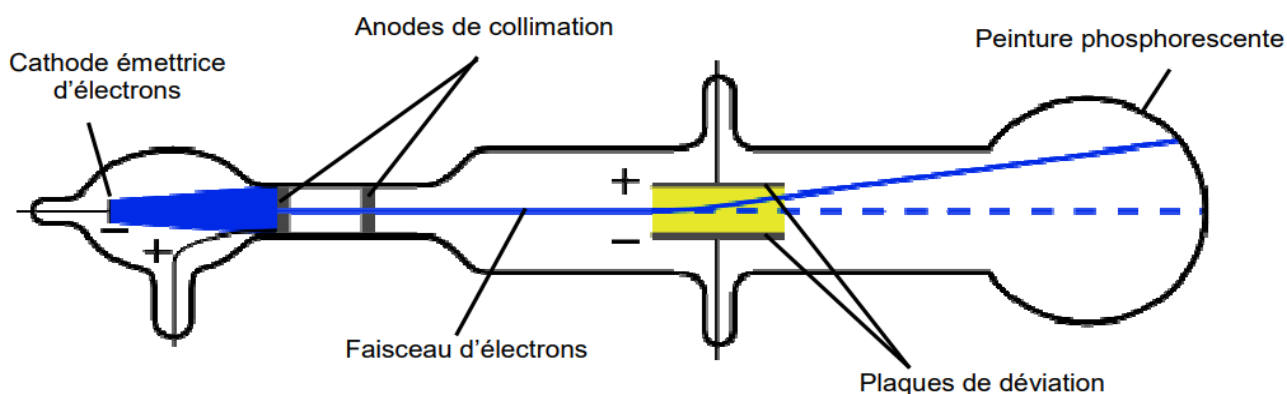
2.5. Montrer que l'énergie cinétique initiale des particules  $\alpha$  est suffisante pour ioniser des molécules de dioxygène.

### Exercice N°3 : DÉTERMINATION DU RAPPORT $e / m$ POUR L'ÉLECTRON

#### Document 1 : La deuxième expérience de Thomson

Le physicien anglais Joseph John Thomson utilisa un tube à vide, dans lequel une cathode émet des électrons. Ceux-ci sont accélérés dans un champ électrostatique créé par des anodes de collimation. À la sortie de ces anodes, les électrons forment un faisceau très étroit. Ce faisceau passe ensuite entre deux plaques métalliques de charges opposées. Les électrons, soumis à un nouveau champ électrostatique, sont alors déviés de leur trajectoire et viennent frapper un écran constitué d'une couche de peinture phosphorescente.

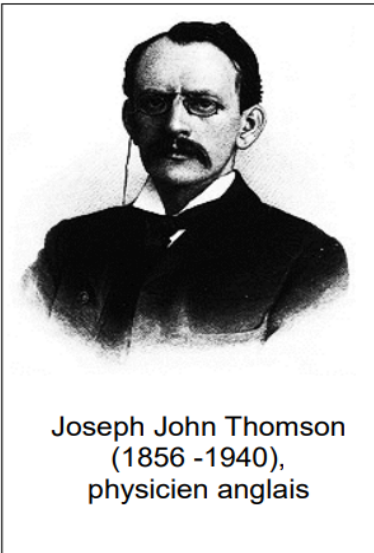
#### *Tube utilisé par Thomson pour montrer la déviation de particules chargées par un champ électrostatique :*



#### Document 2 : Création d'un champ électrostatique

Deux plaques métalliques horizontales portant des charges opposées possèdent entre elles un champ électrostatique uniforme  $\vec{E}$  caractérisé par :

- sa direction : perpendiculaire aux plaques
- son sens : de la plaque chargée positivement vers la plaque chargée négativement.



**Document 3 : Force électrostatique subie par une particule chargée dans champ électrique  $\vec{E}$**

Force subie par la particule chargée  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$

Chargé de la particule

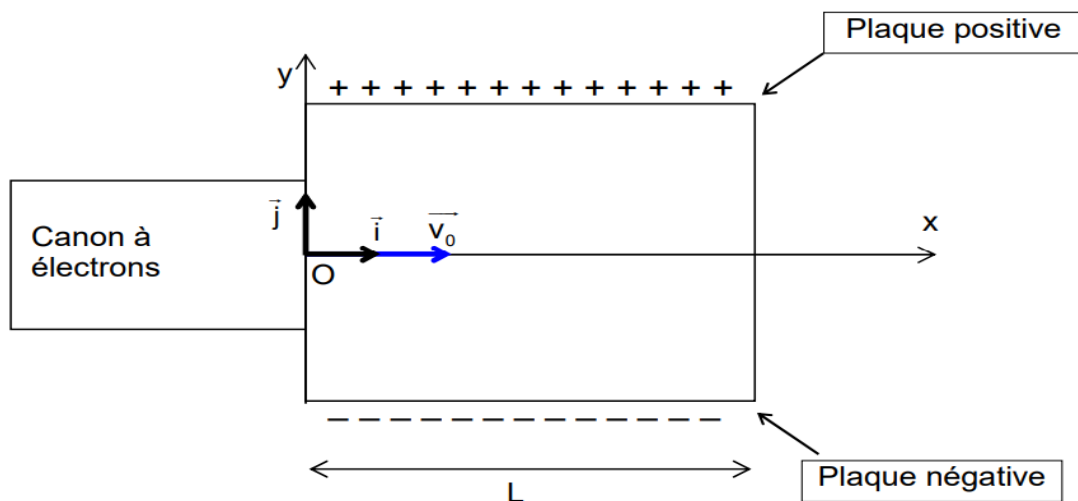
Champ électrostatique

Pour un électron :  $q = -e$  ;  $e$  étant la charge élémentaire.

**Document 4 : Interactions entre particules chargées**  
Deux particules de charges de même signe se repoussent ; deux particules de charges opposées s'attirent.

**Document 5 : Expérience de laboratoire ; détermination du rapport  $e/m$  pour l'électron**

Le montage ci-dessous reprend le principe de la deuxième expérience de Thomson. Il comporte un tube à vide dans lequel un faisceau d'électrons est dévié entre deux plaques de charges opposées. On mesure la déviation verticale du faisceau d'électrons lors de la traversée des plaques sur une longueur  $L$ , afin de déterminer la valeur du rapport  $e/m$ .



**Données de l'expérience :**

Les électrons sortent du canon à électrons avec une vitesse  $v_0 = 2,27 \times 10^7 \text{ m.s}^{-1}$ .  
Le faisceau d'électrons passe entre les deux plaques chargées et est dévié d'une hauteur  $h$  quand il sort des plaques.  
L'intensité du champ électrostatique entre les deux plaques est :  $E = 15,0 \text{ kV.m}^{-1}$ .  
La longueur des plaques est :  $L = 8,50 \text{ cm}$ .

On fait l'hypothèse que le poids des électrons est négligeable par rapport à la force électrostatique  $\vec{F}$ .

**1. Détermination du caractère négatif de la charge de l'électron par J.J. Thomson.**

- 1.1. À l'aide du **document 2**, représenter sur **L'ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE** le vecteur correspondant au champ électrostatique  $\vec{E}$ .  
On prendra l'échelle suivante : 1,0 cm pour  $5,0 \text{ kV.m}^{-1}$ .
- 1.2. *J.J. Thomson a observé une déviation du faisceau d'électrons vers la plaque métallique chargée positivement (voir document 1).*  
Expliquer comment J.J. Thomson en a déduit que les électrons sont chargés négativement.

1.3. À l'aide du **document 3**, donner la relation entre la force électrostatique  $\vec{F}$  subie par un électron, la charge élémentaire  $e$  et le champ électrostatique  $\vec{E}$ . Montrer que le sens de déviation du faisceau d'électrons est cohérent avec le sens de  $\vec{F}$ .

**2. Détermination du rapport  $e/m$  pour l'électron.**

2.1. En appliquant la deuxième loi de Newton à l'électron, montrer que les relations donnant les coordonnées de son vecteur accélération sont :

$$a_x = 0 \quad \text{et} \quad a_y = \frac{eE}{m}$$

2.2. On montre que la courbe décrite par les électrons entre les plaques admet pour équation :

$$y = \frac{eE}{2mv_0^2} x^2$$

À la sortie des plaques, en  $x = L$ , la déviation verticale du faisceau d'électrons par rapport à l'axe ( $Ox$ ) a une valeur  $h = 1,85 \text{ cm}$ .

2.2.1. En déduire l'expression du rapport  $\frac{e}{m}$  en fonction de  $E$ ,  $L$ ,  $h$  et  $v_0$ .

2.2.2. Donner la valeur du rapport  $\frac{e}{m}$ .

2.2.3. On donne ci-dessous les valeurs des grandeurs utilisées, avec les incertitudes associées :

$$v_0 = (2,27 \pm 0,02) \times 10^7 \text{ m.s}^{-1};$$

$$E = (15,0 \pm 0,1) \text{ kV.m}^{-1};$$

$$L = (8,50 \pm 0,05) \text{ cm};$$

$$h = (1,85 \pm 0,05) \text{ cm};$$

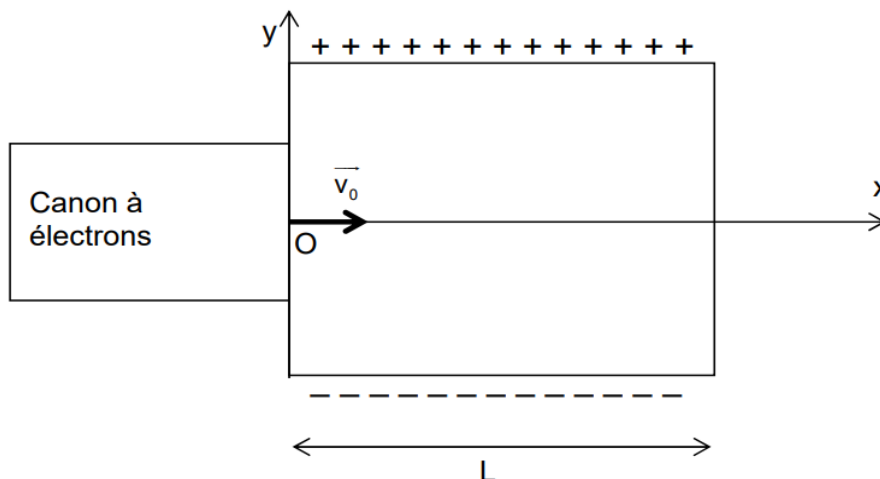
L'incertitude du rapport  $\frac{e}{m}$ , notée  $U\left(\frac{e}{m}\right)$ , s'exprime par la formule suivante :

$$U\left(\frac{e}{m}\right) = \frac{e}{m} \sqrt{\left[\left(\frac{U(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{U(E)}{E}\right)^2 + 4\left(\frac{U(v_0)}{v_0}\right)^2 + 4\left(\frac{U(L)}{L}\right)^2\right]}$$

Calculer l'incertitude  $U\left(\frac{e}{m}\right)$ , puis exprimer le résultat de  $\left(\frac{e}{m}\right)$  avec cette incertitude.

**ANNEXE**

L'intensité du champ électrique entre les deux plaques est  $E = 15,0 \text{ kV.m}^{-1}$ .





## Exercice N°4 : LES ACCÉLÉRATEURS MONTENT EN PUISSANCE

Pour percer les secrets de la matière à l'échelle subatomique, les physiciens construisent depuis plus de cinquante ans, des collisionneurs de particules de plus en plus puissants. Le dernier né de cette famille est le Grand Collisionneur de Hadrons\* : le LHC pour « Large Hadrons Collider » construit par le laboratoire européen de physique des particules, le CERN, situé près de Genève. C'est le plus puissant accélérateur de particules construit à ce jour. L'énergie acquise par un proton est supérieure à  $10^{12}$  eV.

\* Hadrons : Les hadrons (du grec « adros », qui signifie « épais ») sont des particules composées de quarks. Les protons et les neutrons, qui constituent les noyaux des atomes, appartiennent à cette famille.

### Accélérateurs de particules

Le gros avantage des accélérateurs est de pouvoir fournir des faisceaux de particules dont la nature est connue et l'énergie variable, dans la limite des performances du dispositif. Avec de tels outils, les chercheurs peuvent entreprendre des campagnes de mesures systématiques grâce à des expériences dont on changera à loisir les conditions de fonctionnement.

Alors qu'est-ce qu'un accélérateur ? C'est un dispositif construit pour augmenter la vitesse mais surtout l'énergie des particules. Pour augmenter l'énergie des particules, il existe une seule solution, il faut les soumettre à un champ électrique le plus intense possible. Seules les particules chargées et stables pourront être accélérées. En pratique, les premiers accélérateurs s'appliquèrent tant aux protons qu'aux électrons.

*D'après « Le vrai roman des particules élémentaires »  
de François Vannucci professeur à l'université Paris 7-Denis Diderot*

#### Données :

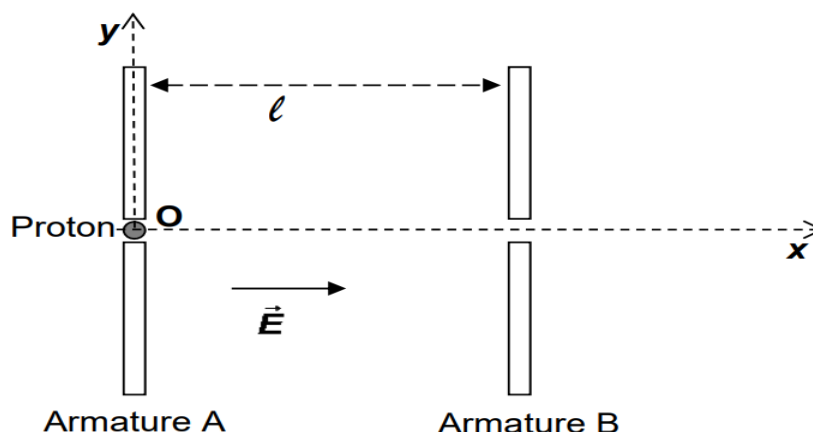
- Masse d'un proton :  $m_p = 1,7 \times 10^{-27}$  kg
- Charge élémentaire :  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  C
- $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$  J

### 1. Étude simplifiée d'un accélérateur de protons

Un proton de charge  $e$  et de masse  $m_p$  pénètre dans un accélérateur linéaire de particules. À  $t = 0$  s, le proton est situé en O et possède une vitesse initiale de valeur  $v_0 = 2,0 \times 10^3 \text{ m.s}^{-1}$  et de direction Ox (voir schéma ci-après).

Entre les armatures A et B, séparées d'une distance  $\ell = 6,5 \text{ cm}$ , règne un champ électrostatique uniforme de valeur  $E = 10,0 \text{ kV.m}^{-1}$ .

On négligera le poids devant la force électrique.



1.1. Représenter, sans souci d'échelle, la force électrique  $\vec{F}$  appliquée au proton ainsi que le vecteur accélération  $\vec{a}$  de celui-ci sur le document de l'**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**. Justifier.

1.2. Vitesse et énergie du proton

1.2.1. Après avoir établi l'expression du vecteur accélération dans le repère  $(O,x,y)$  :

a) montrer que l'équation horaire  $v_x(t)$  s'écrit de la forme :

$$v_x(t) = \frac{eE}{m_p}t + v_0 ;$$

b) déterminer l'équation horaire  $v_y(t)$  et justifier le nom d' « accélérateur linéaire » attribué à cet accélérateur.

1.2.2. Le proton atteint l'armature B à la date  $t_1 = 3,7 \times 10^{-7}$ s.  
Quelle est alors sa vitesse  $v_1$  ?

1.2.3. Déterminer l'équation du second degré qui permet d'obtenir la valeur de  $t_1$ . Vérifier que cette équation est cohérente avec la valeur de  $t_1$  donnée dans la question précédente.

1.2.4. Calculer l'augmentation d'énergie cinétique de ce proton entre les armatures A et B. Comparer avec l'énergie attendue dans le LHC.  
Comment peut-on atteindre la valeur attendue ?

1.3. On s'interroge sur le fonctionnement de ce dispositif avec d'autres particules.

1.3.1. Ce dispositif peut-il fonctionner avec un neutron ? Justifier votre réponse.

1.3.2. Que faudra-t-il modifier si l'on souhaite accélérer un électron ?