

Chapitre 4 : Mouvement de particules chargées

Prérequis

► chapitres de mécanique **M1 M2 M3**

Mots-clés

force de Lorentz, champ électrique, champ magnétique, électronvolt



PLAN DU COURS

A

Force de Lorentz

- A.1** Expression de la force de Lorentz
- A.2** Effet du champ électrique
- A.3** Effet du champ magnétique

B

Cas d'un champ électrostatique uniforme

- B.1** Étude du mouvement
- B.2** Potentiel électrostatique
- B.3** Aspects énergétiques

C

Cas d'un champ magnétostatique uniforme

- C.1** Nature circulaire du mouvement
- C.2** Expression du rayon de la trajectoire



LES SAVOIRS ET LES SAVOIR-FAIRE

A Force de Lorentz



CAPACITÉS EXIGIBLES

- Évaluer les ordres de grandeur des forces électrique ou magnétique et les comparer à ceux des forces gravitationnelles.
- Justifier qu'un champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule alors qu'un champ magnétique peut courber la trajectoire sans fournir d'énergie à la particule.

A.1 Expression de la force de Lorentz

1. Donner l'expression de la force de Lorentz agissant sur une particule de charge q plongée dans un champ électrique \vec{E} et un champ magnétique \vec{B} .
2. Comparer à l'effet d'un champ gravitationnel en ordre de grandeur (exemple d'un électron). Justifier alors que l'on puisse négliger l'influence du poids sur le mouvement d'une particule chargée.

A.2 Effet du champ électrique

3. Décrire l'influence d'un champ électrique sur le mouvement d'une particule chargée.
4. Justifier que la force électrique peut fournir de l'énergie à la particule.

A.3 Effet du champ magnétique

5. Décrire l'influence d'un champ magnétique sur le mouvement d'une particule chargée.
6. Justifier que la force magnétique ne peut pas fournir d'énergie à la particule.

B Cas d'un champ électrostatique uniforme



CAPACITÉS EXIGIBLES

- Mettre en équation le mouvement et le caractériser comme un mouvement à vecteur accélération constant.
- Effectuer un bilan énergétique pour déterminer la valeur de la vitesse d'une particule chargée accélérée par une différence de potentiels.

B.1 Étude du mouvement

7. Dans le cas d'une charge ponctuelle non-relativiste plongée dans un champ électrostatique uniforme (angle α entre le vecteur vitesse initial et le champ électrique), établir les équations horaires du mouvement et l'équation de la trajectoire. Tracer l'allure de la trajectoire dans le cas d'une charge positive ou négative.

B.2 Potentiel électrostatique

8. Donner le lien entre le champ électrique $\vec{E}(M)$ et le potentiel électrostatique $V(M)$. Le champ électrique est-il orienté vers les potentiels croissants ou décroissants ?
9. Pour une tension U appliquée entre deux plaques métalliques et permettant de générer un champ électrostatique uniforme \vec{E} entre les plaques, montrer que $\|\vec{E}\| = \frac{|U|}{d}$ où d est la distance séparant les plaques.

B.3 Aspects énergétiques

10. Établir le lien entre l'énergie potentielle E_p de la force électrique $\vec{F} = q\vec{E}$ et le potentiel électrostatique V .
11. Une particule chargée positivement ou négativement est-elle attirée vers les potentiels croissants ou décroissants? Expliquer.
12. Établir le lien entre la variation d'énergie cinétique et la tension U générant le champ électrique \vec{E} .
13. Donner la définition de l'électronvolt.

C Cas d'un champ magnétostatique uniforme

On se limite au cas d'une vitesse initiale orthogonale au champ magnétique.



CAPACITÉS EXIGIBLES

- Déterminer le rayon de la trajectoire et le sens de parcours.

C.1 Nature circulaire du mouvement

14. Quelles hypothèses sont nécessaires afin que le mouvement soit circulaire? (démonstration non-exigible)
15. À l'aide de schémas, expliquer le lien entre le signe de la charge, le sens du champ magnétique et le sens de parcours de la trajectoire.

C.2 Expression du rayon de la trajectoire

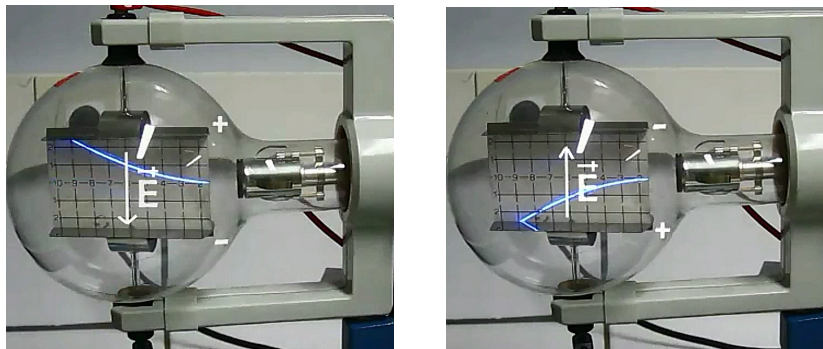
16. Déterminer l'expression du rayon de la trajectoire en fonction de la vitesse initiale, de la norme du champ magnétique, de la masse et de la charge.



DOCUMENTS DE COURS

Document 1 Action d'un champ électrique sur un faisceau d'électron

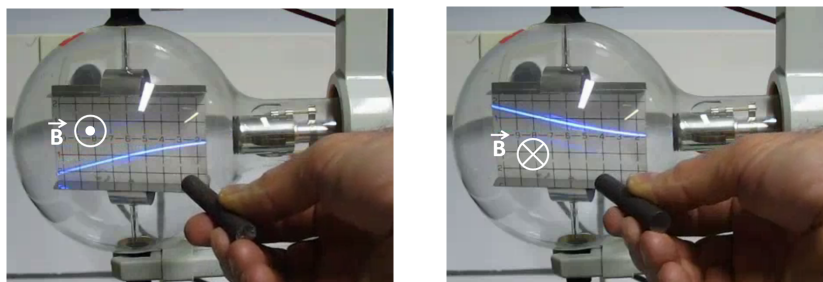
Un champ électrique est généré à l'aide d'une tension de plusieurs milliers de volts appliquée entre deux électrodes. On observe une déviation du faisceau d'électron d'autant plus importante que la tension est forte.



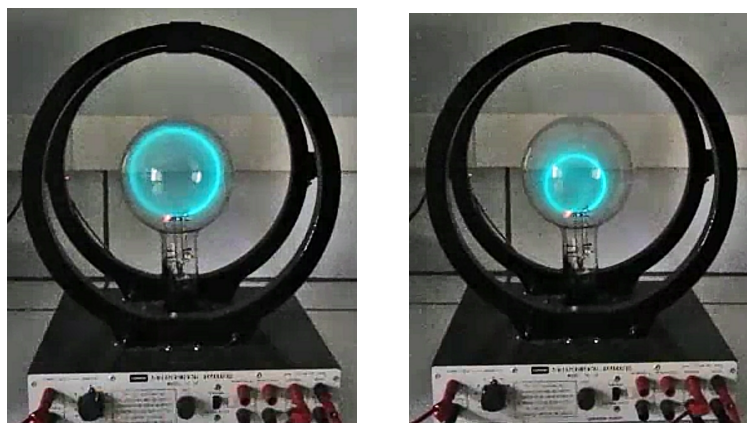
Le faisceau d'électrons est lui-même généré par une tension électrique appliquée entre les deux électrodes du canon à électrons à droite du dispositif.

Document 2 Action d'un champ magnétique sur un faisceau d'électron

Un champ magnétique (produit par un aimant par exemple) dévie le faisceau d'électron. Il n'y a pas de champ électrique ici (hormis celui du canon à électrons produisant le faisceau).



Dans l'expérience ci-dessous, on utilise également un canon à électrons, lequel est désormais produit par deux bobines se faisant face (dispositif des bobines de Helmholtz). On peut modifier l'intensité du champ magnétique en modifiant l'intensité électrique circulant dans les bobines. Le champ magnétique est quasi-uniforme entre les deux bobines et il est dirigé suivant l'axe commun des deux bobines noires (orthogonal au plan de la feuille ici).



On constate que le mouvement est circulaire.

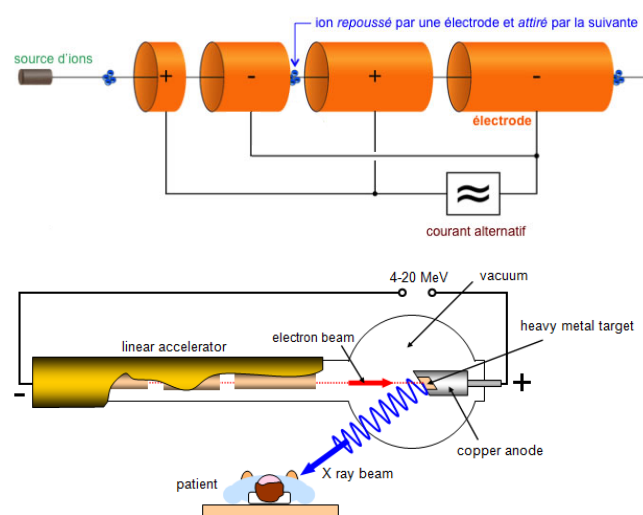
À droite, l'intensité est plus forte, et le rayon de la trajectoire est plus petit.

Document 3 Quelques applications

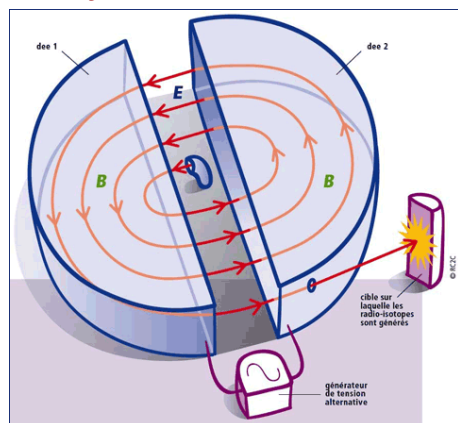
► L'accélérateur linéaire (LINAC)

Le **LINAC** permet de communiquer un mouvement rectiligne accéléré aux particules chargées (des électrons, des ions, ...).

Exemple d'application : production de rayons X lors d'un bombardement d'électrons sur du cuivre. Les rayons X produits sont ainsi employés en radiographie médicale.



► Le cyclotron

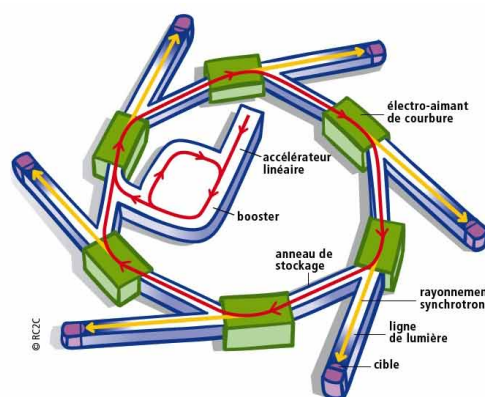


Le **cyclotron** (dont le principe de fonctionnement sera étudié en exercice) est utilisé notamment en médecine pour produire du fluor 18 : pour cela, de l'eau enrichie en oxygène 18 est « bombardée » par le faisceau de protons émis par le cyclotron.

Le fluor 18 est un isotope radioactif du fluor utile à la tomographie par émission de positon, méthode d'imagerie médicale de type scintigraphique consistant à injecter un traceur radioactif. En l'occurrence, le fluor 18 produit par le cyclotron peut remplacer un groupe hydroxyle dans la molécule de glucose pour former du fluorodésoxyglucose, lequel est ensuite injecté au patient.

► Le synchrotron

Sommairement, le **synchrotron** présente une forme d'anneau. Les particules sont injectées dans l'anneau à l'aide d'un LINAC, puis des électroaimants de courbure permettent de courber la trajectoire des particules afin de les maintenir dans l'anneau.



Le synchrotron SOLEIL (dans l'Essonne) permet ainsi la production de rayons X lorsqu'une partie du faisceau est prélevée et décélérée. Les rayons X ainsi produits permettent par la suite d'étudier la structure cristalline de la matière en étudiant la diffraction des rayons X par cette structure.

► Le CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

Le CERN est constitué de plusieurs **synchrotrons** et **LINAC**, permettant ainsi de générer des faisceaux de protons extrêmement énergétiques. Les collisions protons-protons en résultant ont permis la découverte de nouvelles particules, dont notamment le fameux boson de Higgs, qui confère de la masse aux particules matérielles.



EXERCICES

DIFFICULTÉ DE L'EXERCICE (ANALYSE, «TECHNICITÉ», ...)

DURÉE DE L'EXERCICE

COMPÉTENCES TRAVAILLÉES

| | Exercices | | | |
|--|-----------|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Faire le lien entre l'orientation d'une tension accélératrice et le sens de l'accélération | | • | • | |
| Exprimer la vitesse d'une particule obtenue grâce à une tension accélératrice | • | • | | |
| Exploiter le rayon la trajectoire dans un champ magnétostatique uniforme | • | • | | • |
| Déterminer le sens de la trajectoire dans un champ magnétostatique uniforme | | • | | |

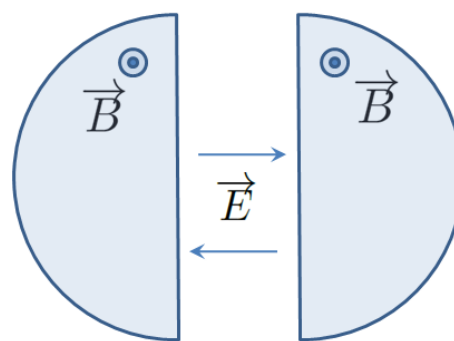
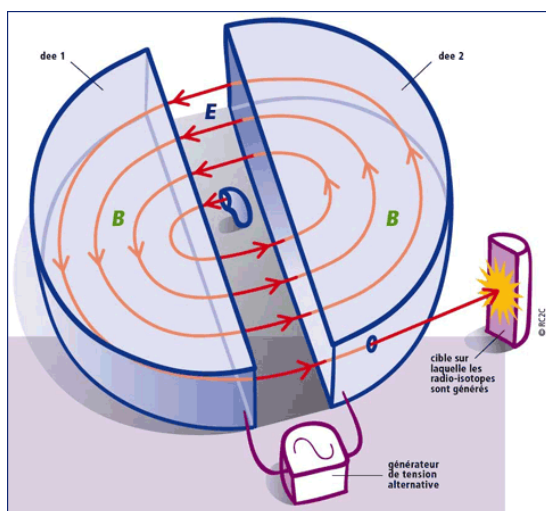
Exercice 1

Cyclotron



Dans un accélérateur de type cyclotron, des particules émises par une source sont d'abord accélérées linéairement par un champ électrique. Puis, la particule rentre dans une zone en forme de dé, où est appliquée un champ magnétique \vec{B} uniforme orthogonal au vecteur vitesse de la particule et où il n'existe aucun champ électrique. La particule adopte alors un mouvement circulaire uniforme (voir cours). Après avoir parcouru un demi-cercle, la particule sort de ce dé et est à nouveau soumise au champ électrique \vec{E} . Entre temps, on aura pris soin d'inverser le sens de \vec{E} afin que la particule ne soit pas décélérée. Puis, la particule rentre dans un deuxième dé, et le même processus recommence. Après chaque accélération grâce au champ \vec{E} , les rayons des arcs de cercle dans les dés augmentent jusqu'à ce que la particule quitte le cyclotron.

On considère que la particule en question est un proton. La valeur du champ magnétique \vec{B} uniforme et constant dans les dés est $B = 1,0 \text{ T}$. L'amplitude de la tension sinusoidale générant le champ électrostatique entre les dés est $U_m = 2,5 \cdot 10^3 \text{ V}$. Le temps de passage entre deux dés étant négligeable devant le temps passé dans un dé, le proton est soumis à une tension accélératrice quasiment constante égale à $\pm U_m$ lors du passage d'un dé à un autre.



Masse du proton : $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
 Charge du proton : $q = e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- Dans un dé et pour une vitesse de norme v , établir l'expression du rayon R de la trajectoire.
- Exprimer le temps τ mis pour parcourir un demi-tour dans un dé en fonction de B , m et e . Ce temps dépend-t-il de la vitesse du proton ? Calculer sa valeur numérique.
- En déduire la fréquence f de la tension à appliquer entre les dés pour que le champ accélère au mieux les protons (on considère que le temps de passage entre les deux dés est négligeable devant les autres temps). Cette fréquence s'appelle la fréquence cyclotron.
- La vitesse d'injection initiale du proton étant quasi-nulle, on désire que sa vitesse atteigne une valeur finale $v_f = 25 \cdot 10^3 \text{ km.s}^{-1}$. Exprimer et calculer le nombre de tours N que doit faire le proton dans le cyclotron ainsi que la durée nécessaire à cette opération.
- Quel est le rayon R_f du dernier arc de cercle parcouru par les protons lorsqu'ils on atteint cette vitesse ?

Exercice 2

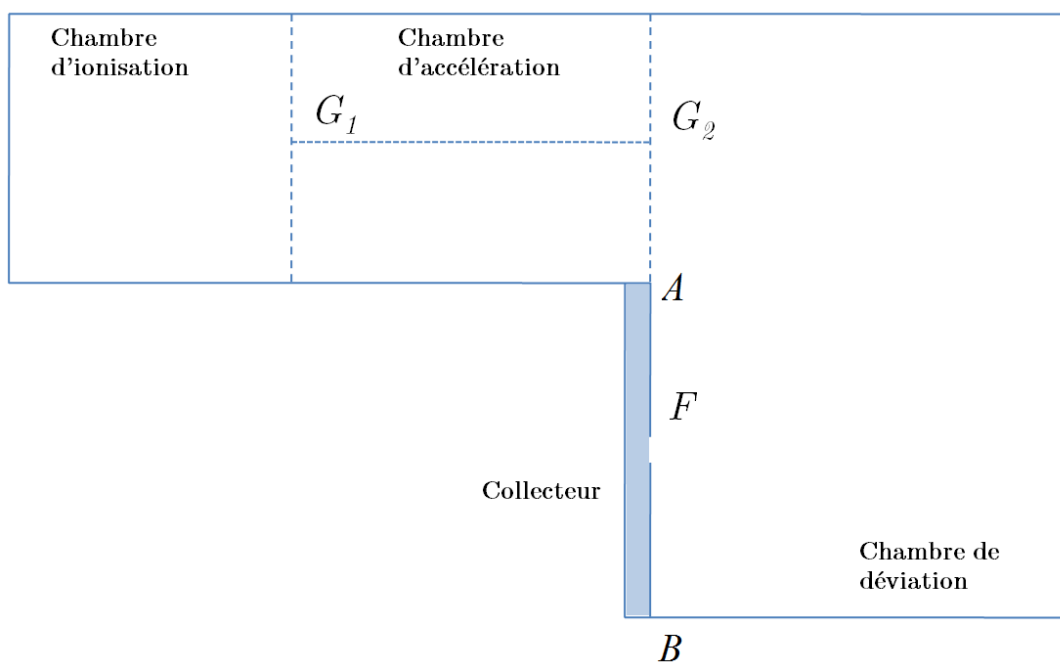
Spectrométrie de masse



Un calutron est un spectromètre de masse constitué de plusieurs parties :

- la chambre d'ionisation dans laquelle des atomes (neutres) portés à haute température sont ionisés (perte d'un ou plusieurs électrons du cortège électronique). On considèrera qu'à la sortie de cette chambre, en G_1 , la vitesse des ions est quasi-nulle ;
- la chambre d'accélération dans laquelle les ions sont accélérés entre G_1 et G_2 sous l'action d'un champ électrique établi grâce à une différence de potentiel appliquée entre les deux grilles G_1 et G_2 ;
- la chambre de déviation dans laquelle les ions sont déviés par un champ magnétique uniforme \vec{B} de direction perpendiculaire au plan de la figure. Un collecteur d'ions est disposé entre A et B .

Les chambres sont sous vide. On négligera le poids des ions devant les autres forces et on considèrera qu'à la sortie de la chambre d'accélération, les vecteurs vitesses des ions sont alignés suivant la direction G_1G_2 .



Données :

charge élémentaire : $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Nombre d'Avogadro : $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Masses molaires respectives de l'uranium 235 et 238 : $235,04 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ et $238,05 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

► Accélération des ions

1. Pour des ions uranium U^+ , que vaut la charge q de l'ion ?
2. On souhaite que le gain d'énergie cinétique acquis par les ions arrivés en G_2 soit de $\Delta E_c = 15,0 \text{ keV}$. Quelle doit être la tension $U = V_{G_1} - V_{G_2}$ à appliquer entre les deux grilles ?
3. Établir la norme de la vitesse v en G_2 en fonction de e , U , de la masse molaire M de l'ion et du nombre d'Avogadro. Effectuer l'application numérique pour les isotopes 235 et 238 de l'ion uranium U^+ .

► Déviation des ions

4. Quel doit être le sens du champ magnétique \vec{B} régnant dans la chambre de déviation pour que les ions chargés positivement puissent atteindre le collecteur ? Justifier et le représenter sur le schéma. Quelle est la nature de la trajectoire dans la chambre de déviation ?

Dans la suite, on prendra un champ magnétique d'intensité 600 mT .

5. À quelle distance $D = G_2F$ arrivera l'ion sur le collecteur ? En déduire l'intérêt de ce dispositif.
6. Calculer D pour les isotopes 235 et 238 de l'ion uranium U^+ .
Si on souhaite pouvoir séparer les deux isotopes, quelle doit être la largeur maximale de la fente ?

Exercice 3

L'expérience de Millikan



En 1908, Robert A. Millikan entreprit l'expérience suivante : on disperse dans une cavité un brouillard de fines gouttelettes sphériques d'huile, de masse volumique $\rho = 919,9 \text{ kg.m}^{-3}$. Chaque gouttelette peut acquérir une charge q par l'effet ionisant d'un échantillon de radium radioactif à proximité. En retombant, certaines de ces gouttelettes peuvent passer à travers une petite ouverture au fond de la cavité : elles entrent alors dans un volume compris entre deux plaques conductrices horizontales distantes de $d = 1,600 \text{ cm}$.

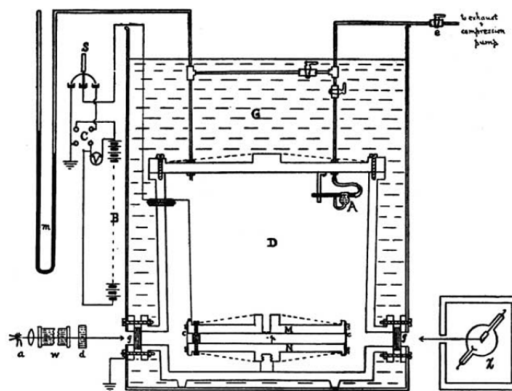
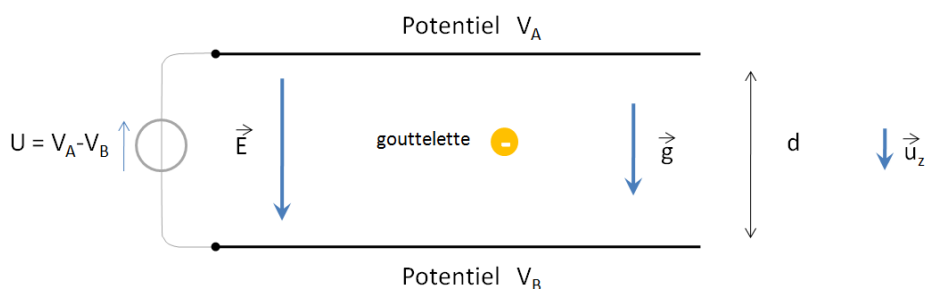


Fig. 1.



Une tension U est appliquée entre les deux plaques permettant de produire un champ électrique \vec{E} uniforme entre celles-ci. Les gouttelettes n'ont pas nécessairement le même rayon R ni la même charge q . En mouvement dans l'air, les gouttelettes subissent une force de frottement visqueux $\vec{f} = -\lambda\vec{v}$, où $\lambda = 6\pi\eta R$ et $\eta = 1,83.10^{-5} \text{ uSI}$ à 23° C . On donne également la masse volumique de l'air ambiant $\rho_a = 1,187 \text{ kg.m}^{-3}$ (à 23° C sous la pression imposée lors de l'expérience).



On applique une différence de potentiel $U = V_A - V_B$ de manière à générer un champ électrique uniforme \vec{E} orienté vers le bas. Les gouttelettes entre les deux plaques peuvent être observées à l'aide d'un microscope (voir photographie ci-dessus).

Dans la suite, on observe une seule et même gouttelette de charge négative que l'on souhaite mesurer. On note $\vec{v}(t) = v(t)\vec{u}_z$ sa vitesse.

- Quel doit être le signe de U ? Justifier.
Déterminer l'expression de \vec{E} en fonction de U et d .
- (a) Montrer que $v(t)$ vérifie l'équation différentielle : $\tau\dot{v} + v = v_\ell$.
Exprimer le temps caractéristique τ en fonction de m et λ . Exprimer également v_ℓ en fonction de λ , q , d , ρ , ρ_a et g .
(b) Résoudre en considérant que $v(t=0) = v_0$.
(c) Donner qualitativement la représentation graphique de $v(t)$ si $v(t=0) = v_0 > 0$ (la goutte tombe initialement) et si $v_\ell < 0$ (vitesse limite négative, la goutte remonte). Faire apparaître τ sur votre graphique.
(d) Les gouttelettes ont un rayon de l'ordre de 10^{-6} m . Justifier que la vitesse limite v_ℓ est rapidement atteinte.
- Cas sans champ électrique : $U = 0$**
On mesure $v_\ell = v_1 > 0$ (la goutte chute).
En déduire l'expression du rayon R de la gouttelette en fonction de η , v_1 , ρ , ρ_a et g .
- Cas avec champ électrique : $U \neq 0$**
On mesure $v_\ell = -v_2 < 0$ (la goutte remonte).
(a) En déduire l'expression de q en fonction de U , d , η , v_1 , v_2 , ρ , ρ_a et g .

