

TD 16 | M4- Particules chargées dans \vec{E} et \vec{B}

	I	II	III	IV
Réaliser une approximation			✓	
Analyser la cinématique		✓		
Gerer des calculs			✓	
Faire preuve de sens physique	✓	✓		
Analyser un schéma	✓	✓	✓	
Etudier un équilibre			✓	
Choisir un théorème énergétique		✓		

I Ordres de grandeurs (*)

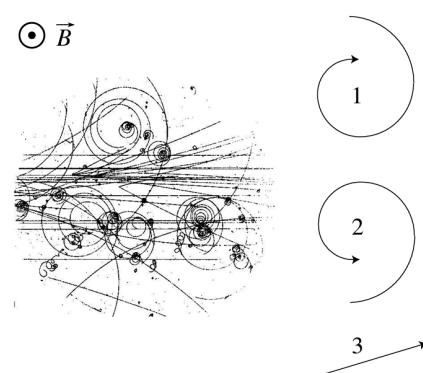
1. Calculer la norme de la force électrique exercée sur un électron dans un condensateur plan de $d = 5 \text{ cm}$ d'épaisseur soumis à une tension de $U = 5 \text{ V}$
2. Calculer ensuite la norme de la force magnétique exercée par le champ magnétique terrestre (de l'ordre de $B = 4 \times 10^{-5} \text{ T}$) s'il est animé d'une vitesse v perpendiculaire à ce dernier, d'environ un millième de la vitesse de la lumière dans le vide.
3. Comparer ensuite ces résultats au poids de l'électron

II Mouvement de particules chargées dans une chambre à bulles (*)

Pour visualiser les trajectoires des particules chargées, les premiers détecteurs étaient des chambres à bulles dans lesquelles les particules (électrons, protons, neutrons...) déclenchaient la formation de bulles dans un liquide et marquaient ainsi leur passage par une traînée de bulles.

La figure ci-contre représente un cliché typique des traces observées lors d'une collision à haute énergie de particules au CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire). Sur le côté droit, on a schématisé les trois types de trajectoires observées avec leur sens de parcours.

Dans ces chambres à bulles, il règne un champ magnétique uniforme et constant \vec{B} . Par ailleurs, le passage dans le liquide conduit à une lente décélération des particules.



1. Déterminer le signe de la charge pour les trois types de trajectoires observées.
2. Expliquer qualitativement pourquoi les trajectoires observées ne sont pas circulaires mais s'enroulent en spirales dont le rayon diminue.

III Mouvement d'un proton dans un cyclotron (**)

Un cyclotron est constitué de deux demi-cylindres horizontaux de rayon R , très légèrement écartés et creux, les Dees, au sein desquels règne un champ magnétique \vec{B} uniforme et constant d'intensité $B = 1,67 \text{ T}$. À l'intérieur des Dees, il règne un vide poussé. Entre ces deux Dees une tension haute fréquence de valeur maximale $U = 100 \text{ kV}$ crée un champ \vec{E} perpendiculaire aux faces en regard des Dees.

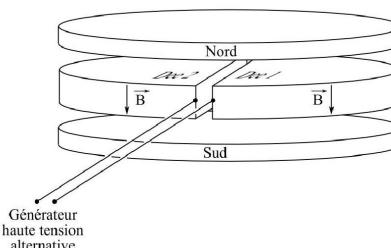


FIGURE 1 – Schéma de principe d'un cyclotron

Des protons de masse $m_P = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ et de charge $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$, animés d'une vitesse horizontale négligeable, sont injectés au point A_0 (voir annexe) de l'espace séparant les deux Dees. On rappelle l'expression de la force de Lorentz \vec{F}_L que subit une particule de charge q , animée d'une vitesse \vec{v} lorsqu'elle est placée dans une zone où règne un champ électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) : $\vec{F}_L = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$.

Dans tout le problème, la force de Lorentz sera la seule force prise en compte.

III.1 Etude du mouvement dans les Dees

On étudie le mouvement d'un proton qui pénètre pour la première fois dans le Dee 1 en A avec la vitesse \vec{v}_1 , de norme V_1 .

1. Montrer que le mouvement du proton dans un Dee est uniforme.
2. Reproduire le schéma de gauche (figure 1) de l'annexe et y représenter les vecteurs champ magnétique dans chacun des Dees, les vecteurs vitesse et force de Lorentz aux points M_1 et M_2 .
3. Établir le système d'équations différentielles du mouvement en coordonnées cartésiennes. Faire apparaître la pulsation cyclotron $\omega_c = \frac{eB}{m}$ et montrer que cette grandeur est bien homogène à une pulsation.
4. On admet que la trajectoire du proton dans le Dee 1 est un cercle de centre O . Montrer que le rayon de ce cercle a pour expression $R_1 = \frac{V_1}{\omega_c}$.

On admet que ce résultat se généralise et que la trajectoire lors de la n -ième traversée d'un Dee sera circulaire uniforme de rayon $R_n = \frac{V_n}{\omega_c}$.

5. Exprimer, en fonction de R_n la distance parcourue dans un Dee lors du n -ième demi-tour.
6. Montrer que la durée Δt de parcours de la trajectoire dans un Dee est indépendante de la vitesse du proton et donner son expression en fonction de m , e et B .

III.2 Étude du mouvement entre les Dees

Entre les Dees, qui sont très faiblement écartés, le proton décrit une trajectoire rectiligne et est accéléré.

7. Préciser la direction et le sens que doit avoir le champ électrique \vec{E} entre les Dees quand le proton décrit A_0A , puis BC . Dans chaque cas, quel doit être le signe de la tension u (définie dans le schéma de l'annexe) pour que les protons soient toujours accélérés quand ils passent entre les Dees ?
8. Le schéma 2 de l'annexe fournit le graphe de la tension $u(t)$. Reproduire puis faire apparaître sur ce graphe : la zone où le proton passe de A_0 à A , puis lorsqu'il passe de B à C , ainsi que la durée Δt de parcours de la trajectoire dans chacun des Dees.
9. Donner la relation entre la période T de la tension $u(t)$ et la durée Δt ; en déduire l'expression de la fréquence f de $u(t)$ en fonction de m , e et B .
10. En supposant que le proton franchi l'espace entre les Dees lorsque la tension est extrémale (et supposée constante pendant le franchissement) avec une vitesse initiale de norme V_i , établir l'expression de V_{i+1} une fois l'espace franchi.
11. Donner l'expression littérale du temps t_E pour que le proton atteigne une énergie cinétique E puis faire l'application numérique pour $E = 1 \times 10^{-12} \text{ J}$. Quelle est le nombre de tour effectué et la vitesse finale associée ?
12. Pour un cyclotron de rayon $R = 0,1 \text{ m}$, quelle vitesse maximale peut-on obtenir ?

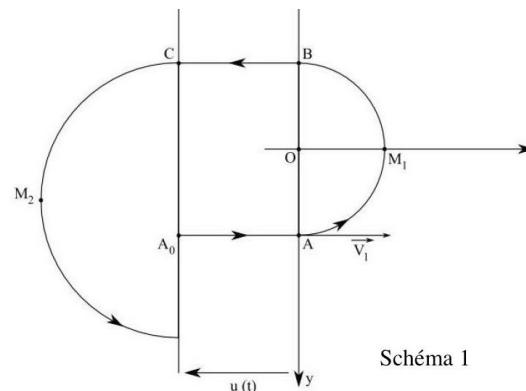


Schéma 1

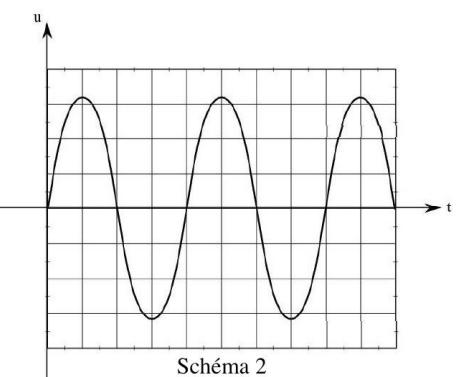


Schéma 2

Éléments de réponses :

$$\text{E3 Q6 : } \Delta t = \frac{\pi m}{eB}$$

$$\text{E3 Q10 : } V_{i+1} = \sqrt{V_i^2 + \frac{2e}{m}U}$$