

FICHE DE LEÇON

Classe(s): Terminale D

THEME: ÉLECTROMAGNÉTISME

TITRE DE LEÇON : MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME

Durée : (6 h)

HABILETÉS	CONTENU
Définir	la force de Lorentz.
Connaître	- l'expression de la force de Lorentz. - les règles d'orientation de la force de Lorentz.
Représenter	la force de Lorentz $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$.
Déterminer	les caractéristiques de la force de Lorentz.
Déterminer	la nature du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme (cas particulier où $\vec{B} \perp \vec{v}$).
Connaître	l'expression du rayon de la trajectoire d'une particule chargée en mouvement dans un champ magnétique. uniforme. $R = \frac{mv}{ q B}$.
Utiliser	la relation $R = \frac{mv}{ q B}$.
Déterminer	la déflexion magnétique.
Analyser	le mouvement d'une particule chargée dans : - un spectromètre de masse ; - un cyclotron ; - un filtre de Wien ou filtre de vitesses.

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Des élèves en classe de Terminale D d'un Lycée de Yopougon ont assisté à un documentaire diffusé par la chaîne de télévision RTI2. Ce documentaire explique la déviation d'un faisceau d'électrons dans un champ magnétique et l'intérêt de ce type de déviation dans les tubes récepteurs de télévision.

Soucieux d'approfondir les explications données dans le documentaire, ces élèves et leurs camarades de classe font des recherches pour définir la force de Lorentz, déterminer ses caractéristiques et analyser le mouvement d'une particule chargée dans un spectromètre de masse, dans un cyclotron et dans un filtre de vitesses.

<u>Matériel par poste de travail</u> - Tube à déflexion (Jeulin) ou tubes de Crookes - Alimentation stabilisée - Voltmètre - Ampèremètre - Aiguille aimantée - Bobines de Helmholtz	<u>Supports didactiques</u> ▪ Livre de Physique AREX Terminale C et D.. - Planche de schéma
	<u>Bibliographie</u> ▪ Livre de Physique AREX Terminale C et D. ▪ Guide et programmes Terminale C et D.

Plan de la leçon

1 – LA FORCE DE LORENTZ :

1.1 – Définition

1.2 – Les caractéristiques de la force :

2 – ETUDE EXPERIMENTALE :

2.1 – Dispositif expérimental

2.2 – Observations et interprétations :

3 – ETUDE THEORIQUE

3.1- Etude dynamique

3.2 - Trajectoire plane

3.3 – Mouvement circulaire et uniforme

4 – APPLICATIONS :

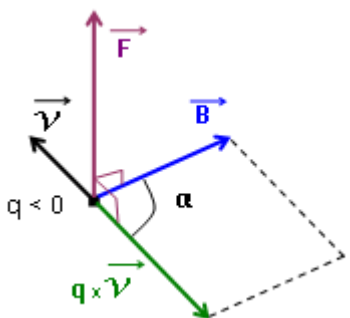
4.1 Déflexion magnétique

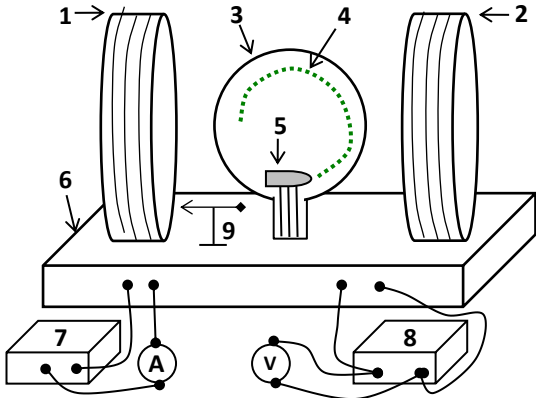
4.2 Le spectromètre de masse

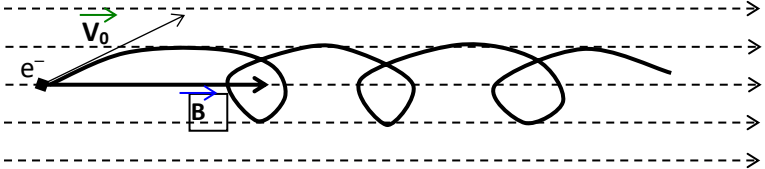
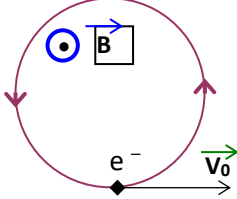
4.3. Le sélecteur de vitesse

4.4. Accélérateurs de particules :

Moments didactiques/ Durée	Stratégies pédagogiques	Activités du professeur	Activités des élèves	Trace Ecrite
Présentation	Questions/ réponses	Rappels/pré requis ▪ Champ magnétique uniforme ▪ Théorème de CI	Les élèves répondent aux questions	MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME
Développement	Expérimentation Travail de groupe Travail individuel	Faire lire la situation par un élève. -Que veulent faire les élèves?	Les élèves lisent la situation	1 – <u>LA FORCE DE LORENTZ</u> : 1.1 – <u>Définition</u> : Dans un champ magnétique ($\vec{B}$), une particule de charge électrique (q), animée d'une vitesse ($\vec{v}$), subie la force magnétique de Lorentz défini par : $\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$ 1.2 – <u>Les caractéristiques de la force</u> : - <u>Point d'application</u> : sur la particule, - <u>Direction</u> : la perpendiculaire au plan ($q \cdot \vec{v}$, $\vec{B}$), - <u>Sens</u> : est tel que le trièdre ($q \cdot \vec{v}$, $\vec{B}$, $\vec{F}$) est direct, il est donné par l'une des règles suivantes : - la règle des trois doigts de la main droite - la règle de la main droite : • Le pouce donne le sens de $\vec{F}$ • Les quatre doigts donnent le sens de $q\vec{v}$ • La paume donne le sens de $\vec{B}$

Développement (suite)	Travail de groupe Travail individuel			- <u>Valeur</u> : $F = q \times V \times B \times \sin(\vec{v}, \vec{B})$ Avec F en Newton (N), V en mètre par seconde (m.s⁻¹) et B en Tesla (T). Remarque : ☉ vecteur dirigé vers l'avant du plan (vecteur sortant) ⊗ vecteur dirigé vers l'arrière du plan (vecteur entrant)  On retrouve la direction et le sens de $\vec{F}$ par la règle des trois doigts de la main droite : - L'index est placé suivant la direction et le sens de $q \cdot \vec{v}$, - Le majeur est placé suivant la direction et le sens de $\vec{B}$, - Le pouce tendu donne la direction et le sens de $\vec{F}$. NB : On a toujours $B \perp V \Rightarrow$ la puissance $\mathcal{P}_{(F)} = \vec{F} \cdot \vec{V} = F \times V \times \cos(\vec{F}, \vec{V}) = F \times V \times \cos(\pi/2) = 0$ Or $\mathcal{P}_{(F)} = \frac{W_{\vec{F}}}{t} \Rightarrow \mathbf{W_F = 0}$. La force de Lorentz ne travaille pas 2 – ETUDE EXPERIMENTALE : 2.1 – <u>Dispositif expérimental</u>
--------------------------	--	--	--	---

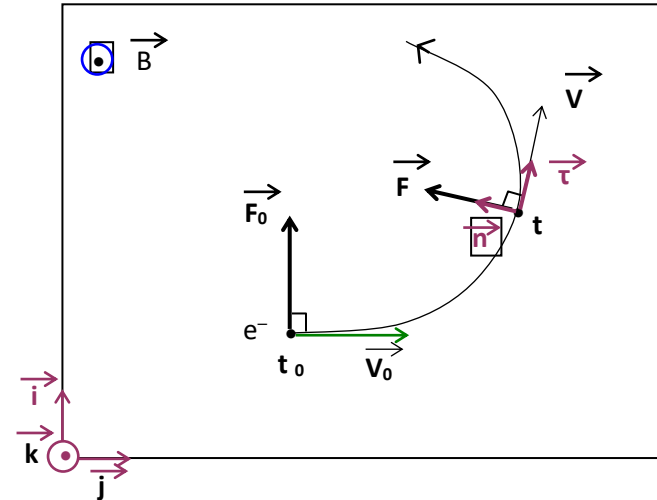
Développement (suite)	Expérimentation Travail de groupe Travail individuel			 1 et 2 : Bobines d'Helmholtz. Entre les bobines le champ magnétique est uniforme. 3 : Ampoule contenant un gaz fluorescent. Elle est mobile pour permettre de changer la direction de la vitesse de sortie des électrons. 4 : Trace des électrons. 5 : Canon à électrons. 6 : Boîte de circuits électriques. 7 : Générateur stabilisé pour alimenter les bobines. 8 : Générateur THT (0 – 700V) pour alimenter le canon à électrons. 9 : Aiguille aimantée pour indiquer la direction et le sens du champ magnétique. 2.2 – <u>Observations et interprétations</u> : <u>V_0 colinéaire à B</u> : La particule n'est pas déviée. $\alpha = (V_0 , B) = 0 \text{ ou } \pi \text{ rad} \Rightarrow \sin(\alpha) = 0 \Rightarrow$ $F = q \times V \times B \times \sin(\alpha) = 0$
----------------------------------	---	--	--	---

Développement (suite)	Expérimentation Travail de groupe Travail individuel			La particule ne subit aucune force ($F = 0$, Poids négligé). Etant isolée dans un référentiel galiléen, elle a un mouvement rectiligne uniforme. <u>V_0 fait un angle quelconque avec B : $\alpha \notin \{0, \pm \pi, \pm \pi/2\}$</u> La particule a un mouvement hélicoïdal.  <u>V_0 est perpendiculaire à B : $\alpha = \pi/2$ rad</u> La particule a un mouvement circulaire uniforme situé dans le plan $\perp$ à B.  <u>APPLICATION 2 :</u> Des électrons pénètrent dans un champ magnétique $\vec{B} \perp \vec{V}_0$. 1-Représenter sur un schéma, $\vec{V}_0$, $\vec{B}$ et $\vec{F}$. 2-Calculer la norme de $\vec{F}$ pour $V_0 = 2.10^5 \text{ m.s}^{-1}$ et $B = 0,2 \text{ T}$. 3-Comparer F et P. Conclure. On prendra $m_e = 1,67.10^{-27} \text{ kg}$ et $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$. 4-Répondre aux mêmes questions si la particule est un ion Al^{3+} de masse $m = 45,05.10^{-27} \text{ kg}$
----------------------------------	---	--	--	--

Développement
(suite)

3 – ETUDE THEORIQUE : Cas ou $\vec{V}_0 \perp \vec{B}$; $\alpha = \pi/2$ rad

Soit une particule de charge q et de vitesse $\vec{V}_0$ qui entre dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$.



A t_0 : La particule a une vitesse $\vec{v}_0$ et subie la force $\vec{F}_0 = q \cdot \vec{v}_0 \wedge \vec{B}$ avec $F_0 = |q| \cdot v_0 \cdot B$.

A $t \neq 0$ s : La particule a une vitesse $\vec{v}$ et subie la force $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$ avec $F = |q| \cdot v \cdot B$.

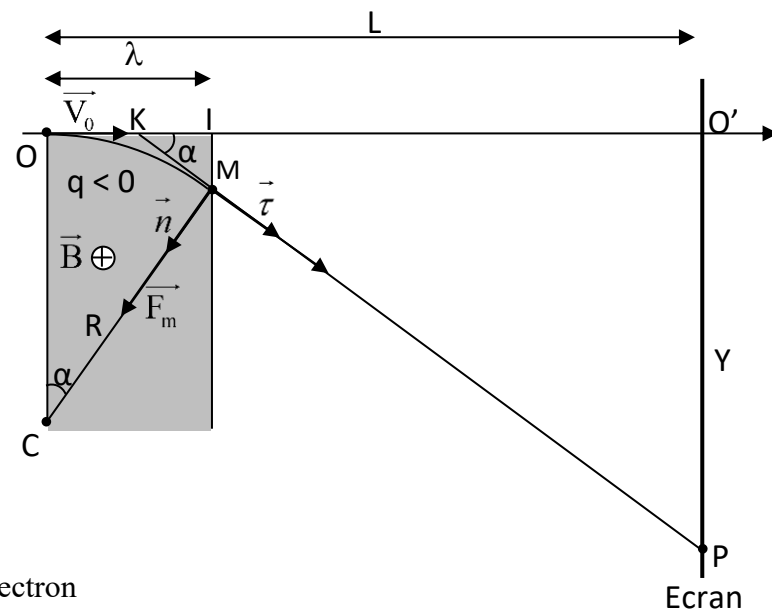
3.1- Etude dynamique :

- * Système : Particule de charge $q = -e$ et de masse m .
- * Référentiel : Terrestre supposé Galiléen.

Développement (suite)	Expérimentation			* <u>Bilan des forces extérieures</u> : - La force de Lorentz $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$ - Le poids $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$ négligé. * <u>Théorème du CI</u> : $\sum \vec{F}_{\text{EXT}} = m \cdot \vec{a} \Rightarrow \vec{F} = m \cdot \vec{a} \Rightarrow \boxed{\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}} \quad (1)$ $\Rightarrow \boxed{\vec{a} = \frac{1}{m} (q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B})}$ 3.2 - <u>Trajectoire plane</u> : * D'après le schéma $\vec{B} \parallel \vec{k}$; D'après (1) $\vec{a} \parallel \vec{F}$; $\vec{F} \perp \vec{B}$ (toujours) $\Rightarrow \vec{a} \perp \vec{k}$ $\Rightarrow$ La composante de $\vec{a}$ sur $\vec{k}$ est nulle : $a_z = 0$ * $a_z = 0$ = cite $\Rightarrow$ Le vecteur position a pour composante sur $\vec{k}$: $Z(t) = \frac{1}{2} \cdot a_z \cdot t^2 + V_{z0} \cdot t + Z_0$ Or à t_0, $\vec{v}_0$ et OM_0 sont dans le plan $\perp$ à $\vec{k} \Rightarrow V_{z0} = 0$ et $Z_0 = 0$ Par conséquent $Z(t) = 0$. Le mouvement se fait dans le plan $(0, \vec{i}, \vec{j})$. La trajectoire de la particule est plane et située dans le plan $\perp$ à B. 3.3 – <u>Mouvement circulaire et uniforme</u> :
	Travail de groupe			
	Travail individuel			

Développement (suite)				Dans la base de Freinet $(\vec{\tau}, \vec{n})$: $\vec{F} \begin{cases} F_{\tau} = 0 \\ F_n = F = q \cdot V \cdot B \end{cases}$ $\vec{a} \begin{cases} a_{\tau} = \frac{dV}{dt} \\ a_n = \frac{V^2}{\rho} \end{cases}$ Avec ρ le rayon de courbure de la trajectoire à l'instant (t). <u>Projection de (1) sur $\vec{\tau}$:</u> $a_{\tau} = \frac{F_{\tau}}{m} \Rightarrow \frac{dV}{dt} = \frac{0}{m} = 0 \Rightarrow V = \text{Cte.}$ Le mouvement est uniforme de vitesse $V = \text{Cte} = V_0$. <u>Projection de (1) sur $\vec{n}$:</u> $a_n = \frac{F_n}{m} \Rightarrow \frac{V^2}{\rho} = \frac{F}{m} \Rightarrow \frac{V^2}{\rho} = \frac{ q \cdot V \cdot B}{m} \Rightarrow \rho = \frac{m \cdot V}{ q \cdot B}$ m, V, q, B sont des constantes $\Rightarrow \rho$ est une constante. Le mouvement est circulaire de rayon $R = \frac{m \cdot V_0}{ q \cdot B}$ <u>Remarques :</u> * On peut montrer que le mouvement est uniforme en utilisant le théorème de l'Ec : $\Delta E_{c_{t_0 \text{ à } t}} = E_{c_t} - E_{c_{t_0}} = W_{t_0 \text{ à } t}^{\vec{F}} = 0 \Rightarrow E_{c_t} = E_{c_{t_0}} \Rightarrow \frac{1}{2} m \cdot V^2 = \frac{1}{2} m \cdot V_0^2$ $\Rightarrow V = V_0$ * La vitesse est constante $\Rightarrow F = q \cdot V \cdot B = q \cdot V_0 \cdot B = F_0 = \text{Cte.}$
--------------------------	--	--	--	---

	Travail de groupe			La force de Lorentz est constante au cours du mouvement. * Le mouvement est circulaire uniforme de : - Vitesse angulaire $V = R\omega \Rightarrow \omega = \frac{V}{R} = \frac{ q B}{m}$ - Période de rotation $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{ q B}$ - Fréquence $N = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{ q B}{2\pi m}$ 4 – APPLICATIONS : 1 – <u>Déflexion magnétique</u> : 2 – <u>Spectrographe de masse</u> : 3 – <u>Filtre de Wien</u> : 4 – <u>Cyclotron</u> : <u>4.1 Déflexion magnétique</u>
--	-------------------	--	--	--



Soit un électron
pénétrant en O
dans un champ
magnétique $\vec{B}$
avec une vitesse
 $\vec{V}_0$.

Dans la région
où règne le
champ $\vec{B}$, il
décrit un arc de

*

cercle OM .

Après le point

M, l'électron

n'est soumis à

aucune force et

décrit un

mouvement

rectiligne

uniforme.

$$\text{On a : } \alpha = \frac{OM}{R}$$

Si la déviation angulaire α est faible, M se rapproche de I :

$$\Rightarrow \alpha = \frac{\ell}{R} = \frac{\ell}{\frac{mV_0}{|q|B}} \quad \text{soit : } \alpha = \frac{|q|\ell B}{mV_0}$$

La déflexion magnétique est la distance $Y = O'P$:

$$\tan \alpha = \frac{Y}{L} \Rightarrow Y = L \tan \alpha \quad \text{car}$$

$$\text{or } \alpha \text{ faible} \Rightarrow \tan \alpha = \alpha \quad \text{d'où} \quad Y = L\alpha$$

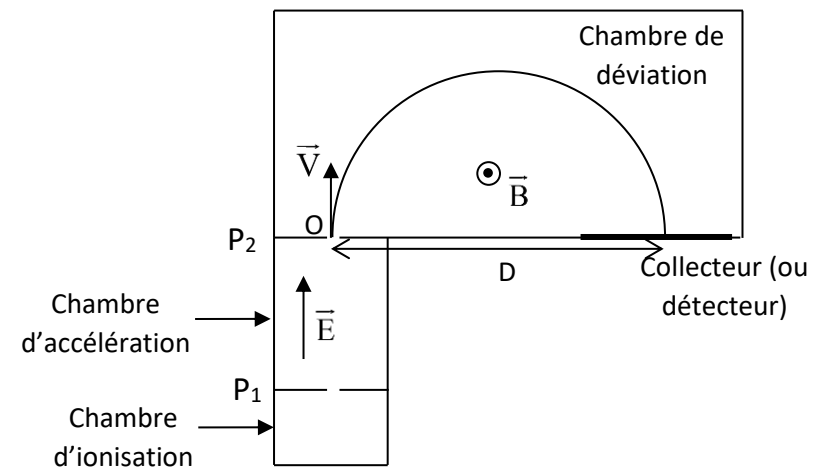
$$\Rightarrow Y = \frac{|q| \ell B L}{m V_0}$$

La déflexion magnétique est proportionnelle à B, donc à l'intensité du courant dans les bobines.

4.2 Le spectromètre de masse

C'est un appareil qui permet de séparer des isotopes d'un élément.

Une particule chargée (issue d'une chambre d'ionisation) est accélérée dans une chambre d'accélération (champ $\vec{E}$) puis pénètre dans champ magnétique $\vec{B}$ (chambre de déviation) où elle décrit un demi-cercle de diamètre D.



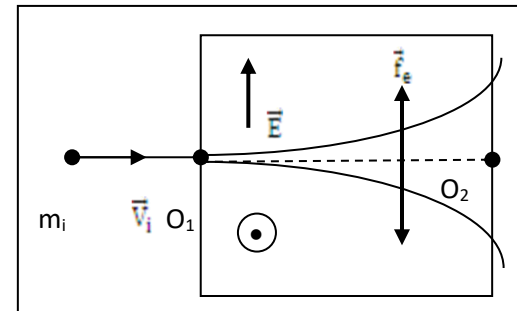
				Considérons une particule chargée (positivement) provenant de la chambre d'ionisation on a : <u>Entre P₁ et P₂ (chambre d'accélération)</u> Le T.E.C. donne : $\Delta E_c = W(\vec{F}_e) = q U$ car $\vec{P} \parallel \vec{F}_e$ soit : $\frac{1}{2}mV^2 - 0 = q U \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2 q U}{m}}$ <u>Dans la chambre de déviation</u> La trajectoire circulaire décrite par la particule a pour rayon : $R = \frac{mV}{ q B} = \frac{m}{ q B} \sqrt{\frac{2 q U}{m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{ q }}$ <u>Remarque :</u> Pour un mélange de deux isotopes de masses respectives m₁ et m₂, les rayons des trajectoires décrites sont respectivement : $R_1 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2m_1U}{ q }} \quad \text{et} \quad R_2 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2m_2U}{ q }}$ On obtient : $\frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}}$
--	--	--	--	---

Si $m_1 < m_2$ alors $R_1 < R_2$: La particule qui a la plus grande masse a la trajectoire de plus grand rayon.

4.3 . Le sélecteur de vitesse :

Supposons qu'un faisceau soit composé de particules de même charge mais ayant des vitesses différentes. Il s'agit de séparer des autres celles dont la vitesse est V_0 . Le faisceau est envoyé dans une région où règnent à la fois

Un champ électrostatique $\vec{E}$ perpendiculaire au champ magnétique $\vec{B}$. Chaque particule est soumise à la force magnétique $\vec{f}_m = q\vec{V} \wedge \vec{B}$ et à la force électrostatique $\vec{f}_e = q\vec{E}$. Ces deux vecteurs sont colinéaires de sens contraires.



En réglant E et B de manière à avoir $V_0 B = E$, seules les particules de vitesse V_0 sont soumises à une résultante des forces nulles et se déplacent en ligne droite.

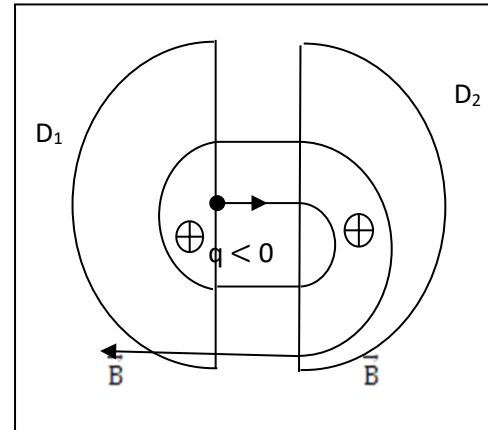
4.4. Accélérateurs de particules :

Les accélérateurs de particules combinent judicieusement l'effet d'un champ électrostatique (accélérateur) et celui d'un champ magnétique (déviateur), en vue de communiquer à des particules chargées les vitesses (donc les énergies) souhaitées tout en les contenant dans une région donnée.

a) Les accélérateurs linéaires d'électrons :

Ces accélérateurs permettent d'obtenir des électrons de grande énergie (jusqu'à quelques GeV).

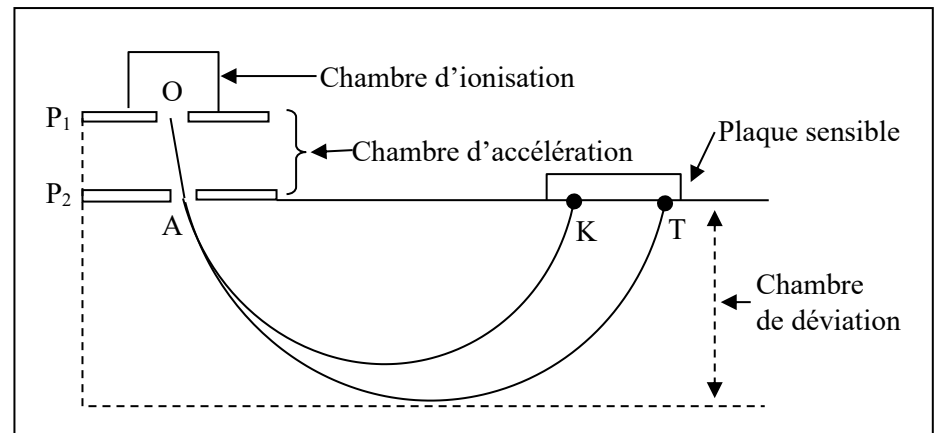
b. Les accélérateurs circulaires : les cyclotrons:



Le cyclotron est un accélérateur de particules. Il utilise à la fois un champ électrique (accélérateur) et un champ magnétique $\vec{B}$ (déviateur). Le dispositif comporte deux demi- cylindres appelés “D”, entre lesquels on établit un champ électrique alternatif.

A l'intérieur des “D”, existe un champ magnétique uniforme. Les particules sont accélérées à chaque passage entre les « D ».

				Situation d'évaluation Au laboratoire de physique d'un lycée de Yopougon, un groupe d'élèves d'une classe de T^{le}D observe l'uranium naturel, en mouvement dans le dispositif ci-dessous sous la supervision de leur professeur de physique - chimie .Le groupe fait pénétrer l'uranium naturel contenant essentiellement deux isotopes : l'uranium 235 et l'uranium 238. Il désire séparer les deux isotopes de l'uranium à l'aide d'un spectrographe de masse (voir figure). Les ions $^{235}_{\text{Z}}\text{U}^{+}$ de masse m_1 et $^{238}_{\text{Z}}\text{U}^{+}$ de masse m_2 produits dans une chambre d'ionisation sont introduits avec une vitesse initiale négligeable en O dans une chambre d'accélération entre deux plaques P_1 et P_2 soumises à une tension $U = V_{P_1} - V_{P_2}$. Ces ions sortent par la fente A. 1. 1.1. Représenter sur un schéma le sens du champ électrique $\vec{E}$ régnant entre les plaques P_1 et P_2 permettant l'accélération des ions. 1.2. Exprimer les vitesses V_1 et V_2 des ions $^{235}_{\text{Z}}\text{U}^{+}$ et $^{238}_{\text{Z}}\text{U}^{+}$ en fonction de q, U et leurs masses respectives m_1 et m_2. En déduire une relation entre m_1, m_2, V_1 et V_2.
--	--	--	--	---



2. A la sortie en A de la chambre d'accélération, les ions pénètrent dans une région où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ perpendiculaire au plan de la figure.

2.1. Quel doit être le sens de $\vec{B}$ pour que les ions soient déviés vers la plaque sensible ?

2.2. Démontrer que les ions prennent dans le champ magnétique, un mouvement circulaire uniforme dans un plan qu'on précisera.

2.3. Déterminer les rayons de courbure R_1 et R_2 des trajectoires des ions en fonction de $U = V_{P_1} - V_{P_2}$, q , B et de la masse de l'ion correspondant.

2.4. Déterminer l'ion qui correspond à chacune des traces K et T sur la plaque sensible. Calculer la distance KT.

3. Le courant d'ions issu de la chambre d'ionisation a une intensité de $10 \mu A$. Sachant que l'uranium naturel contient en nombre d'atomes 0,7 % d'isotopes légers, calculer en mg, la masse de chaque isotope recueilli en 24 h.

				Données : ♦ $B = 10^{-3} \text{ T}$, $U = 4 \text{ kV}$ ♦ Charge élémentaire : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ♦ Unité de masse atomique : $1u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ♦ Masse de l'uranium 235 : $m_1 = 235 \text{ u}$ ♦ Masse de l'uranium 238 : $m_2 = 238 \text{ u}$.
--	--	--	--	--

--	--	--	--	--