

Moments didactiques/ Durée	Stratégies pédagogiques	Activités du Professeur	Activités des élèves	Trace écrite
Présentation	Questions /réponses	Rappels/pré requis	Par leurs réponses, les élèves amènent le professeur à donner le titre de la leçon	MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME
Développement	Questions –réponses	Administration de la situation d'apprentissage Lisez la situation. Quelles actions les élèves veulent mener ?	Les élèves lisent la situation. Ils veulent : - définir la force de Lorentz - déterminer ses caractéristiques - analyser le mouvement d'une particule chargée dans un spectromètre de masse, dans un cyclotron et dans un filtre de vitesses.	Rappel sur le produit vectoriel - définition du produit vectoriel Soient $\vec{U}$ et $\vec{V}$ deux vecteurs non nuls du plan. On appelle produit vectoriel de $\vec{U}$ et $\vec{V}$, noté $\vec{U} \wedge \vec{V}$ et lu « $\vec{U}$ vectoriel $\vec{V}$ » le vecteur $\vec{W}$ défini par $\vec{W} = \vec{U} \wedge \vec{V}$.
	Questions-réponses	Le professeur définit le produit vectoriel		

Développement (suite)	Questions-réponses Expérimentation Travail de groupe Travail individuel	Le professeur énonce ses principales propriétés du produit vectoriel Activité : Force de Lorentz Soyez attentif et observez l'expérience	Les élèves observent attentivement l'expérience.	On a : $\ \vec{W}\ = \ \vec{U}\ \cdot \ \vec{V}\ \cdot \sin(\widehat{\vec{U}, \vec{V}})$ $\rightarrow W = U \cdot V \cdot \sin \alpha$ avec $\alpha = \text{mes}(\widehat{\vec{U}, \vec{V}})$ (ce vecteur a pour caractéristiques : ♦ Direction : la perpendiculaire au plan formé par les vecteurs $\vec{U}$ et $\vec{V}$ (autrement dit $\vec{W} \perp \vec{U}$ et $\vec{W} \perp \vec{V}$) ♦ Sens : tel que le trièdre $(\vec{U}, \vec{V}, \vec{W})$ soit direct ♦ Norme : $W = U \cdot V \cdot \sin(\widehat{\vec{U}, \vec{V}})$ Le point d'application est relatif ; ça dépend du point d'intersection (point commun entre $\vec{U}$ et $\vec{V}$) - Quelques propriétés du produit vectoriel ♦ $k \vec{U} \wedge \vec{V} = k(\vec{U} \wedge \vec{V})$ ♦ $\vec{U} \wedge \vec{V} = - \vec{V} \wedge \vec{U}$ (car $\sin \alpha = - \sin -\alpha$) : le produit vectoriel n'est pas commutatif) ♦ $\vec{T} \wedge (\vec{U} + \vec{V}) = \vec{T} \wedge \vec{U} + \vec{T} \wedge \vec{V}$: le produit est distributif par rapport à l'addition ♦ Si $\vec{U} \perp \vec{V}$ alors $\ \vec{U} \wedge \vec{V}\ = U \cdot V$ ♦ Si $\vec{U} // \vec{V}$ alors $\ \vec{U} \wedge \vec{V}\ = 0$ 1. Force de Lorentz <i>En classe de seconde, vous avez appris qu'un aimant dévie un faisceau d'électrons (tube de Crookes) (leçon : le courant électrique). Nous allons, dans cette leçon, préciser la nature de cette interaction et donner l'expression de la force qui en est responsable.</i> 1.1. Mise en évidence de la force de Lorentz (action d'un champ magnétique sur une particule chargée) 1.1.1. Expérience et observation On fait pénétrer un faisceau d'électrons avec une vitesse $\vec{v}_0$ dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ <i>(ce champ magnétique uniforme $\vec{B}$ est créé par deux (2) bobines de Helmholtz : les bobines de Helmholtz, du nom de Hermann Ludwig von Helmholtz, sont un dispositif constitué de deux bobines circulaires de même rayon, parallèles, et placées l'une en face de l'autre à une distance égale à leur rayon. En faisant circuler du courant électrique</i>
--------------------------	---	--	---	---

Développement (suite)	Questions-réponses			dans ces bobines, un champ magnétique est créé dans leur voisinage, qui a la particularité d'être relativement uniforme au centre du dispositif dans un volume plus petit que les bobines elles-mêmes. Ce type de bobines est souvent utilisé en physique pour créer des champs magnétiques quasi-uniformes relativement faibles avec peu de matériel. On peut par exemple s'en servir pour éliminer le champ magnétique terrestre afin qu'il ne perturbe pas une expérience. Les électrons sont émis par un canon à électrons puis accélérés par un générateur de tension continue) On observe alors que : - Lorsque $\vec{B} = \vec{0}$ (ou $\vec{v}_0 // \vec{B}$), le faisceau (les électrons) n'est pas dévié (les électrons sont animés d'un MRU)
	Travail de groupe	Le professeur montre l'influence des orientations des vecteurs $\vec{v}$ et $\vec{B}$.		- Lorsque $\vec{B} \perp \vec{v}_0$, le faisceau est dévié (les électrons ont en fait une trajectoire circulaire comme on le verra plus tard). Le mouvement (la déviation) change de sens quand on inverse le sens de $\vec{B}$ (càd que le faisceau subit l'action d'une force dans le champ $\vec{B}$: c'est la force de Lorentz)
	Travail individuel			
	Questions-réponses	Le professeur définit la force de Lorentz		- Lorsque $\vec{v}_0$ est quelconque (càd $\vec{v}_0$ n'est ni parallèle ni perpendiculaire à $\vec{B}$), le faisceau une déviation et sa trajectoire est hélicoïdale) 1.1.2. Conclusion Une force magnétique $\vec{f}$ agit sur les électrons en mouvement dans un champ magnétique si le vecteur vitesse (d'entrée de ces électrons dans le champ) n'est pas parallèle (ou colinéaire) au vecteur champ magnétique : c'est la force de Lorentz

Développement (suite)	Travail de groupe Travail individuel Questions-réponses	Le professeur donne l'expression de la force de Lorentz : $\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$. Le professeur donne les caractéristiques de la force de Lorentz		N.B. : Cette force est nulle si les vecteurs vitesse et champ magnétique sont parallèles ou si au moins l'un des deux vecteurs est nul. 1.2. Expression de la force de Lorentz Une particule de charge électrique q, en mouvement à une vitesse $\vec{v}$ dans (une région de l'espace où règne) un champ magnétique $\vec{B}$ subit une force magnétique dite force de Lorentz et donnée par l'expression : $\vec{f} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$ <i>(si la particule est soumise à un champ magnétique $\vec{B}$ et à un champ électrostatique $\vec{E}$ alors la force agissant sur la particule de charge q est : $\vec{f} = q \vec{E} + q \vec{v} \wedge \vec{B} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$)</i> 1.3. Caractéristiques de la force de Lorentz ♦ Point d'application : Particule (<i>supposée ponctuelle</i>) de charge q (<i>animée d'une vitesse $\vec{v}$ qui fait un angle α avec le champ magnétique $\vec{B}$</i>) ♦ Direction : la perpendiculaire au plan formé par $\vec{v}$ et $\vec{B}$ ($\vec{f} \perp \vec{v}$ et $\vec{f} \perp \vec{B}$) ♦ Sens : tel que le trièdre ($q \vec{v}, \vec{B}, \vec{f}$) soit direct. <i>(si $q < 0$ alors $q \vec{v}$ et $\vec{v}$ sont de sens contraires (or ici c'est le cas car il s'agit des électrons, d'où les sens sur le schéma illustratif) si $q > 0$ alors $q \vec{v}$ et $\vec{v}$ sont de même sens)</i>
---	--	---	--	--

Développement (suite)	Travail de groupe Travail individuel Questions-réponses	Le professeur énonce la règle de la main droite	♦ Intensité : $f = q v \cdot B \cdot \sin \alpha$ où $\alpha = (\widehat{q\vec{v}, \vec{B}})$ (et $0 < \alpha < \pi$: puisque la trajectoire est un cercle qu'on verra plus tard) Remarque : Le sens de $\vec{f}$ peut être déterminé par l'une des méthodes utilisées pour déterminer un trièdre direct. On distingue : - La règle de la main droite ♦ La main droite ouverte est placée telle que le vecteur $q\vec{v}$ (1^{er} vecteur) (du trièdre direct $(q\vec{v}, \vec{B}, \vec{f})$) traverse la main (droite ouverte) du poignet à l'extrémité de ses (4 autres) doigts. ♦ La paume ouverte est orientée dans le sens du vecteur (champ magnétique) $\vec{B}$ (2^{ème} vecteur) ♦ Le pouce, écarté des autres doigts (en restant dans le plan de la main) et tendu indique le sens de $\vec{f}$ (3^{ème} vecteur) (donc pour déterminer le sens de $\vec{f}$, on applique cette règle au trièdre direct $(q\vec{v}, \vec{B}, \vec{f})$) N.B. : Pour déterminer les sens des deux autres vecteurs, on utilise la permutation circulaire. Ainsi :
---	--	--	--

Développement (suite)	Travail de groupe Travail individuel Questions-réponses	Le professeur énonce la règle des trois doigts de la main droite. Le professeur énonce la règle du bonhomme d'Ampère	• Pour le sens de $\vec{B}$, on utilise le trièdre direct ($\vec{f}$, $q\vec{v}$, $\vec{B}$). Dans ce cas, $\vec{f}$ représente le 1^{er} vecteur (qui traverse la main droite ouverte du poignet à l'extrémité des doigts), $q\vec{v}$ représente le 2^{ème} vecteur et $\vec{B}$ le 3^{ème} vecteur. • Pour le sens de $\vec{v}$, on utilise le trièdre direct ($\vec{B}$, $\vec{f}$, $q\vec{v}$). Dans ce cas $\vec{B}$ représente le 1^{er} vecteur (qui traverse la main droite ouverte du poignet à l'extrémité des doigts), $\vec{f}$ représente le 2^{ème} vecteur $q\vec{v}$ le 3^{ème} vecteur. (et connaissant le sens de $q\vec{v}$, le signe de la charge permet de déterminer le sens de $\vec{v}$) - La règle des trois doigts de la main droite En général, avec cette règle, lorsqu'on a un produit vectoriel, le pouce représente le 1^{er} vecteur (la 1^{ère} composante du produit vectoriel), l'index représente le 2^{ème} vecteur (la 2^{ème} composante du produit vectoriel) et le majeur le 3^{ème} vecteur (la résultante du produit vectoriel) Pour le sens de $\vec{f}$, on utilise le trièdre direct ($q\vec{v}$, $\vec{B}$, $\vec{f}$). Ainsi : On place le pouce (de la main droite) suivant $q\vec{v}$, l'index suivant $\vec{B}$ et le majeur indique le sens de $\vec{f}$ <u>(N.B. :</u> • pour le sens de $\vec{B}$, on utilise le trièdre direct ($\vec{f}$, $q\vec{v}$, $\vec{B}$), et donc on a : pouce : $\vec{f}$; index : $q\vec{v}$ et majeur : $\vec{B}$ • Pour le sens de $\vec{v}$, on utilise le trièdre direct ($\vec{B}$, $\vec{f}$, $q\vec{v}$) et donc on a : pouce : $\vec{B}$; index : $\vec{f}$ et majeur : $q\vec{v}$) - La règle du bonhomme d'Ampère Le bonhomme d'Ampère est arrêté tel que :
---	--	--	---

Développement (suite)	Travail de groupe Travail individuel Questions-réponses			♦ le vecteur $q\vec{v}$ (le 1^{er} vecteur du trièdre direct ($q\vec{v}, \vec{B}, \vec{f}$)) lui entre par les pieds et sort par la tête. ♦ le bonhomme regarde dans la direction (et le sens) de $\vec{B}$ (le 2^{ème} vecteur) ♦ son bras gauche tendu indique le sens de $\vec{f}$ (le 3^{ème} vecteur) <u>(N.B. :</u> • pour le sens de $\vec{B}$, on utilise le trièdre direct ($\vec{f}$, $q\vec{v}, \vec{B}$), et donc on a : $\vec{f}$: le 1^{er} vecteur ; $q\vec{v}$: le 2^{ème} vecteur et $\vec{B}$: le 3^{ème} vecteur (avec les même rôles) • Pour le sens de $\vec{v}$, on utilise le trièdre direct ($\vec{B}, \vec{f}$, $q\vec{v}$) et donc on a : $\vec{B}$: le 1^{er} vecteur ; $\vec{f}$: le 2^{ème} vecteur et $q\vec{v}$: le 3^{ème} vecteur (avec les même rôles))
---	--	--	--	---

Développement
(suite)

Travail de groupe

Travail individuel

Questions-réponses

Représente dans ces différentes situations, la force de Lorentz, le vecteur champ magnétique et le vecteur- vitesse à partir des règles du bonhomme d'Ampère, de la main droite ou des trois doigts de la main droite.

Les élèves exécutent

1.4. Exemples de représentation (de $\vec{f}$, de $\vec{B}$ et de $q\vec{v}$)
Sur les schémas ci-dessous doivent figurer $\vec{v}$, $\vec{B}$ et $\vec{F}$ (force de Lorentz).
Sachant que $\vec{v}$ est orthogonal à $\vec{B}$, représente le vecteur manquant.

Représentation de $\vec{F}$	Représentation de $\vec{B}$	Représentation de $\vec{v}$
$q > 0$	$q < 0$	$q < 0$
$q < 0$	$q > 0$	$q > 0$

Développement (suite)		Activité : Mouvement d'une particule dans un champ magnétique uniforme: (cas particulier où $\vec{B} \perp \vec{v}$) Soyez attentif et observez l'expérience	Les élèves observent attentivement l'expérience.	q > 0	q < 0	q < 0
	Expérimentation			2. <u>Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme</u> À l'instant $t = 0$ s, une particule de masse m et de charge q pénètre avec une vitesse $\vec{v}_0$ par un point O dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$. (nous étudierons dans ce chapitre le cas où) La vitesse initiale $\vec{v}_0$ de la particule est perpendiculaire au vecteur champ magnétique $\vec{B}$ Le poids de la particule est négligé. (devant le poids car, pour un proton par exemple pour un champ $B = 5$ mT ; la force de Lorentz est 48 milliards de fois supérieure au poids ; d'où le poids d'une particule (élémentaire) sera négligé devant la force magnétique)		
	Travail de groupe					
	Travail individuel					

Développement (suite)	Questions-réponses	Déterminez la nature de la du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme (cas particulier où $\vec{B} \perp \vec{v}$).	Les élèves exécutent	$A t = 0 \text{ s}$, la particule a une vitesse $\vec{v}_0$ et subit une force $\vec{f}_0 = q \vec{v}_0 \wedge \vec{B}$ avec $f_0 = q v_0 B$ $A t \neq 0 \text{ s}$, la particule a une vitesse $\vec{v}$ et subit une force $\vec{f} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$ avec $f = q v B$ 2.1. Etude dynamique - Système : particule de charge q et de masse m - Référence : terrestre supposé galiléen muni du repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ - Bilan des forces extérieures : • la force de Lorentz : $\vec{f} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$ • le poids de la particule : $\vec{P} = m \vec{g}$ (négligé) - Théorème du centre d'inertie : $\sum \vec{F}_{ext} = m \cdot \vec{a}$ $\rightarrow \vec{f} = m \cdot \vec{a} \rightarrow q \vec{v} \wedge \vec{B} = m \cdot \vec{a} \rightarrow \vec{a} = \frac{q}{m} \vec{v} \wedge \vec{B} \rightarrow (\text{càd } \vec{a} \perp \vec{v} \text{ et } \vec{a} \perp \vec{B})$ $(\rightarrow \vec{a} = \frac{1}{m} q \vec{v} \wedge \vec{B}) \rightarrow a = \frac{ q }{m} v B = \text{Cte}$ (car q, m, v et B sont toutes constantes) N.B. : le vecteur accélération $\vec{a}$ est colinéaire au vecteur normal $\vec{n}$ (càd $\vec{a}$ est suivant $\vec{n} \rightarrow \vec{a} = a \vec{n}$ car selon $\vec{a} = \frac{q}{m} \vec{v} \wedge \vec{B}$; $(\frac{q}{m} \vec{v}, \vec{B}, \vec{a})$ forment un trièdre direct donc $\vec{a}$ est suivant $\vec{n}$) 2.2. Etude cinématique 2.2.1. Nature du mouvement (On a : $\vec{a} = \frac{q}{m} \vec{v} \wedge \vec{B} = \vec{cte}$, or $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ donc Le vecteur vitesse : $\vec{v} = \vec{a} \cdot t + \vec{v}_0$ Le vecteur position : $\vec{OM} = \frac{1}{2} \vec{a} \cdot t^2 + \vec{v}_0 \cdot t + \vec{OM}_0$ ♦ (par Projection) Dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, on a : à $t = 0 \text{ s}$
	Travail de groupe			
	Travail individuel			
	Questions-réponses			

Développement (suite)	Travail de groupe Travail individuel	Déterminez l'expression du rayon de la trajectoire et montrez que la trajectoire est circulaire. Tirez-en une conclusion	Les élèves exécutent Le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme est plan, circulaire et uniforme	$\vec{v}_0 \begin{cases} v_{ox} = v_0 \\ v_{oy} = 0 \\ v_{oz} = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \vec{OM}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases}$ à $t \neq 0$ s $\vec{a} \begin{cases} a_t = 0 \\ a_n = a \\ a_z = 0 \end{cases} ; \vec{v} \begin{cases} v_t = v_0 \\ v_n = at \\ v_z = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \vec{OM} \begin{cases} x = v_0 t \\ y = \frac{1}{2} a t^2 \\ z = 0 \end{cases}$ (car $\vec{a} = \vec{cte}$; $v_x = a_x t + v_{0x}$ et $x = \frac{1}{2} a_x t^2 + v_{0x} t + x_0$ (idem sur les autres axes)) Pour tout t, $z = 0$; donc le mouvement de la particule est plan (le mvt a lieu dans le plan perpendiculaire à $\vec{B}$) ♦ On sait que : $\vec{a} = a_t \vec{t} + a_n \vec{n}$ or $\vec{a}$ est colinéaire à $\vec{n}$ $\rightarrow a_t = 0$ or $a_t = \frac{dv}{dt} \rightarrow \frac{dv}{dt} = 0$; $v = cte = v_0$ Donc le mouvement de la particule est uniforme. (ou bien on a : $P = F \bullet V$ or $F \perp V_0 \Rightarrow P = 0 = \frac{W}{t} = 0 \Rightarrow W = 0$ ainsi $\Delta E_C = W_F = 0 \Rightarrow E_C = E_{C_0} \Rightarrow V = V_0 = cte$ alors Le mouvement est uniforme) 2.2.2. Nature de la trajectoire On a : $\vec{a} = a_t \vec{t} + a_n \vec{n} = a_n \vec{n} = a \vec{n} = \frac{q}{m} \vec{v} \wedge \vec{B} = \frac{ q }{m} vB \vec{n}$ (car $\vec{a}$ est suivant $\vec{n}$) Or $a_n = \frac{v^2}{\rho}$ (où ρ est le rayon de courbure du mouvement de la particule) $\rightarrow \rho = \frac{mv}{ q B}$ (car $a_n = \frac{ q }{m} vB$) Or m, v, q et B sont des constantes ; ρ est une constante notée R.
---	--	--	--	--

Développement (suite)	Questions-réponses	Activité : Applications Soyez attentif et observez l'expérience	Les élèves observent attentivement l'expérience.	La trajectoire est donc un cercle (de rayon $R = \frac{mv}{ q B}$) : le mouvement de la particule est circulaire 2.2.3. Conclusion Le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme est plan, circulaire et uniforme. 2.2.4. Autres caractéristiques du mouvement - Période et fréquence du mouvement ♦ La période est : $T = \frac{2\pi m}{ q B}$ (car c'est la durée pour effectuer un tour ; or le mvt est circulaire uniforme d'équation horaire : $s = vt$ et pour un tour (1 période), on a : $s = 2\pi R$ (périmètre du cercle) et $t = T$ (la période) donc $2\pi R = vT$ d'où $T = \frac{2\pi R}{v}$; or $R = \frac{mv}{ q B}$ d'où : $T = \frac{2\pi m}{ q B}$) ♦ La fréquence est : $N = \frac{1}{T} = \frac{ q B}{2\pi m}$ N.B. : La période (et donc la fréquence) est indépendante de la vitesse de la particule. - Vitesse angulaire de la particule On a : $v = R\omega \rightarrow \omega = \frac{v}{R} \rightarrow \omega = \frac{ q B}{m}$ (car $R = \frac{mv}{ q B}$ où $v = \frac{R q B}{m}$) - La vitesse linéaire est : $v = \frac{R q B}{m}$ - Quantité de mouvement : $p = mv = R q B$ (car $v = \frac{R q B}{m}$) Remarque : - Si $\vec{v}_0$ est colinéaire à $\vec{B}$ (de même sens ou de sens opposés) ($\alpha = \vec{v}_0, \vec{B} = 0$ ou π rad) alors la particule n'est pas déviée (càd la force de Lorentz est nulle et la particule a un MRU)
	Expérimentation			

Développement (suite)	Travail de groupe	Le professeur définit la déflexion magnétique		- Si $\vec{v}_0$ fait un angle α quelconque avec $\vec{B}$ ($\alpha \neq 0; \pi; \pm \frac{\pi}{2}$) alors la particule a un mouvement uniforme hélicoïdal (<i>la trajectoire est une hélice</i>)
	Travail individuel			
	Questions-réponses			- Si $\vec{v}_0$ est perpendiculaire à $\vec{B}$ ($\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$) alors la particule a un mouvement circulaire uniforme (<i>cas étudié plus haut</i>)
	Travail de groupe	Etablissez l'expression de la déflexion magnétique	Les é »lèves exécutent	3. Applications 3.1. Déflexion magnétique Soit un électron de masse m et de charge q ($q = -e < 0$) qui pénètre en O dans un champ magnétique $\vec{B}$ de largeur l avec une vitesse $\vec{v}_0$ perpendiculaire à $\vec{B}$ et dirigée suivant (OA). Il décrit un arc de cercle entre O et S. Au-delà du point S, (<i>il n'est plus soumis à aucune force (son poids étant négligé) et</i>) son mouvement est rectiligne uniforme et il arrive en A' sur l'écran E distant du point O de L. En l'absence de champ magnétique, l'électron arrive en A. (<i>sur l'écran</i>)

Développement (suite)		Soyez attentif et observez l'expérience	Les élèves observent attentivement l'expérience.	Et Dans le triangle IAA', $\tan \alpha = \frac{AA'}{IA} = \frac{D}{L - \frac{l}{2}} \rightarrow \tan \alpha = \frac{D}{L}$ (car $l \ll L$) Comme α est très petit ($\alpha < 10^\circ$), on a : $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ $\rightarrow \frac{l}{R} = \frac{D}{L} \rightarrow D = \frac{lL}{R}$ or $R = \frac{m v_0}{ q B}$ d'où: (N.B. La déflexion magnétique est proportionnelle à B (donc à l'intensité du courant) La mesure de la déflexion magnétique D permet de calculer la charge massique $\frac{q}{m}$) ACTIVITE D'APPLICATION (S. voir cours physique) (Dev. N°20 p.158 Terminale S pdf) Un faisceau (homocinétique) d'électrons de vecteur vitesse $\vec{v}_0$ pénètre en un point O dans une région où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$. Dans cette région de largeur ℓ, leur trajectoire est circulaire de centre O et de rayon R. Les électrons sortent de cette région en un point S. 1- Précise l'orientation du vecteur $\vec{B}$ 2- 2.1- Représente la trajectoire des électrons dans le champ $\vec{B}$ 2.2- On considère que l'angle $(\vec{CS}, \vec{CO}) = \alpha$. Montre que $\sin \alpha = \frac{l}{R}$. 3- Donne la nature du mouvement des électrons une fois sortis du champ magnétique 4- Les électrons heurtent en un point I, un écran situé à la distance L du point O. On suppose que $\ell \ll L$. 4.1- Représente la trajectoire des électrons entre les points S et I. 4.2- Exprime $\tan \alpha$ en fonction de la déflexion magnétique D et de L. 5- On suppose que α est petit. 5.1- Exprime alors la déflexion D en fonction de q, m, v_0, B, ℓ et L. 5.2- Calcule la valeur de D. Données : masse d'un électron $m = 9,1.10^{-31} \text{kg}$; charge d'un électron $q = -e = -1,6.10^{-19} \text{C}$; $B = 3,2.10^{-4} \text{T}$; $\ell = 2 \text{cm}$; $L = 30 \text{cm}$; $v_0 = 2,1.10^7 \text{m.s}^{-1}$.
	Expérimentation			
	Travail de groupe	Le professeur décrit le spectrographe de masse		
	Travail individuel			
	Questions-réponses			

Développement (suite)	Travail de groupe	Le professeur analyse le mouvement d'une particule chargée dans un spectromètre de masse		3.2. Spectrographe de masse (ou spectromètre de masse) Le spectrographe de masse (l'appareil) permet de séparer les isotopes d'un même élément chimique par l'utilisation d'un champ magnétique et d'un champ électrique (électrostatique) Les isotopes sont des nucléides possédant le même numéro atomique, (même nombre de protons) mais de masse atomique (ou nombre de masse) différente (nombre différent de neutrons) Pour cette séparation, les atomes sont d'abord ionisés dans une chambre dite chambre d'ionisation d'où les ions sortent avec une vitesse pratiquement nulle. Les ions sont alors accélérés par un champ électrique (une ddp) (la chambre d'accélération) (puis entrent dans un champ magnétique où ils sont accélérés) puis déviés par un champ magnétique (la chambre de déviation). Cette déviation est différente suivant l'isotope (suivant sa masse), ce qui permet de les séparer. Après séparation, les particules sont collectées ou recueillies par un collecteur ou détecteur. Un comptage électronique des impacts permet d'en déduire les proportions relatives de chaque isotope dans un échantillon donné.
----------------------------------	--------------------------	---	--	--

Développement (suite)		Soyez attentif et observez l'expérience	Les élèves observent attentivement l'expérience.	♦ on a : $\frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}}$. 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. - Un collecteur ou détecteur : où les ions sont recueillis (<i>avec des points d'impacts distincts donc séparés</i>) (les ions de même masse ayant le même impact car les impacts dépendent des rayons des trajectoires donc des masses des ions. Les isotopes (du même élément chimique) sont ainsi séparés (car recueillis séparément selon leurs points d'impact)) N.B. : ♦ Le spectrographe de masse permet de séparer des particules en fonction de leurs masses (d'où le nom spectrographe de masse) ♦ Dans la pratique, la position du détecteur (point d'impact) permet de déterminer le rayon R de la trajectoire. Connaissant la charge q, on détermine la masse de la particule ACTIVITE D'APPLICATION (<i>S. voir cours physique ou AEC</i>) À l'aide du spectrographe de masse schématisé ci-dessous, un groupe d'élèves se propose de séparer des ions $^{79}\text{Br}^-$ et $^{81}\text{Br}^-$ de masse respectives m_1 et m_2. Les ions Br^- pénètrent en O_1 avec des vitesses négligeables dans un champ électrique uniforme et constant créé par une tension $U_0 = V_{O_2} - V_{O_1}$ appliquée entre les deux plaques verticales P_1 et P_2 pour y être accélérés jusqu'en O_2. Les ions sortent en O_2 avec des vitesses respectives $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$. Le poids est négligé devant les autres forces.
	Expérimentation	Le professeur décrit le cyclotron		
	Travail de groupe			
	Travail individuel			

Développement (suite)	Questions-réponses	Le professeur analyse le mouvement d'une particule chargée dans un cyclotron	Travail de groupe	1. Exprime littéralement les valeurs v_1 et v_2 des vitesses des ions 2. Les ions Br^- pénètrent en O_2 dans un champ magnétique $\vec{B}$ orthogonal aux vecteurs vitesses $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$ et parviennent, après déviation, au collecteur. 2.1. Montre que la trajectoire de chacun des ions est un arc de cercle 2.2. Exprime R_1, rayon de courbure de l'ion 79_{Br}^- en fonction de B, m_1, U_0 et e puis R_2, rayon de courbure de l'ion 81_{Br}^- en fonction de B, m_2, U_0 et e 2.3. Exprime la distance séparant les points d'impact des deux types d'ions : 2.3.1. en fonction de R_1 et R_2 2.3.2. en fonction de B, m_1, m_2, U_0 et e 2.3.3. calcule sa valeur Données : $U_0 = 4000 \text{ V}$, $B = 10^{-2} \text{ T}$, $m_1 = 79 \mu$, $m_2 = 81 \mu$, $1 \mu = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ 3.3. Le cyclotron (découvert en 1929 par E. O. LAWRENCE aux USA) Le cyclotron est un accélérateur de particules (des protons par exemple) utilisant un champ électrique $\vec{E}$ (accélérateur) et un champ magnétique $\vec{B}$ (déviateur). Il comporte deux demi-cylindres (conducteurs) plats en forme de (la lettre) D appelés « dés » (en français) ou « dee » (en anglais) où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$. Entre les dés, (intervalle étroit), règne un champ électrostatique $\vec{E}$ variable (qui s'inverse (change de sens) périodiquement) grâce à une tension alternative (de valeur maximale) U (qui y est appliquée). Il permet d'augmenter la vitesse des particules à chaque fois qu'elles pénètrent dans cet intervalle. Au centre (S) du dispositif, une source émet des particules de vitesse initiale nulle.
----------------------------------	---------------------------	---	--------------------------	---

Développement (suite)	Travail individuel Questions-réponses Travail de groupe	Le professeur analyse le mouvement d'une particule chargée dans un cyclotron		Ces particules (émises sans vitesse initiale) sont accélérés (par le champ $\vec{E}$) vers le "dé" (supérieur) D_1, où elles arrivent en A_1 avec une vitesse V_1. Elles décrivent alors avec la vitesse V_1 constante un demi-cercle. Au moment précis où elles s'apprêtent à sortir du dé D_1 (point B_1), la tension appliquée entre les deux "dés" a changé de signe : les particules sont accélérés vers le "dé" D_2 (inférieur) (entre B_1 et C_2) : sa nouvelle vitesse est $V_2 > V_1$. Dans le "dé" D_2 (inférieur) les particules décrivent aussi un demi-cercle, de rayon supérieur au précédent, avec la vitesse V_2 constante. Lorsqu'elles sortent de D_2 (point E_2) la polarité des "dés" a encore changé : les particules sont accélères vers le "dé" D_1 (supérieur) (entre E_2 et F_1) et entrent dans ce "dé" D_1 avec la vitesse $V_3 > V_2$. A chaque traversée de l'intervalle entre les "dés", la tension appliquée accélère les particules. Lorsque les particules sont à l'intérieur des "dés", elles décrivent des demi-cercles avec des vitesses de plus en plus grandes et donc avec des rayons de plus en plus grands. 3.3.1. Action du champ $\vec{E}$
---	--	---	--	--

Développement (suite)	Travail individuel Questions-réponses Travail de groupe	Le professeur analyse le mouvement d'une particule chargée dans un cyclotron	♦ Entre les dés (dans l'intervalle étroit), il existe un champ électrostatique uniforme $\vec{E}$ constant pendant la courte durée d'une traversée. La particule est soumise à la force électrique $\vec{F} = q \vec{E}$ (= cte) Théorème du centre d'inertie : $\sum \vec{F}_{ext} = m \vec{a} \rightarrow \vec{F} = q \vec{E} = m \vec{a} \rightarrow \vec{a} = \frac{q}{m} \vec{E}$ $\rightarrow a = \frac{ q E}{m} = cte$ La vitesse initiale étant nulle, la particule est donc animée d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré. ♦ La vitesse v_1 de la particule au moment de sa pénétration dans le 1^{er} dé (D_1) Théorème de l'énergie cinétique : $\Delta E_C = W_{\vec{F}_{ext}} = qU$ (car $W_{\vec{F}} = \vec{F} \cdot \vec{AB} = q \vec{E} \cdot \vec{AB} = q(V_A - V_B) = qU_{AB}$) $\rightarrow \frac{1}{2} m v_1^2 - \frac{1}{2} m 0^2 = qU$ (car vitesse initiale nulle) $\rightarrow \frac{1}{2} m v_1^2 = qU$ $\rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{2 qU }{m}}$ ♦ Son énergie cinétique vaut alors : $E_{C_1} = \frac{1}{2} m v_1^2 \rightarrow E_{C_1} = qU$ Ainsi à chaque passage entre les dés, la particule acquiert une énergie cinétique $E_C = qU$ Donc après chaque tour, la variation de l'énergie cinétique acquise par la particule est : $\Delta E_C = 2 qU$ (car 1 tour de la particule correspond à 2 passages entre les dés : en fait c'est : $\Delta E_C = 2 \times 1 qU$) Ainsi après n tours, on a : $\Delta E_C = 2 n qU$ 3.3.2. Action du champ $\vec{B}$ ♦ Dans un dé (D_1 ici), le mouvement de la particule est circulaire uniforme (comme montré plus haut) ♦ Le rayon de sa 1^{ère} trajectoire semi-circulaire dans le D_1 est : $R_1 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2m U }{ q }}$ (car $v_1 = \sqrt{\frac{2 qU }{m}}$ or $R_1 = \frac{m v_1}{ q B}$)
----------------------------------	--	---	--

Développement (suite)	Travail individuel Questions-réponses	Activité d'application Le professeur donne un temps de recherche aux élèves et contrôle leurs productions Le professeur envoie un élève au tableau pour chaque exercice. Le professeur valide la réponse avant la prise de note par les autres élèves.	Chaque élève cherche les exercices au brouillon. Chaque élève prend la solution dans son cahier.	♦ Le temps (t_1) de transit de la particule dans le dé D_1 (durée du parcours dans un dé : on a : $s_1 = v_1 t_1$ (car $= \frac{\text{longueur de la trajectoire } (s_1)}{\text{durée de semi-rotation } (t_1)}$) On a : $\pi R_1 = v_1 t_1$ (car longueur = périmètre du $\frac{1}{2}$ cercle de rayon R_1) $\rightarrow t_1 = \frac{\pi R_1}{v_1} \text{ or } R_1 = \frac{m v_1}{ q B} \text{ d'où : } t_1 = \frac{\pi m}{ q B}$ N.B.: Ce temps de transit (t_1) est indépendant de v_1 (vitesse acquise par la particule : c'est la durée de parcours dans un dé est indépendante de la vitesse acquise par la particule. Ceci permettra une synchronisation des accélérations successives) Ainsi dans le dé D_2 , on a : $t_2 = \frac{\pi m}{ q B}$ (durée de parcours dans D_2) ♦ En négligeant le temps de passage entre les 2 dés (car ils sont très proches), la période du mouvement de la particule est (les particules font un tour en) : $T = t_1 + t_2 = \frac{\pi m}{ q B} + \frac{\pi m}{ q B} \rightarrow T = \frac{2 \pi m}{ q B}$ Sa fréquence vaut alors : $N = \frac{1}{T} = \frac{ q B}{2 \pi m}$ N.B : Cette fréquence est identique à celle de la tension alternative appliquée entre les dés. (pour une synchronisation des accélérations successives) 3.3.3. Effet cyclotron Lorsque la particule quitte le dé D_1, le sens de $\vec{E}$ est inversé. À la sortie de D_2, le sens de $\vec{E}$ est encore inversé. Ainsi de suite..... (d'où le mvt des particules et la tension alternative engendrant $\vec{E}$ doivent avoir la même fréquence pour synchroniser ces accélérations) ♦ La vitesse v_2 de pénétration de la particule pour la 1^{ère} fois dans le dé (D_2) TEC entre D_1 et D_2 : $\Delta E_C = W_{\vec{F}_{\text{ext}}} = qU$ $\rightarrow \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 = qU \text{ (en multipliant tout par } \frac{2}{m} \text{) } \rightarrow v_2^2 - v_1^2 = \frac{2 qU }{m}$ $\rightarrow v_2^2 - v_1^2 = v_1^2 \text{ (car } v_1 = \sqrt{\frac{2 qU }{m}} \text{) } \rightarrow v_2^2 = 2 v_1^2$
----------------------------------	---	---	--	--

Evaluation 15 min	Questions-réponses			Cette vitesse v_2 correspond au 2^{ème} passage de la particule dans un dé et on a : $v_2^2 = 2 v_1^2$ (ainsi au 3^{ème} passage dans un dé (càd à son 2^{ème} passage dans le dé D_1), on a : TEC entre D_2 et D_1 : $\Delta E_C = W_{\vec{F}_{ext}} = qU$ $\rightarrow \frac{1}{2} m v_3^2 - \frac{1}{2} m v_2^2 = qU$ (en multipliant tout par $\frac{2}{m}$) $\rightarrow v_3^2 - v_2^2 = \frac{2 qU }{m}$ $\rightarrow v_3^2 - v_2^2 = v_1^2 \rightarrow v_3^2 = v_2^2 + v_1^2$ or $v_2^2 = 2 v_1^2 \rightarrow v_3^2 = 3 v_1^2$) aussi au 4^{ème} passage dans un dé (càd à son 2^{ème} passage dans le dé D_2, on a $v_4^2 = 4 v_1^2$ Ainsi pour le $n^{ième}$ passage de la particule dans un dé avec une vitesse v_n; on a : $v_n^2 = n v_1^2 \rightarrow v_n = v_1 \sqrt{n}$ Aussi le rayon de la trajectoire de la particule pour le $n^{ième}$ passage (dans un dé avec une vitesse v_n) est : $R_n = \frac{m v_n}{ q B} \rightarrow R_n = R_1 \sqrt{n}$ (car $v_n = v_1 \sqrt{n}$ et $R_1 = \frac{m v_1}{ q B}$ En outre le nombre n de passage de la particule dans un dé est : $\sqrt{n} = \frac{R_n}{R_1}$ $\rightarrow n = \left(\frac{R_n}{R_1}\right)^2$ Dans ce cas, le nombre de tours effectués par la particule est : (comme il y'a 2 passages par tour) $n' = \frac{n}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_n}{R_1}\right)^2$ ♦ Après plusieurs tours (des centaines de tours) la particule arrive à la périphérie des dés de rayon R_D et sort (tangentiellement à la trajectoire) (càd expulsée des dés) avec la vitesse maximale acquise donnée par : (on a $R_n = \frac{m v_n}{ q B}$ donc $R_D = \frac{m v_{max}}{ q B}$ d'où) $v_{max} = \frac{ q B R_D}{m}$ (où R_D est le rayon (maximal) des dés (rayon des demi-cercles que constituent les dés) Et l'énergie cinétique correspondant vaut : $E_{C_{max}} = \frac{1}{2} m v_{max}^2$
Développement (suite)		Soyez attentif et observez l'expérience Le professeur décrit le filtre de Wien	Les élèves observent attentivement l'expérience.	

Développement (suite)	Expérimentation			$\rightarrow E_{C_{max}} = \frac{1}{2} \frac{ q ^2 B^2 R_D^2}{m}$ N.B. : Pourvues de cette énergie ($E_{C_{max}}$), les particules peuvent alors être utilisées comme des projectiles (<i>corpusculaires</i>) de haute énergie.
	Travail de groupe			
	Travail individuel			
	Questions-réponses	Le professeur analyse le mouvement d'une particule chargée dans un filtre de Wien		ACTIVITE D'APPLICATION (S. voir Tle S pdf n°24 ; p.181) Un cyclotron est constitué par deux demi- boîtes cylindriques D et D' à l'intérieur desquels on établit un champ magnétique B. Dans l'espace compris entre les deux, on établit une tension $U_{DD'}$ alternative sinusoïdale de valeur maximale U. Des ions positifs de charge q, de masse m sont injectés en O avec une vitesse négligeable. I.1. Donne le rôle du champ magnétique B uniforme. 2. Donne l'expression de la force subie par une particule chargée dans le champ magnétique. Dis pourquoi l'action du champ magnétique ne peut pas faire varier l'énergie cinétique d'une particule chargée 3. Donne la cause de l'augmentation de la valeur de la vitesse d'une particule chargée dans un accélérateur comme le cyclotron Dis pourquoi il faut changer le signe de la tension appliquée entre les électrodes après chaque demi-tour d'une particule chargée II. 1. Sachant que $U_{DD'} > 0$, établis l'expression littérale de l'énergie cinétique E_{C1} en fonction de q, U et de la vitesse v_1 de ses ions à leur première arrivée en D' en fonction de q, U et m. Calcule E_{C1} ainsi que la vitesse v_1. 2. Ces ions pénètrent alors dans D'. a) Montre que, dans le Dé D' le mouvement d'ion est circulaire uniforme. b) Exprime le rayon R_1 de leur trajectoire en fonction de B, q, U et m. Calcule la valeur de R_1. c) Exprime littéralement le temps t mis par un ion pour effectuer un demi-tour. Calcule sa valeur numérique. d) En déduis la valeur de la fréquence N de la tension. 3. Les ions ressortent de D'. On inverse alors la tension $U_{DD'}$ en gardant sa même valeur U. Etablis les expressions littérales:
	Travail de groupe			

Développement (suite)	Travail individuel	Le professeur analyse le mouvement d'une particule chargée dans un filtre de Wien		a) de leur vitesse V_2 à l'entrée de D et leur énergie cinétique; b) du rayon R_2 de leur trajectoire dans D. c) du rayon de la trajectoire des ions en fonction de n, nombre de tours de passage entre D et D' et de R_1. 4. Les particules chargées sont extraites lorsqu'elles parviennent à l'extrémité de l'enceinte de rayon R_{max}. Etablis l'expression de l'énergie cinétique maximale des particules. Calcule sa valeur pour $R_{max} = 40 \text{ cm}$ Données: $B = 1 \text{ T}$; $q = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m = 0,33 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$; $U = 10^5 \text{ V}$
	Questions-réponses			
	Travail de groupe			3.4. Filtre de Wien (ou filtre de vitesse) (par Max Wien (1866-1938) Physicien Allemand) Le filtre de Wien est un dispositif qui permet de séparer des particules (<i>des isotopes par exemple</i>) en fonction de leurs vitesses (<i>c'est un moyen de sélectionner des particules chargées à une vitesse spécifique</i>) Il est constitué par des champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$ perpendiculaires (<i>ou orthogonaux</i>) (<i>ce dispositif est obtenu en plaçant dans un champ magnétique $\vec{B}$, un condensateur à plaques produisant un champ électrique $\vec{E}$. Au bout de la plaque de condensateur se trouve une ouverture qui laisse passer les particules se trouvant au milieu du condensateur</i>)

Développement (suite)	Travail individuel Questions-réponses	<u>Activité d'application</u> Le professeur donne un temps de recherche aux élèves et contrôle leurs productions Le professeur envoie un élève au tableau pour chaque exercice. Le professeur valide la réponse avant la prise de note par les autres élèves.	Chaque élève cherche les exercices au brouillon. Chaque élève prend la solution dans son cahier	Les particules de charges q entrent avec une vitesse $\vec{v}_0$ dans le filtre de telle sorte que la direction de leur mouvement, le champ électrique $\vec{E}$ et le champ magnétique $\vec{B}$ soient deux à deux perpendiculaires ($\vec{v}_0 \perp \vec{E}$; $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$ et $\vec{B} \perp \vec{E}$) En pénétrant dans le filtre de Wien, les particules sont soumises à deux forces différentes (le poids étant négligé) : - La force électrique engendrée par le champ $\vec{E}$: $\vec{F}_e = q \vec{E}$ - La force de Lorentz (<i>magnétique</i>) engendrée par le champ $\vec{B}$: $\vec{F}_L = q \vec{v}_0 \wedge \vec{B}$
---	---	--	---	---

Evaluation (15 min)	Questions-réponses			Seules les particules, pour lesquelles la force électrique et la force de Lorentz sont égales (<i>en module</i>) et de sens contraires, ne sont pas déviées dans le filtre. (<i>ces particules ont donc un mouvement rectiligne uniforme</i>) Pour ces particules, on a : $\vec{F}_L + \vec{F}_e = \vec{0}$ $\rightarrow F_L = F_e \rightarrow q v_0 B = q E \rightarrow v_0 = \frac{E}{B}$ La vitesse des particules pouvant passer le filtre de Wien sans être déviées est : $v_{\text{passage}} = v_p = \frac{E}{B} \quad (\text{or } E = \frac{ U }{d} \rightarrow v_p = \frac{ U }{B \cdot d})$ Remarque : - Si des particules ont une vitesse $v_0 < v_p$, la force électrique F_e est plus grande que la force de Lorentz F_L (<i>en module</i>), alors ces particules sont déviées vers la plaque sur laquelle est orientée la force électrique $\vec{F}_e$ (<i>en effet dans ce cas, $F_L = q v_0 B < q v_p B$ (puisque $v_0 < v_p$)</i> <i>or $q v_p B = q E = F_e \rightarrow F_L = q v_0 B < F_e \rightarrow F_L < F_e \rightarrow F_e > F_L$</i>) - Si des particules ont une vitesse $v_0 > v_p$, la force de Lorentz est plus grande que la force électrique, alors ces particules sont déviées vers la plaque sur laquelle est orientée la force de Lorentz $\vec{F}_L$ (<i>les particules ne passent sans être déviées que si leur vitesse $v_0 = v_p$</i>) Limites :
---------------------------------------	---------------------------	--	--	---

--	--	--	--	--