

# Mouvement de particules chargées

## Sommaire

<b>I Introduction</b>	<b>3</b>
I/A Champs électrique et magnétique	3
I/B Produit vectoriel	3
<b>II La force de LORENTZ</b>	<b>5</b>
II/A Généralités	5
II/B Aspects énergétiques	5
<b>III Mouvement dans un champ électrique (stationnaire et uniforme)</b>	<b>7</b>
III/A Situation générale	7
III/B Accélération d'une particule chargée	8
III/C Déviation d'une particule chargée	9
<b>IV Mouvement dans un champ magnétique (stationnaire et uniforme)</b>	<b>10</b>
IV/A Vitesse initiale parallèle au champ $\vec{B}$	10
IV/B Vitesse initiale perpendiculaire au champ $\vec{B}$	10
IV/C Applications	13

## Capacités exigibles

- Force de LORENTZ exercée sur une charge ponctuelle
- 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.

- Mouvement d'une particule chargée dans un champ  $\vec{E}$  uniforme :
  - ▷ Mettre en équation le mouvement et le caractériser comme un mouvement à vecteur  $\vec{a}$  constant ;
  - ▷ Effectuer un bilan énergétique pour déterminer la valeur de la vitesse d'une particule chargée accélérée par une différence de potentiel.
- Mouvement d'une particule chargée dans un champ  $\vec{B}$  uniforme pour  $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$  : déterminer le rayon de la trajectoire et le sens de parcours.

---

 ✓ L'essentiel
 

---

 ☰ Définitions
 

---

<input type="checkbox"/> M5.1 : Champ électrique . . . . .	3
<input type="checkbox"/> M5.2 : Champ magnétique . . . . .	3
<input type="checkbox"/> M5.3 : Produit vectoriel . . . . .	3
<input type="checkbox"/> M5.4 : Force de LORENTZ . . . . .	5
<input type="checkbox"/> M5.5 : Tension . . . . .	7

 ⚠ Propriétés
 

---

<input type="checkbox"/> M5.1 : Produit vectoriel . . . . .	4
<input type="checkbox"/> M5.2 : Poids vs. LORENTZ . . . . .	5
<input type="checkbox"/> M5.3 : Puissance de LORENTZ . . . . .	5
<input type="checkbox"/> M5.4 : Énergie potentielle électrique . . . . .	6
<input type="checkbox"/> M5.5 : Potentiel électrostatique . . . . .	6
<input type="checkbox"/> M5.6 : Tension et champ électrique . . . . .	7
<input type="checkbox"/> M5.7 : Mouvement général en champ $\vec{E}$ . . . . .	7
<input type="checkbox"/> M5.8 : Particule $\vec{v}_0 \parallel \vec{E}$ . . . . .	8
<input type="checkbox"/> M5.9 : Déviation particule $\vec{v}_0 \perp \vec{E}$ . . . . .	9
<input type="checkbox"/> M5.10 : Particule $\vec{v}_0 \parallel \vec{B}$ . . . . .	10
<input type="checkbox"/> M5.11 : Trajectoire particule $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$ . . . . .	10
<input type="checkbox"/> M5.12 : Mouvement particule $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$ . . . . .	11

 ☰ Démonstrations
 

---

<input type="checkbox"/> M5.1 : Produit vectoriel . . . . .	4
<input type="checkbox"/> M5.2 : Poids vs. LORENTZ . . . . .	5
<input type="checkbox"/> M5.3 : Puissance de LORENTZ . . . . .	6
<input type="checkbox"/> M5.4 : Énergie potentielle électrique . . . . .	6
<input type="checkbox"/> M5.5 : Potentiel électrostatique . . . . .	6
<input type="checkbox"/> M5.6 : Tension et champ électrique . . . . .	7
<input type="checkbox"/> M5.7 : Mouvement général en champ $\vec{E}$ . . . . .	8
<input type="checkbox"/> M5.8 : Particule $\vec{v}_0 \parallel \vec{E}$ . . . . .	8
<input type="checkbox"/> M5.9 : Déviation particule $\vec{v}_0 \perp \vec{E}$ . . . . .	9
<input type="checkbox"/> M5.10 : Particule $\vec{v}_0 \parallel \vec{B}$ . . . . .	10
<input type="checkbox"/> M5.11 : Trajectoire $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$ par FRENET . . . . .	10
<input type="checkbox"/> M5.12 : Mouvement particule $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$ . . . . .	11

 📌 Remarques
 

---

<input type="checkbox"/> M5.1 : Comparaison $\vec{E}$ et $\vec{g}$ . . . . .	7
<input type="checkbox"/> M5.2 : Accélération rectiligne . . . . .	9
<input type="checkbox"/> M5.3 : Cas général $\vec{v}_0$ dans $\vec{B}$ . . . . .	13

 📄 Exemples
 

---

<input type="checkbox"/> M5.1 : Produit vectoriel . . . . .	4
<input type="checkbox"/> M5.2 : Oscilloscope analogique. . . . .	10

---

# I Introduction

## I/A Champs électrique et magnétique

### I/A) 1 Champ électrique

#### Définition M5.1 : Champ électrique

Un champ électrique  $\vec{E}(M,t)$  est un champ de vecteurs créé par des charges électriques et par des variations temporelles du champ magnétique.

Unités

#### Ordre de grandeur M5.1 : Champs électriques

- ◇ À l'intérieur d'un condensateur en TP, on a environ  $10 \text{ V}\cdot\text{mm}^{-1}$ , soit  $10 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$
- ◇ À la surface de la Terre, le champ électrique est d'environ  $10^2 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$
- ◇ Le champ électrique créé lors d'un orage est d'environ  $10^4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$
- ◇ Le champ électrique pour la téléphonie mobile est d'environ  $50 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$

### I/A) 2 Champ magnétique

#### Définition M5.2 : Champ magnétique

Un champ magnétique  $\vec{B}(M,t)$  est un champ de vecteurs créé par des courants électriques et par des variations temporelles du champ électrique.

Unités

#### Ordre de grandeur M5.2 : Champs magnétiques

- ◇ À l'intérieur d'une bobine en TP, on a environ  $10^{-4} \text{ T}$
- ◇ À la surface de la Terre, le champ magnétique est d'environ  $5 \times 10^{-5} \text{ T}$
- ◇ Le champ magnétique au centre d'un IRM est d'environ  $1 \text{ T}$
- ◇ Le champ magnétique d'un aimant permanent est d'environ  $[10^{-2} ; 10^{-1}] \text{ T}$

#### Important M5.1 : Condition du chapitre

On considèrera dans toute la suite des champs **uniformes** (constants dans l'espace) et **stationnaires** (constants dans le temps).

## I/B Produit vectoriel

L'étude des mouvements de particules chargées va faire intervenir un produit vectoriel.

#### ♥ Définition M5.3 : Produit vectoriel

Définition

Le produit vectoriel  $\vec{c}$  de deux vecteurs  $\vec{a}$  et  $\vec{b}$  s'écrit  $\vec{c} = \vec{a} \wedge \vec{b}$  est un **vecteur** :

- ◇ **perpendiculaire au plan**  $(\vec{a}, \vec{b})$ , donc à  $\vec{a}$  et à  $\vec{b}$  :
- ◇ de sens donné par la règle de la **main droite** ;
- ◇ de norme

et

avec  $\theta = \widehat{(\vec{a}, \vec{b})}$

**Antisymétrie**

C'est un opérateur **antisymétrique**, c'est-à-dire qu'il respecte

**Aire**

L'aire  $\mathcal{A}$  du parallélogramme formé par les vecteurs  $\vec{a}$  et  $\vec{b}$  est donnée par :

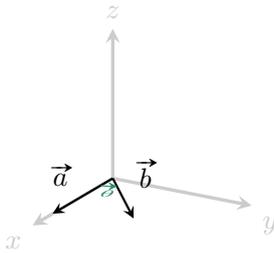
**♥ Exemple M5.1 : Produit vectoriel**

FIGURE M5.1

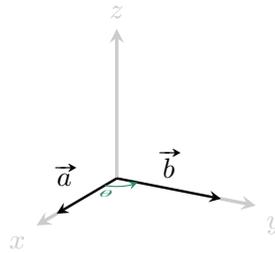


FIGURE M5.2

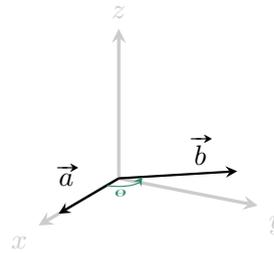


FIGURE M5.3

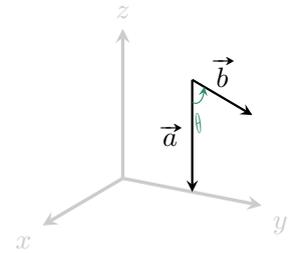
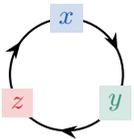


FIGURE M5.4

**♥ Propriété M5.1 : Produit vectoriel**

Pour toute base orthonormée **directe** (BOND), le produit vectoriel de deux vecteurs de base donne le troisième avec un signe + s'ils se suivent dans une permutation circulaire ( $x \rightarrow y \rightarrow z \rightarrow x$  ou  $r \rightarrow \theta \rightarrow z \rightarrow r$ ), et un signe - sinon :



$$\begin{aligned} \vec{u}_x \wedge \vec{u}_y &= \\ \vec{u}_y \wedge \vec{u}_x &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{u}_y \wedge \vec{u}_z &= \\ \vec{u}_z \wedge \vec{u}_y &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{u}_z \wedge \vec{u}_x &= \\ \vec{u}_x \wedge \vec{u}_z &= \end{aligned}$$

Ces données permettent de calculer n'importe quel produit vectoriel exprimé dans une BOND :

$$\vec{a} \wedge \vec{b} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phantom{a_x} \\ \phantom{a_y} \\ \phantom{a_z} \end{pmatrix}$$

**♥ Démonstration M5.1 : Produit vectoriel**

Le résultat quelconque n'est pas à connaître, et doit toujours se redémontrer :

## II La force de LORENTZ

### II/A Généralités

#### II/A)1 Définition

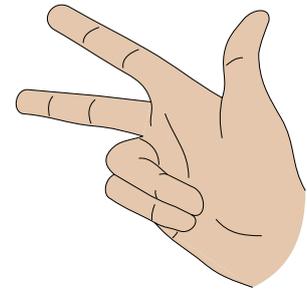
##### ♥ Définition M5.4 : Force de LORENTZ

La force subie par une charge  $q$  plongée dans un champ électrique  $\vec{E}$  et un champ magnétique  $\vec{B}$  est appelée **force de LORENTZ**, telle que

avec  $\vec{F}_e$  et  $\vec{F}_m$  et

$\Leftrightarrow$

On appelle  $\vec{F}_e$  la **force électrique** et  $\vec{F}_m$  la **force magnétique**.



**FIGURE M5.5** – Règle de la main droite

#### II/A)2 Comparaison au poids

##### ♥ Propriété M5.2 : Poids vs. LORENTZ

Dans les problèmes incluant des particules chargées, on négligera toujours le poids devant la force de LORENTZ.

##### Démonstration M5.2 : Poids vs. LORENTZ

Pour un proton dans des conditions standard de laboratoire :

### II/B Aspects énergétiques

#### II/B)1 Puissance de la force de LORENTZ

##### ♥ Propriété M5.3 : Puissance de LORENTZ

La force magnétique a une puissance nulle, donc on a

Ainsi, un champ magnétique ne peut pas accélérer ou ralentir une particule chargée mais ne peut que la dévier.

### ♥ Démonstration M5.3 : Puissance de LORENTZ

La puissance de la force de LORENTZ est :

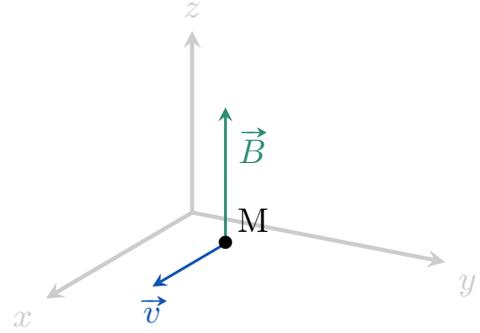


FIGURE M5.6

Ainsi, seule la **force électrique peut faire varier l'énergie cinétique**, et donc la vitesse, d'une particule chargée ; la force magnétique peut changer sa **direction mais pas sa norme**.

II/B) 2 Énergie potentielle

### ♥ Propriété M5.4 : Énergie potentielle électrique

La force de LORENTZ électrique est **conservative**, donc dérive d'une énergie potentielle  $\mathcal{E}_{p,e}$  :

### Démonstration M5.4 : Énergie potentielle électrique

Le champ magnétique ne travaillant pas, on s'intéresse au travail élémentaire de la force électrique. Supposons un champ électrique  $\vec{E} = E\vec{u}_z$  :

II/B) 3 Potentiel électrostatique

### ♥ Propriété M5.5 : Potentiel électrostatique

Le champ  $\vec{E}$  dérive d'une grandeur scalaire, appelée **potentiel électrique** et notée  $V(x,y,z)$ , telle que :

### ♥ Démonstration M5.5 : Potentiel électrostatique

On retrouve alors les notions du début d'année en électrocinétique :

**♥ Définition M5.5 : Tension**

La **tension** entre deux points A et B est la **différence de potentiel** entre ces deux points :

**♥ Propriété M5.6 : Tension et champ électrique**

En appliquant une tension  $U$  entre deux grilles planes parallèles et distantes de  $d$ , on obtient un champ électrique **perpendiculaire** aux grilles, dirigé vers les potentiels **décroissants** (de  $\oplus$  à  $\ominus$ ) de norme

**♥ Démonstration M5.6 : Tension et champ électrique**

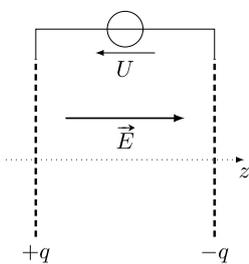


FIGURE M5.7

**♥ Remarque M5.1 : Comparaison  $\vec{E}$  et  $\vec{g}$**

La situation avec un champ  $\vec{E}$  est en essence tout à fait similaire à celle du poids, provenant d'un champ gravitationnel :

	Poids	Force électrique
Force		
Énergie potentielle		
Sens des champs		
Sens des forces		

**III Mouvement dans un champ électrique** (stationnaire et uniforme)

**III/A Situation générale**

**♥ Propriété M5.7 : Mouvement général en champ  $\vec{E}$**

Les équations scalaires du mouvement d'une particule de charge  $q$  dans un champ électrique  $\vec{E}$  sont semblables à celle d'un corps non chargé de masse  $m$  dans le champ de pesanteur  $\vec{g}$ .

### ♥ Démonstration M5.7 : Mouvement général en champ $\vec{E}$

1 **Système** : {particule} de masse  $m$  de charge  $q$  dans un champ  $\vec{E}$ .

2 **Schéma** : ci-contre.

3 **Modélisation** :  $\mathcal{R}_{\text{labo}}$  supposé galiléen

◇ Repère : cartésien,  $\vec{u}_z \perp$  grilles, soit  $\vec{E} = E\vec{u}_z$  avec  $E = U/d$ ;

◇ Repérage :

◇ Instant initial : la particule part de  $z = 0$ ,  $\vec{OM}(0) = \vec{0}$

FIGURE M5.8 –  
Situation générale

4 **BDF** :

5 **PFD** :

## III/B Accélération d'une particule chargée

### ♥ Propriété M5.8 : Particule $\vec{v}_0 \parallel \vec{E}$

Une particule **chargée positivement** et lâchée depuis  $z = 0$  à la vitesse  $\vec{v}_0$  dans le sens d'un **champ électrique** est **accélérée**, et sa vitesse finale en  $z = d$  s'exprime :

### ♥ Démonstration M5.8 : Particule $\vec{v}_0 \parallel \vec{E}$

Comme le système est **conservatif** et qu'on s'intéresse à un instant précis du mouvement, il est plus astucieux d'utiliser le **TEM** plutôt que le PFD :

◇ En  $z = 0$  :

◇ En  $z = d$  :

◇ **TEM** :

⋮

Or, pour une chute sans frottement avec  $\vec{v}_0 = \vec{0}$  dans le champ  $\vec{g}$ , on avait trouvé

### ♥ Remarque M5.2 : Accélération rectiligne

◇ En faisant l'application numérique pour un proton de charge  $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ , de masse  $m = 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$  partant de  $v_0 = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et accéléré par  $U = 1 \text{ kV}$ , on trouve

◇ L'électron-volt est une unité d'énergie, telle que

$$1,602 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = e \times 1 \text{ V}$$

C'est l'énergie cinétique que gagne un électron (ou un proton) accéléré par une tension de 1 V. Dans les accélérateurs de particules modernes, on touche au TeV.

◇ Si  $U < 0$  ou  $q < 0$ , on peut **ralentir** la particule chargée. Elle peut même **faire demi-tour** si  $\Delta\mathcal{E}_p > \mathcal{E}_c(0)$ . Dans le cas du champ  $\vec{g}$ , c'est le cas du lancer vertical d'un corps de masse  $m$ .

## III/C Déviation d'une particule chargée

### ♥ Propriété M5.9 : Déviation particule $\vec{v}_0 \perp \vec{E}$

Une particule chargée positivement et lancée perpendiculairement à un champ électrique est déviée, et son angle final est proportionnel à  $U$ .

### ♥ Démonstration M5.9 : Déviation particule $\vec{v}_0 \perp \vec{E}$

Prenons  $\vec{v}_0 = v_0 \vec{u}_x$  et  $\vec{E} = E \vec{u}_z$ , avec  $E = U/d$ . On reprend le résultat obtenu dans la situation générale (III/A) et on intègre :

On trouve alors l'équation de la trajectoire :

C'est une trajectoire parabolique, en tout point **similaire à la chute libre**. On peut alors déterminer l'angle de déviation  $\alpha_f$  une fois qu'elle a quitté le champ  $\vec{E}$  :

**FIGURE M5.9** –  
Déviation pour  $q > 0$

### Exemple M5.2 : Oscilloscope analogique.

Un faisceau d'électrons de vitesse initiale fixée (grâce à un accélérateur linéaire) est dévié par la tension de mesure. Cette déviation est proportionnelle à la tension mesurée. En utilisant un écran fluorescent, on visualise l'impact des électrons et ainsi la tension mesurée en balayant l'écran à une vitesse déterminée par le calibre temporel.

## IV Mouvement dans un champ magnétique (stationnaire et uniforme)

### IV/A Vitesse initiale parallèle au champ $\vec{B}$

#### Propriété M5.10 : Particule $\vec{v}_0 \parallel \vec{B}$

Une particule chargée de vitesse initiale colinéaire au champ magnétique a un mouvement rectiligne uniforme.

#### Démonstration M5.10 : Particule $\vec{v}_0 \parallel \vec{B}$

1

### IV/B Vitesse initiale perpendiculaire au champ $\vec{B}$

#### IV/B) 1 Trajectoire

#### ♥ Propriété M5.11 : Trajectoire particule $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$

Une particule chargée dans un champ  $\vec{B}$  perpendiculaire à sa vitesse initiale  $\vec{v}_0$  décrit un cercle de rayon cyclotron  $R_c = \frac{mv_0}{|q|B}$ .

#### ♥ Démonstration M5.11 : Trajectoire $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$ par FRENET

- 1 Système : {particule} de masse  $m$  de charge  $q$  soumis à  $\vec{F}_m$
- 2 Schéma : ci-contre situation initiale.
- 3 Modélisation :
  - ◇ Référentiel :  $\mathcal{R}_{\text{labo}}$  supposé galiléen
  - ◇ Repère :
  - ◇ Repérage :

Or,

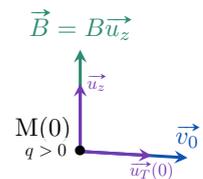


FIGURE M5.10 – Schéma initial.

1. Une démonstration complète demande plus de rigueur et se fait par projection, cf. propriété suivante.

4 BDF :

5 PFD :

**Planéité**

Or, ■

Autrement dit,  $(\vec{u}_T(0), \vec{u}_N(0))$  donne le plan de la trajectoire  $\forall t$  : **la trajectoire de  $M(t)$  s'effectue dans le plan constant perpendiculaire à  $\vec{B}$ !**

**Circularité**

En reprenant le PFD en norme, on a

La trajectoire est donc un **cercle** de rayon constant  $R_c$ .

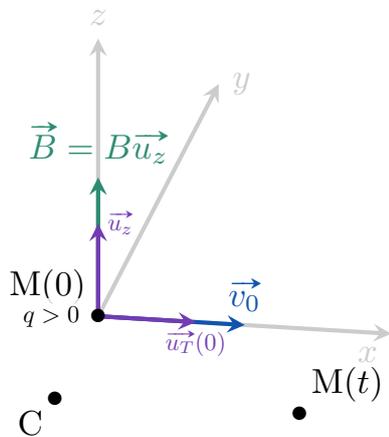


FIGURE M5.11

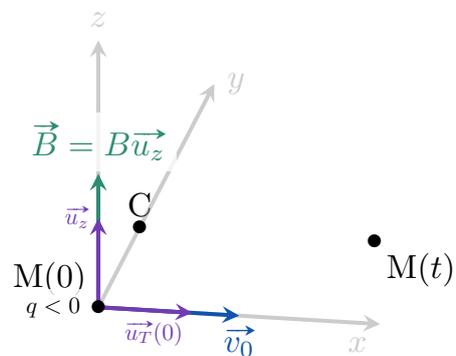


FIGURE M5.12

IV/B) 2 Solution horaire

♥ **Propriété M5.12 : Mouvement particule  $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$**

Le mouvement d'une particule chargée dans un champ  $\vec{B} \perp \vec{v}_0$  est :

un cercle de rayon cyclotron

parcouru à la pulsation cyclotron

♥ **Démonstration M5.12 : Mouvement particule  $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$**

1 **Système** : {particule} de masse  $m$  de charge  $q$  soumis à  $\vec{F}_m$

2 **Schéma** : ci-contre situation initiale.

3 **Modélisation** : dans  $\mathcal{R}_{\text{labo}}$  supposé galiléen,

◇ **Repère** :

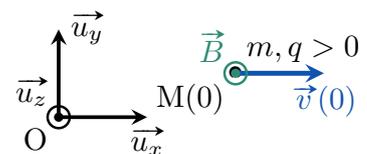


FIGURE M5.13 – Schéma

◇ Repérage :

◇ Conditions initiales :

4 BDF :

5 PDF :

Trajectoire

Ainsi, la trajectoire est bien circulaire :

de rayon

de centre

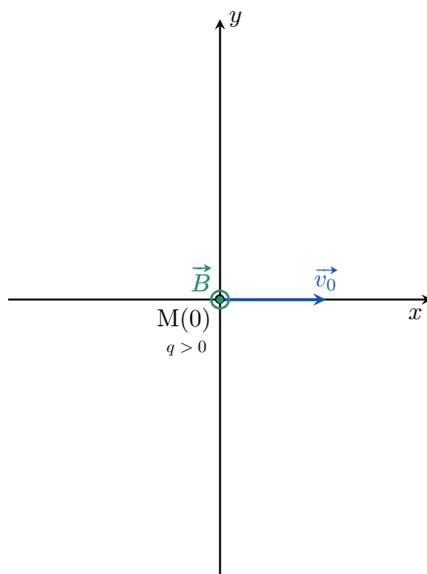


FIGURE M5.14

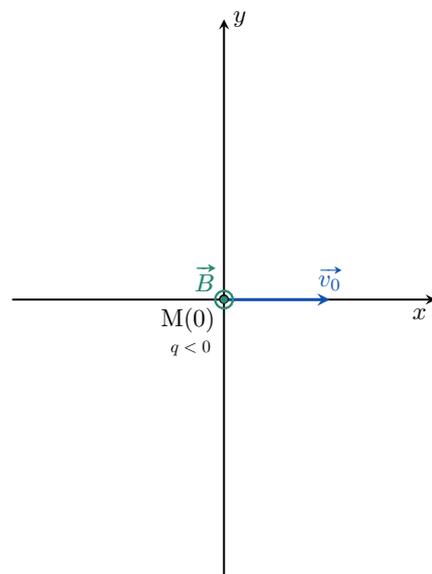


FIGURE M5.15

## Équations différentielles

En repartant du PFD et en procédant par substitution,

Ce sont des OH de pulsation propre

## Équations horaires

Solution générale  $x(t) = x_h(t)$  :

Solution générale  $y(t) = y_h(t) + y_p$  :

Et avec les conditions initiales

Et avec les conditions initiales


**Remarque M5.3 : Cas général  $\vec{v}_0$  dans  $\vec{B}$** 

Supposons  $\vec{v}_0 = v_{0,x}\vec{u}_x + v_{0,z}\vec{u}_z$ . Les équations découplent le mouvement dans le plan  $xy$  et selon  $z$  :

- ◇ Sur  $z$  on garde une vitesse constante :  $v_z(t) = v_{0,z}$  ;
- ◇ Pour les composantes sur  $x$  et  $y$ , on a  $v_x(t)^2 + v_y(t)^2 = v_{0,x}^2$  et les mêmes équations différentielles : le mouvement est un cercle de rayon  $R = \frac{v_{0,x}}{\omega_c}$ .

Ainsi, la trajectoire est la superposition d'une rotation circulaire uniforme autour de  $(Oz)$  et d'une translation le long de cet axe : c'est un **mouvement hélicoïdal**. Une animation est disponible en ligne<sup>2</sup>.

## IV/C Applications

- ◇ **Spectromètre de masse.** Un spectromètre de masse permet de **mesurer la masse d'atomes**, et éventuellement de déterminer les abondances isotopiques (utilisable par exemple pour la datation). Le principe est le suivant :

2. <https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Meca/Charges/general.php>

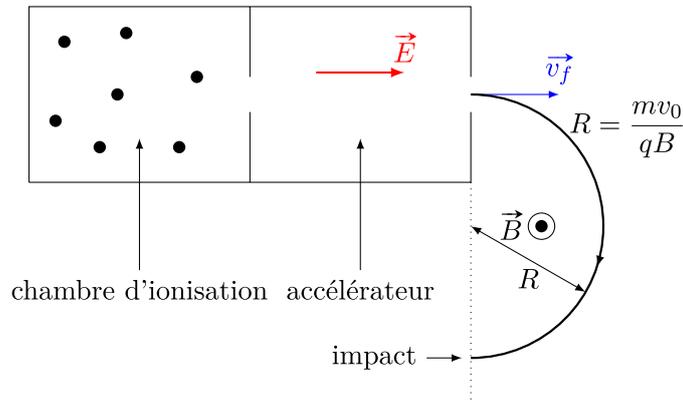


FIGURE M5.16 – Fonctionnement d'un spectromètre

- ▷ Des atomes sont ionisés dans une chambre d'ionisation ;
- ▷ Une ouverture fait sortir un flux de particules qui sont accélérées par un champ électrique, pour les amener à une vitesse  $v_f = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$  ;
- ▷ Un champ magnétique courbe ensuite leur trajectoire, avec un rayon

Ainsi, la donnée de la distance d'impact permet de retrouver la masse des particules !

◇ **Le cyclotron.** Il est constitué de deux demi-cylindres dans lequel règne un champ magnétique. Entre les deux demi-cylindres, deux électrodes imposent un champ électrique.

- ▷ La particule chargée est accélérée dans l'espace entre les cylindres ;
- ▷ Elle fait demi-tour grâce à un champ magnétique qui la fait revenir dans la zone entre-deux ;
- ▷ Avec un courant alternatif bien réglé, la tension accélère de nouveau la particule ;
- ▷ Le champ magnétique la fait revenir, et ainsi de suite.

À chaque demi-tour, l'énergie cinétique croît de  $|qU|$ . La vitesse croît donc comme la racine carrée du nombre de passages dans l'espace entre les cylindres.

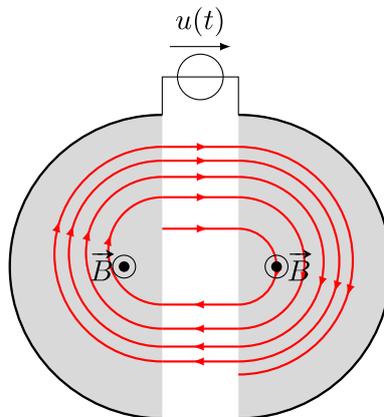
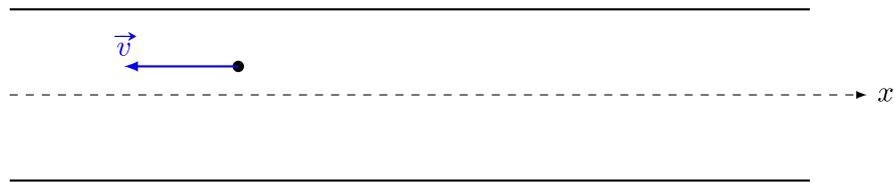


FIGURE M5.17 – Fonctionnement d'un cyclotron

Le rayon de courbure est proportionnel à la vitesse de la particule : la sélection de ce rayon permet la sélection de l'énergie cinétique voulue. Voir l'animation en ligne<sup>3</sup>.

3. [http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Meca/Charges/cyclotron.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Charges/cyclotron.php)

- ◇ **L'effet HALL.** On considère un fil parcouru par une intensité  $i$  vers la droite. Les électrons se déplacent en sens inverse, soit  $\vec{v} = -v\vec{u}_x$ . Si un champ magnétique est imposé selon  $\vec{u}_z$ , ils sont déviés selon  $-\vec{u}_y$  ( $q < 0$ ), et s'accumulent sur une paroi du fil. Un déséquilibre de charge s'installe, créant alors un champ appelé champ de HALL.



**FIGURE M5.18** – Effet HALL dans un fil

En régime permanent, la force résultant de ce champ de HALL compense la force magnétique :

donc

On mesure la tension entre la partie supérieure du conducteur et sa partie inférieure :

Ainsi, la mesure de  $U$  permet la mesure du champ  $B$  ! C'est le principe des teslamètres à effet HALL.