

## Partie 4 – Le magnétisme

### A. Le champ magnétique

### B. De la force magnétique au champ magnétique

- 1) Force magnétique sur une charge
- 2) Force magnétique sur un fil conducteur
- 3) Applications

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

- 1) Champ uniforme
- 2) Champ non uniforme (application au champ magnétique terrestre)

### D. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et un champ électrique - Force de Lorentz

- 1) Force de Lorentz
- 2) Cas simple (vitesse et champs orthogonaux)
- 3) Application : sélecteur de vitesse
- 4) Application : spectromètre de masse
- 5) Application : effet Hall

### E. Sources de champ magnétique

- 1) Fil conducteur — Loi de Biot et Savart
- 2) Règles de symétrie
- 3) Théorème d'Ampère
- 4) Dipôle magnétique
- 5) Aimantation, ferro- dia- et para-magnétisme
- 6) Champ magnétique terrestre
- 7) application IRM

## Partie 4 – Le magnétisme

### A. Le champ magnétique

#### Le magnétisme dans la nature

La première manifestation connue du magnétisme est le **ferromagnétisme**. Il s'agit de ce que l'on appelle communément l'**aimantation**, propriété que possèdent certains matériaux dans la nature, comme la **magnétite**  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , le fer, le nickel ou le cobalt (ainsi que leurs oxydes et alliages).

Ces matériaux sont composés de **dipôles magnétiques permanents** (notion que nous allons préciser).

Mais d'autres manifestations des forces magnétiques ont pu être mises en évidence dans le domaine des **courants électriques**, découverte que l'on doit au danois **Oersted** en 1819.

Nous établiront qu'une **charge en mouvement** subit une **force magnétique** (**force de Laplace**) lorsqu'elle évolue dans un champ magnétique, mais aussi que cette charge en mouvement est à l'origine de son propre champ magnétique (**loi de Biot et Savart**).

De la même manière que nous avons défini le champ électrique (= propriété vectorielle de l'espace), nous pourrions définir le champ magnétique créé par un aimant autour de lui, ou celui créé par un courant électrique.

A priori, il n'y a **aucune comparaison de nature entre un aimant et des électrons qui se déplacent le long d'un conducteur**.

Existe-t-il deux types de champ magnétique : aimantation et électrocinétique ?

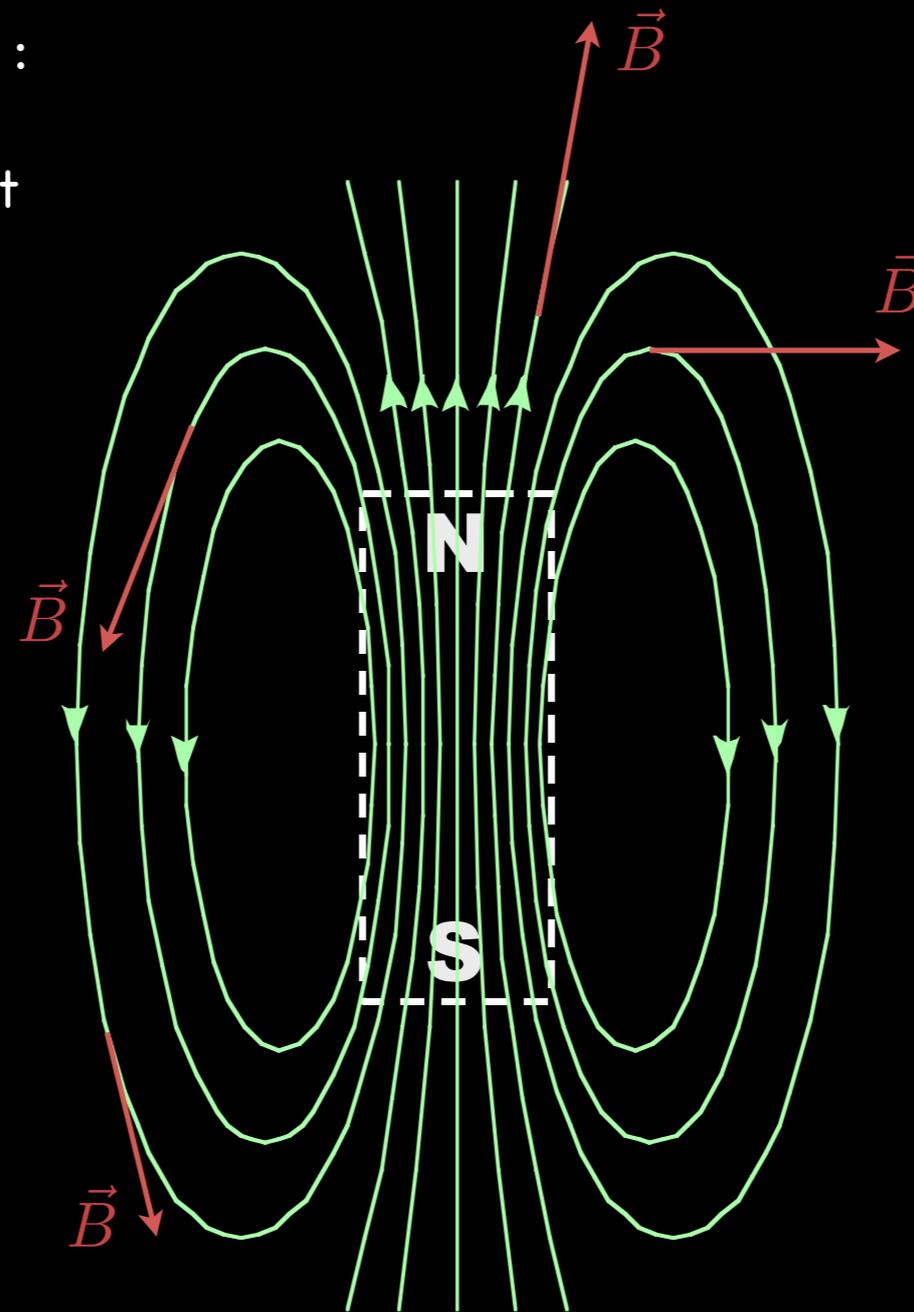
De quelle nature est le champ magnétique terrestre ?

Sur quel type d'objet et à quelle condition un champ magnétique est-il responsable d'une force magnétique ?

# Partie 4 – Le magnétisme

## A. Le champ magnétique

Exemple de champ magnétique :  
lignes de champ du champ  
magnétique créé par un aimant



## Partie 4 – Le magnétisme

### B. De la force magnétique au champ magnétique

#### 1) Force magnétique sur une charge

## Force de Laplace

Force magnétique agissante sur une charge électrique placée dans un champ magnétique

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

$q$  charge électrique

$\vec{v}$  vitesse de translation de la charge

$\vec{B}$  champ magnétique

Travail de la force magnétique pour un déplacement  $\vec{dl}$

$$dW = \vec{F} \cdot \vec{dl} = 0$$

## Partie 4 – Le magnétisme

### B. De la force magnétique au champ magnétique

#### 2) Force magnétique sur un conducteur

## Force de Laplace

Force magnétique agissante sur un segment de fil électrique :

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

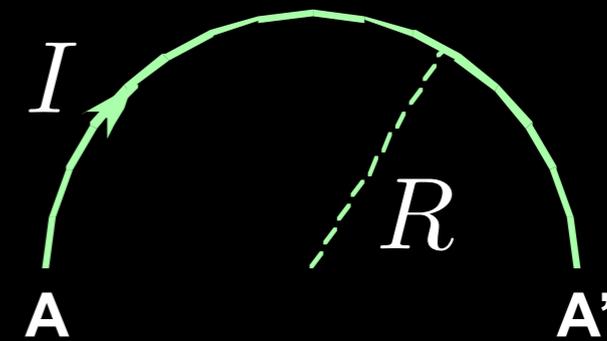
$I$  courant électrique dans le segment

$\vec{l}$  longueur du segment (sens  $I > 0$ )

$\vec{B}$  champ magnétique

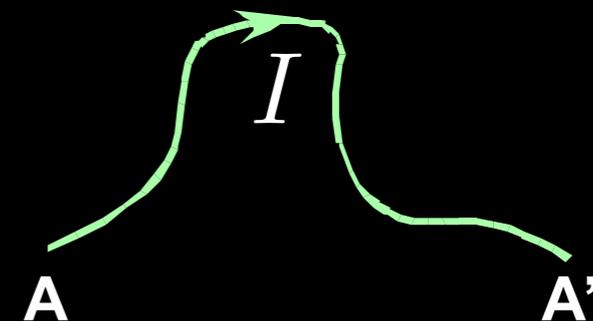
démo

Force de Laplace s'exerçant sur une demi-boucle de courant



$$F = (2R)IB$$

Force magnétique s'exerçant sur une portion de circuit quelconque



$$F = (AA') \cdot IB$$

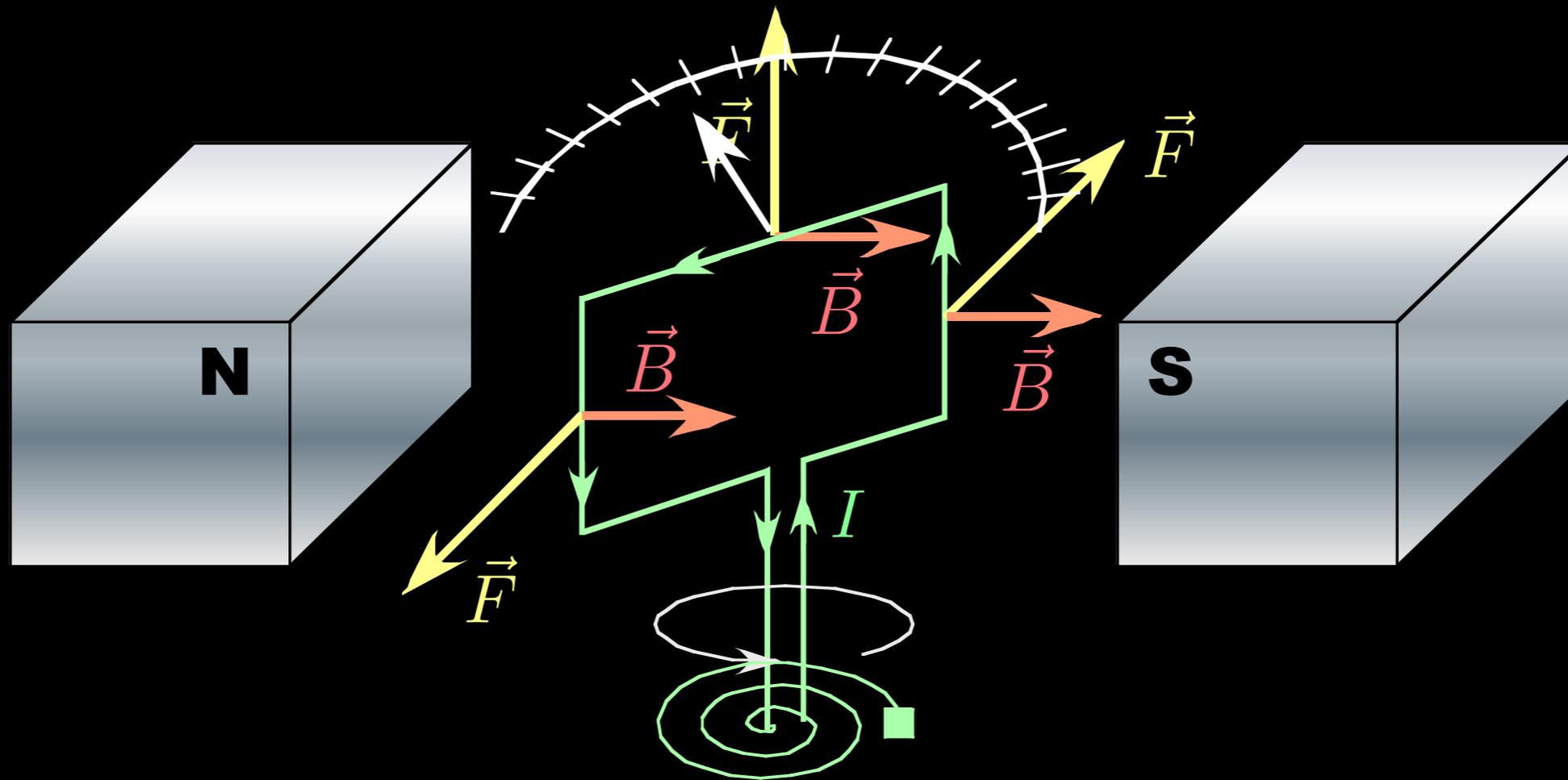
## Partie 4 – Le magnétisme

### B. De la force magnétique au champ magnétique

#### 3) application

Application : ampèremètre  
ou galvanomètre à cadre mobile

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$



## Partie 5 – Le magnétisme

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

Force magnétique agissant sur une charge électrique placée dans un champ magnétique

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

$q$  charge électrique

$\vec{v}$  vitesse de translation de la charge

$\vec{B}$  champ magnétique

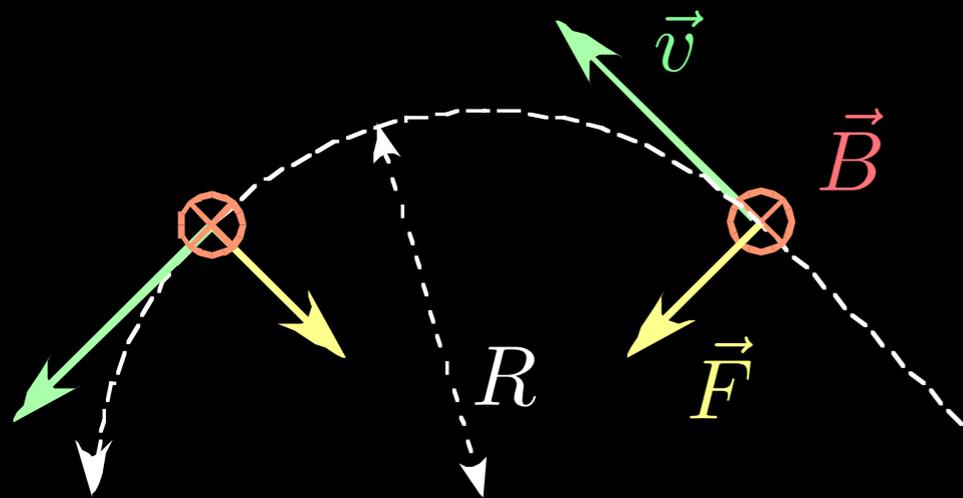
## Partie 5 – Le magnétisme

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

#### 1) Champ uniforme

Cas 1 : vitesse initiale  $\vec{v} \perp \vec{B}$

La charge est initialement en mouvement rectiligne uniforme. Quelle sera sa trajectoire lors de l'application d'un champ magnétique tel que  $\vec{v} \perp \vec{B}$



- la trajectoire est confinée dans le plan contenant  $\vec{v}$  et perpendiculaire à  $\vec{B}$

- théorème de l'énergie cinétique :

$$\frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = W_{\vec{F}} = \int \vec{F} \cdot \vec{dl} = 0$$

$$v_f = v_i$$

la vitesse est constante

- principe fondamental de la dynamique :  $F = qvB = m\gamma$

- force centripète  $\Rightarrow$  accélération centripète  $\Rightarrow$  mouvement circulaire uniforme :

$$\gamma = \frac{v^2}{R}$$

- rayon de la trajectoire circulaire :

$$R = \frac{mv}{qB}$$

- vitesse de révolution :  $v = \frac{2\pi R}{T}$  avec la période de révolution

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

- fréquence cyclotron :

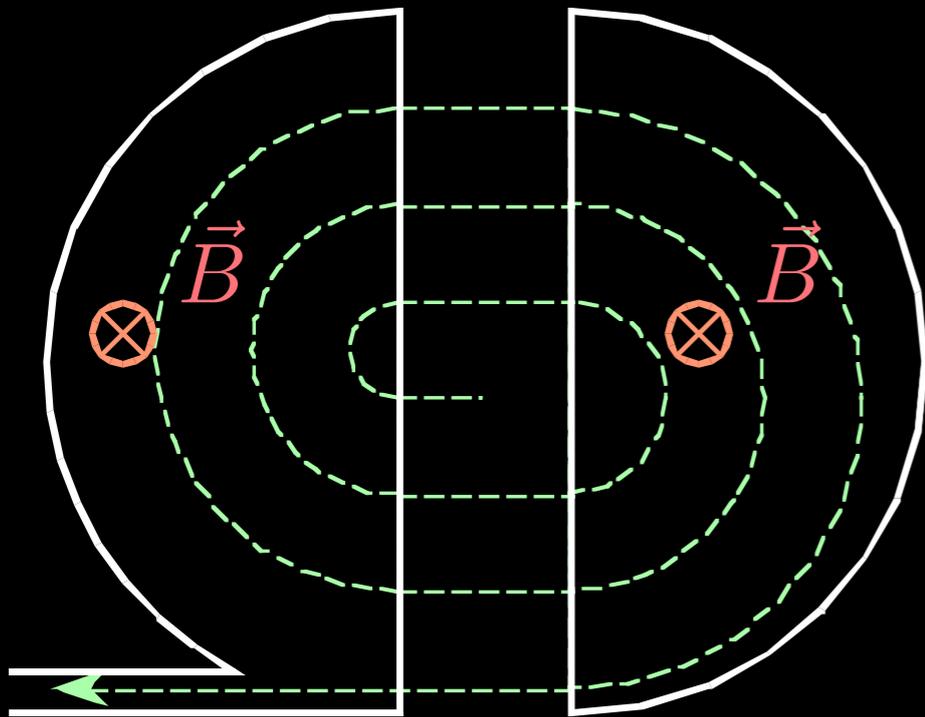
$$f_C = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$

## Partie 5 – Le magnétisme

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

#### 1) Champ uniforme

Application : le cyclotron, accélérateur de particule



- source de protons au centre, chaque demi-cylindre est le siège d'un champ magnétique uniforme et perpendiculaire au plan de la figure
- une différence de potentiel entre les deux demi-cylindres permet d'accélérer les protons lors de leur trajet rectiligne
- à chaque demi-période, la polarité est inversée pour accélérer les protons à nouveau
- vitesse en augmentation  $\Rightarrow$  rayon cyclotron en augmentation

- rayon de la trajectoire circulaire :

$$R = \frac{mv}{qB}$$

## Partie 5 – Le magnétisme

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

#### 1) Champ uniforme

Application : le synchrotron, un autre accélérateur de particule

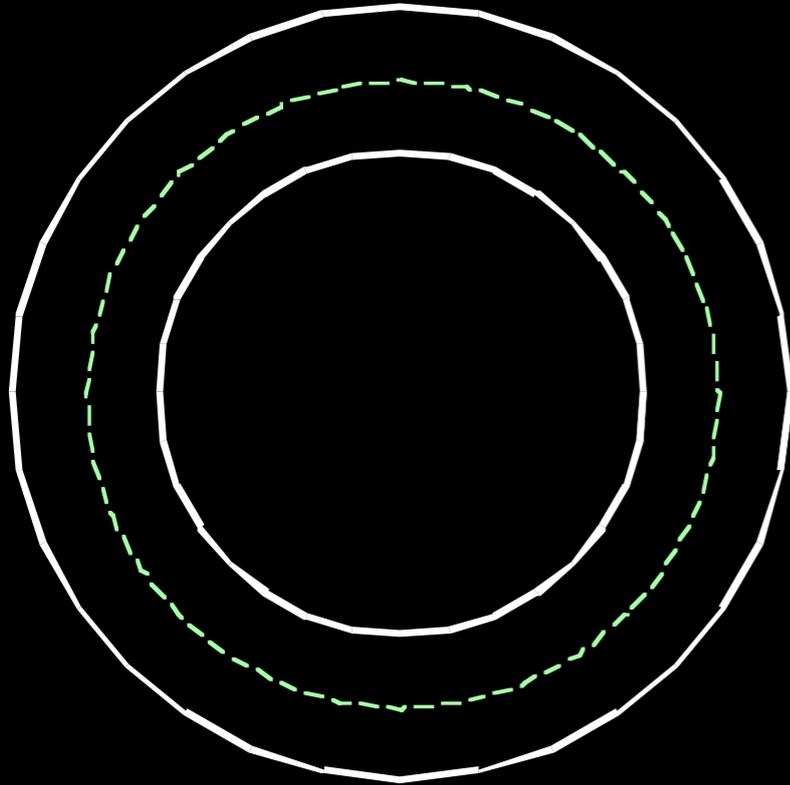


## Partie 5 – Le magnétisme

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

#### 1) Champ uniforme

Application : le synchrotron, un autre accélérateur de particule



- dans un synchrotron, l'accélération est aussi obtenue par une succession de différences de potentiels réparties dans une couronne circulaire.

- le champ magnétique est progressivement augmenté, avec la vitesse, pour que le rayon de la trajectoire soit constant.

- rayon de la trajectoire circulaire :

$$R = \frac{mv}{qB}$$

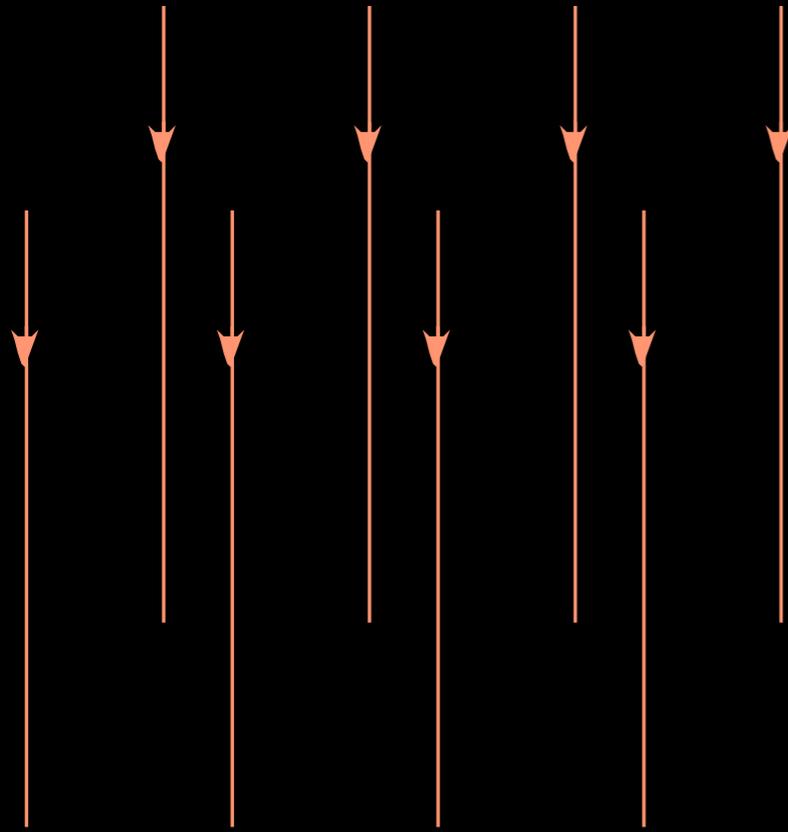


## Partie 5 – Le magnétisme

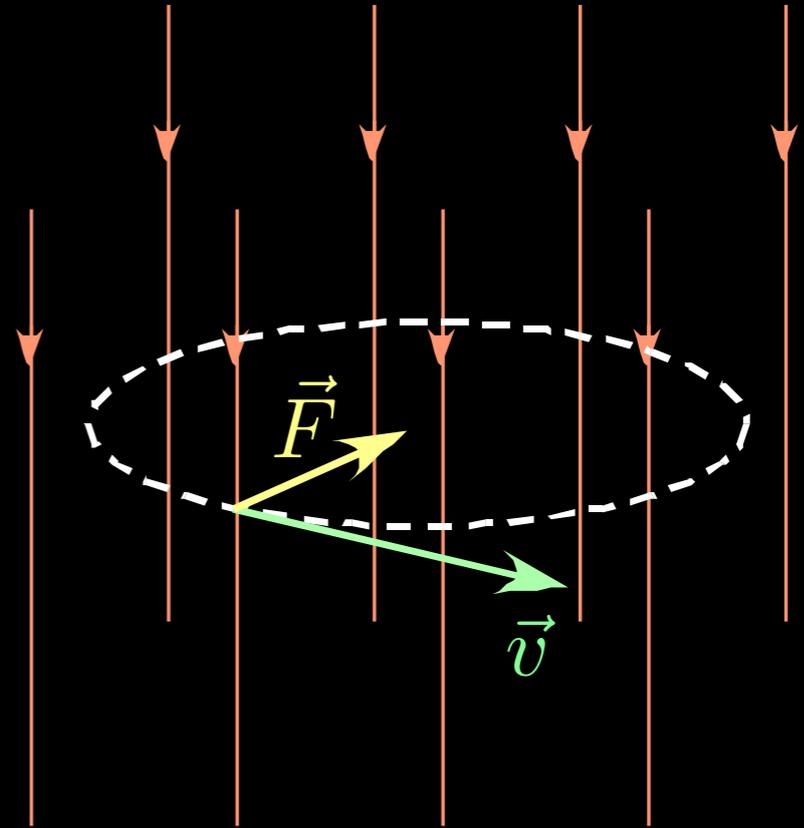
### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

#### 1) Champ uniforme

Cas 2 : vitesse initiale et champ  
non perpendiculaires



Cas 1 : vitesse initiale  $\vec{v} \perp \vec{B}$

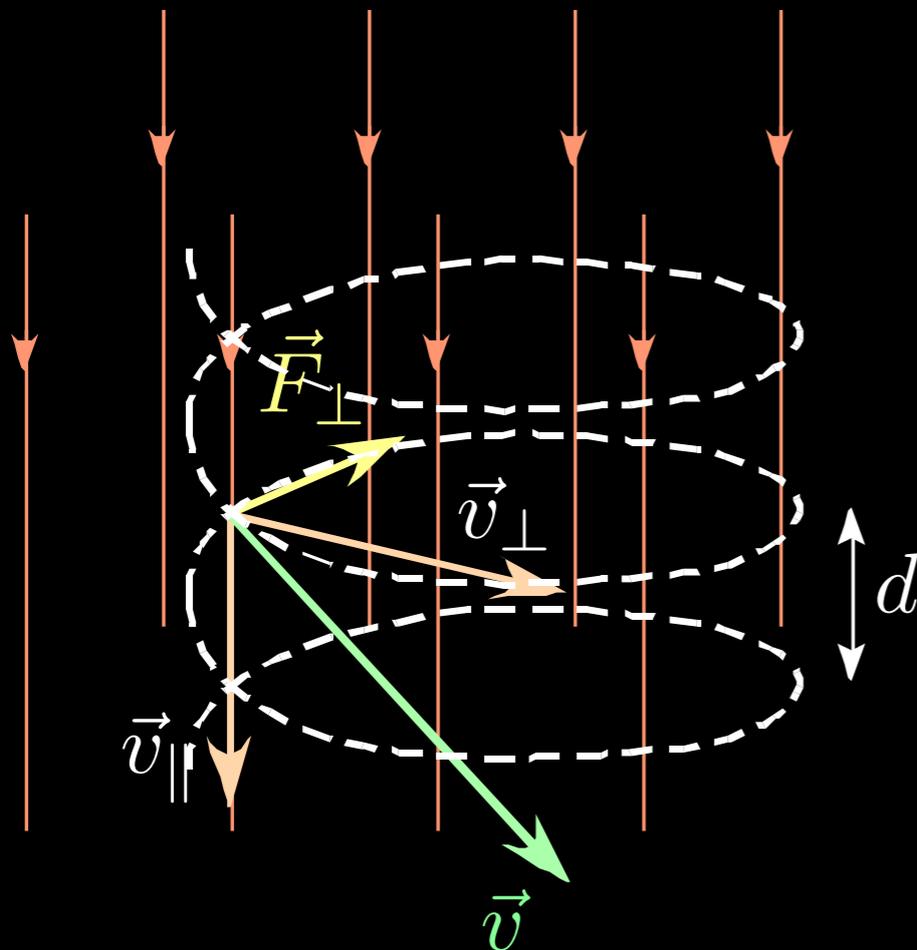


## Partie 5 – Le magnétisme

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

#### 1) Champ uniforme

Cas 2 : vitesse initiale et champ non perpendiculaires



- décomposition de la vitesse :  $\vec{v} = \vec{v}_{\perp} + \vec{v}_{\parallel}$

- la composante de vitesse perpendiculaire aux lignes de champ engendre la force :

$$\vec{F}_{\perp} = q\vec{v}_{\perp} \times \vec{B}$$

=> mouvement circulaire

- la composante de vitesse parallèle aux lignes de champ n'engendre aucune force :

$$\vec{F}_{\parallel} = q\vec{v}_{\parallel} \times \vec{B} = 0$$

mais elle donne lieu à un mouvement de translation de la charge parallèle aux lignes de champ.

- la combinaison est un **mouvement hélicoïdal**

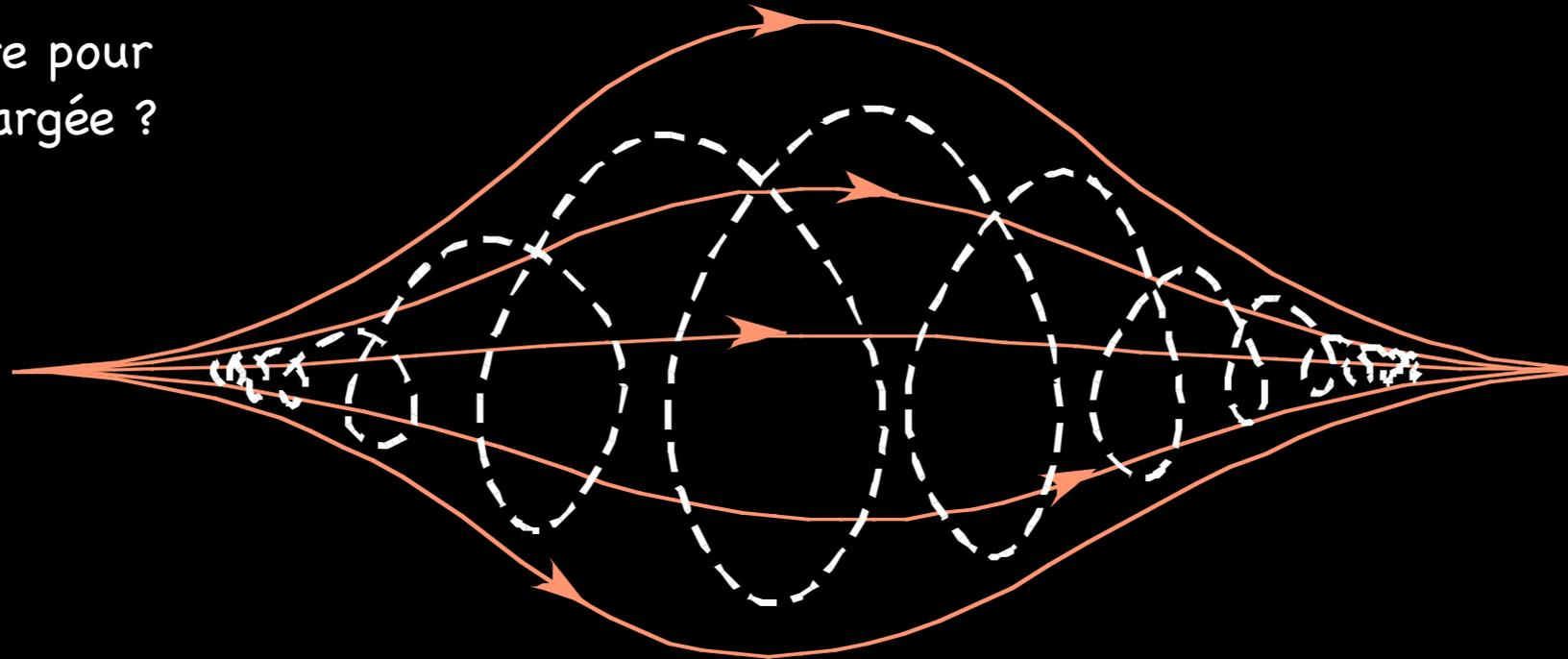
- pas de l'hélice :  $d = v_{\parallel} \cdot T$  avec  $T = \frac{2\pi m}{qB}$

## Partie 5 – Le magnétisme

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

#### 2) Champ non uniforme

Quelle trajectoire pour une particule chargée ?



La force magnétique, en un point de la trajectoire, est dirigée vers la zone où le champ magnétique est le plus faible.

Si la particule chargée se dirige vers une zone où  $B$  augmente, la composante de sa vitesse qui est parallèle aux lignes de champ diminue, jusqu'à s'annuler... puis s'inverser !

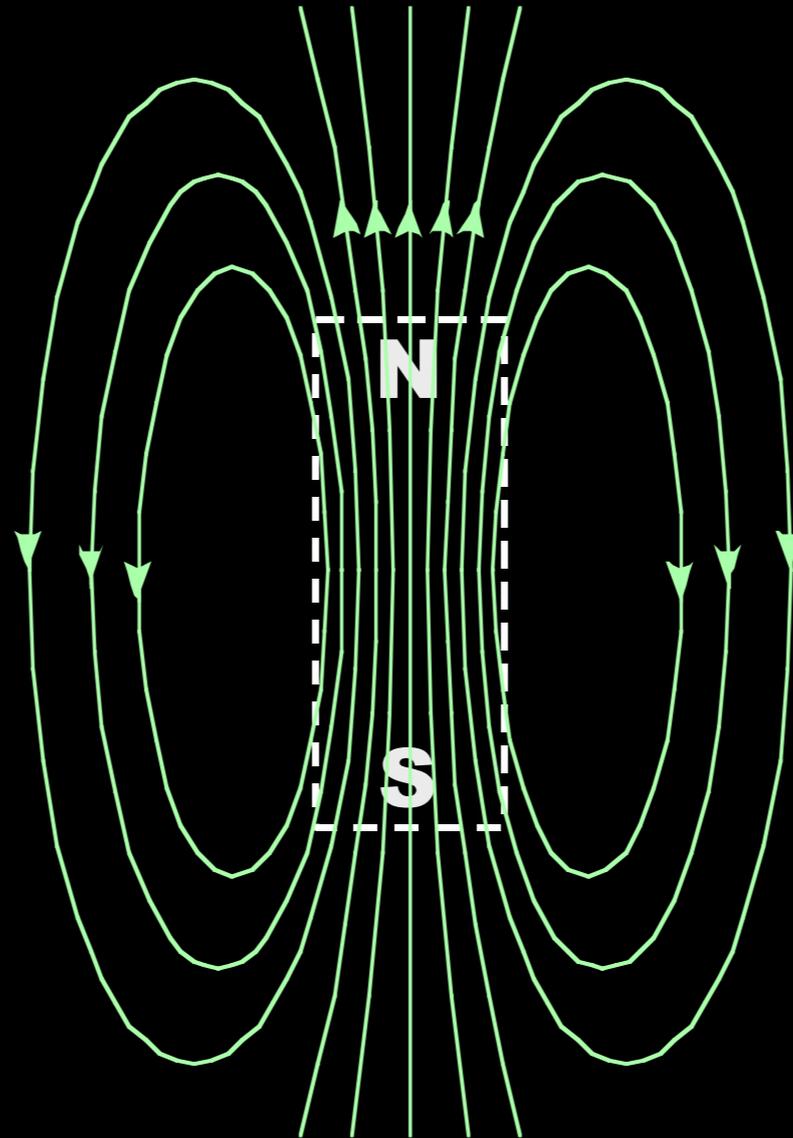
C'est le principe d'une "bouteille" magnétique, qui permet de confiner un plasma (gaz ionisé à température très élevée) sans lui faire toucher une paroi (qui refroidirait le plasma ou serait détruite).

## Partie 5 – Le magnétisme

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

#### 2) Champ non uniforme

Exemple de "bouteille" magnétique :  
le dipôle magnétique

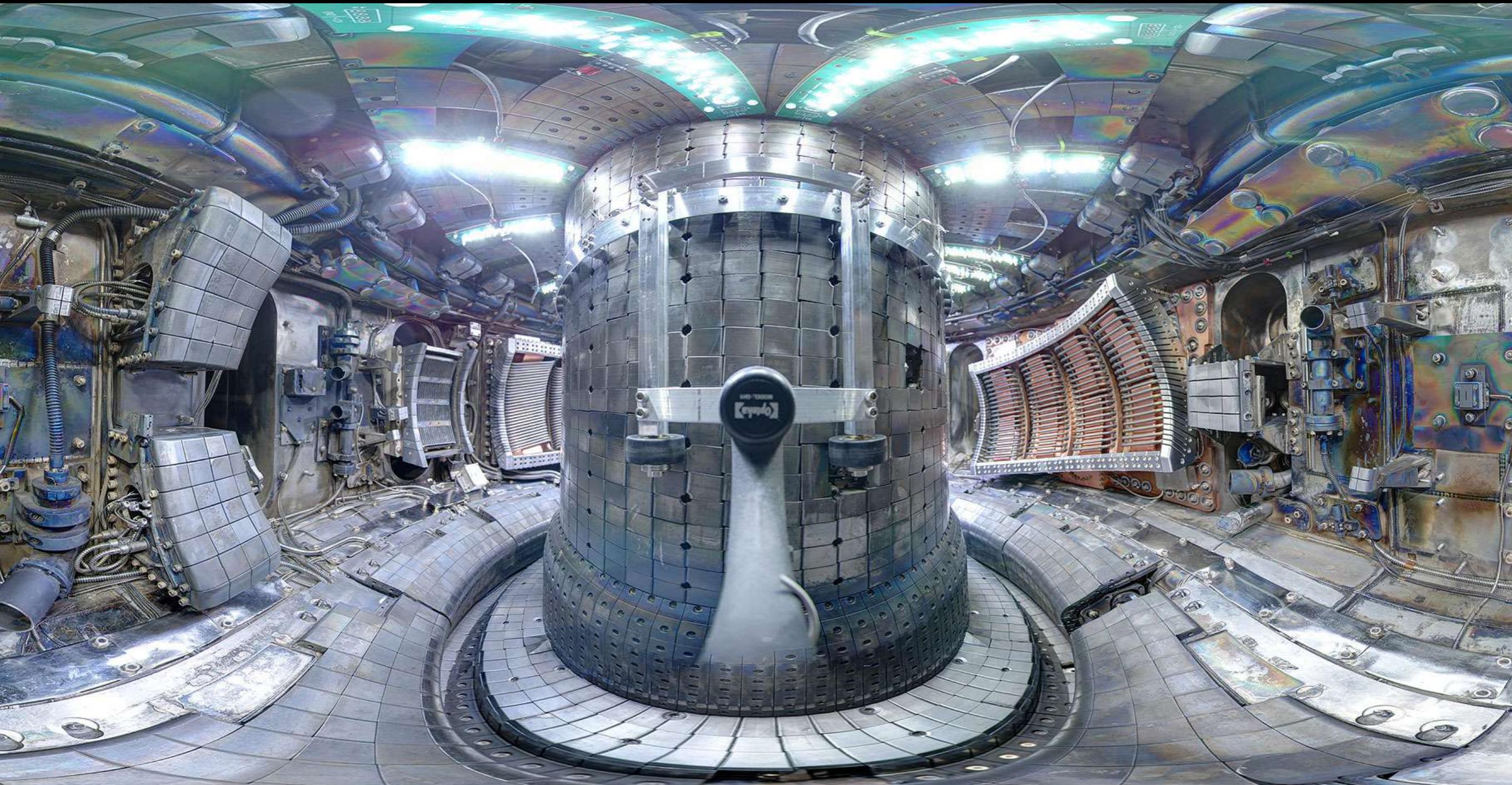


## Partie 5 – Le magnétisme

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

#### 2) Champ non uniforme

Production d'énergie par fusion de  
noyaux d'hélium : projet ITER

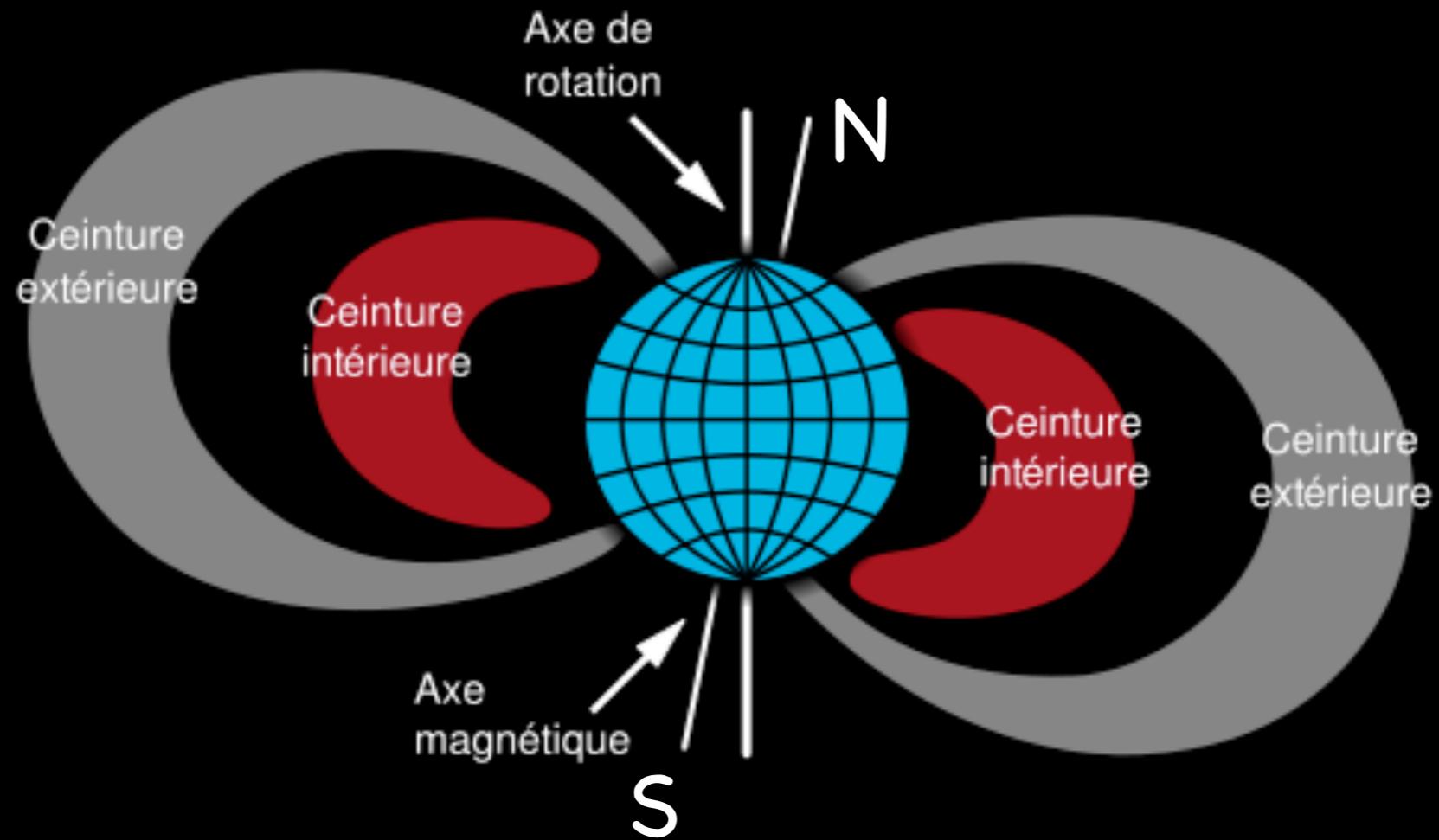


## Partie 5 – Le magnétisme

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

#### 2) Champ non uniforme

#### Ceintures de Van Allen

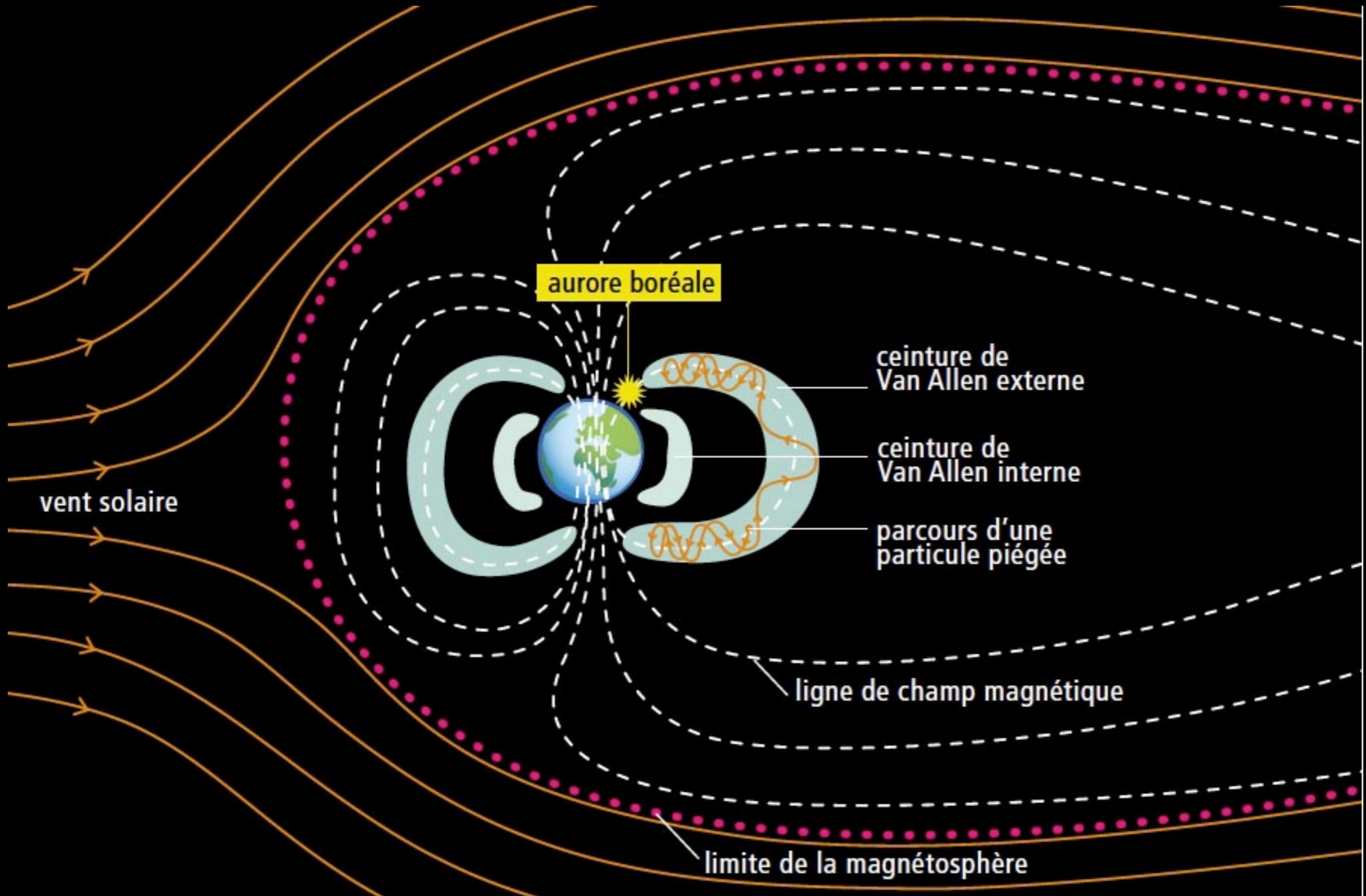


## Partie 5 – Le magnétisme

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

#### 2) Champ non uniforme

#### Ceintures de Van Allen



## Partie 4 – Le magnétisme

### A. Le champ magnétique

### B. De la force magnétique au champ magnétique

- 1) Force magnétique sur une charge
- 2) Force magnétique sur un fil conducteur
- 3) Applications

### C. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique

- 1) Champ uniforme
- 2) Champ non uniforme (application au champ magnétique terrestre)

### D. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et un champ électrique - Force de Lorentz

- 1) Force de Lorentz
- 2) Cas simple (vitesse et champs orthogonaux)
- 3) Application : sélecteur de vitesse
- 4) Application : spectromètre de masse
- 5) Application : effet Hall

### E. Sources de champ magnétique

- 1) Fil conducteur — Loi de Biot et Savart
- 2) Règles de symétrie
- 3) Théorème d'Ampère
- 4) Dipôle magnétique
- 5) Aimantation, ferro- dia- et para-magnétisme
- 6) Champ magnétique terrestre
- 7) application IRM

## Partie 5 – Le magnétisme

### D. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et un champ électrique - Force de Lorentz

#### 1) Force de Lorentz

#### Force électromagnétique ou de Lorentz

Une charge  $q$  possédant une vitesse  $\vec{v}$  est placée dans une région de l'espace où règnent un champ électrique  $\vec{E}$  et un champ magnétique  $\vec{B}$

Cette charge subit deux forces :

- une force de Coulomb :  $\vec{F}_E = q \cdot \vec{E}$  qui engendre un mouvement parabolique
- une force magnétique :  $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$  qui engendre un mouvement hélicoïdal

---

dans le cas général, le mouvement résultant est complexe.

La résultante est une force électromagnétique appelée force de Lorentz :

$$\vec{F} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

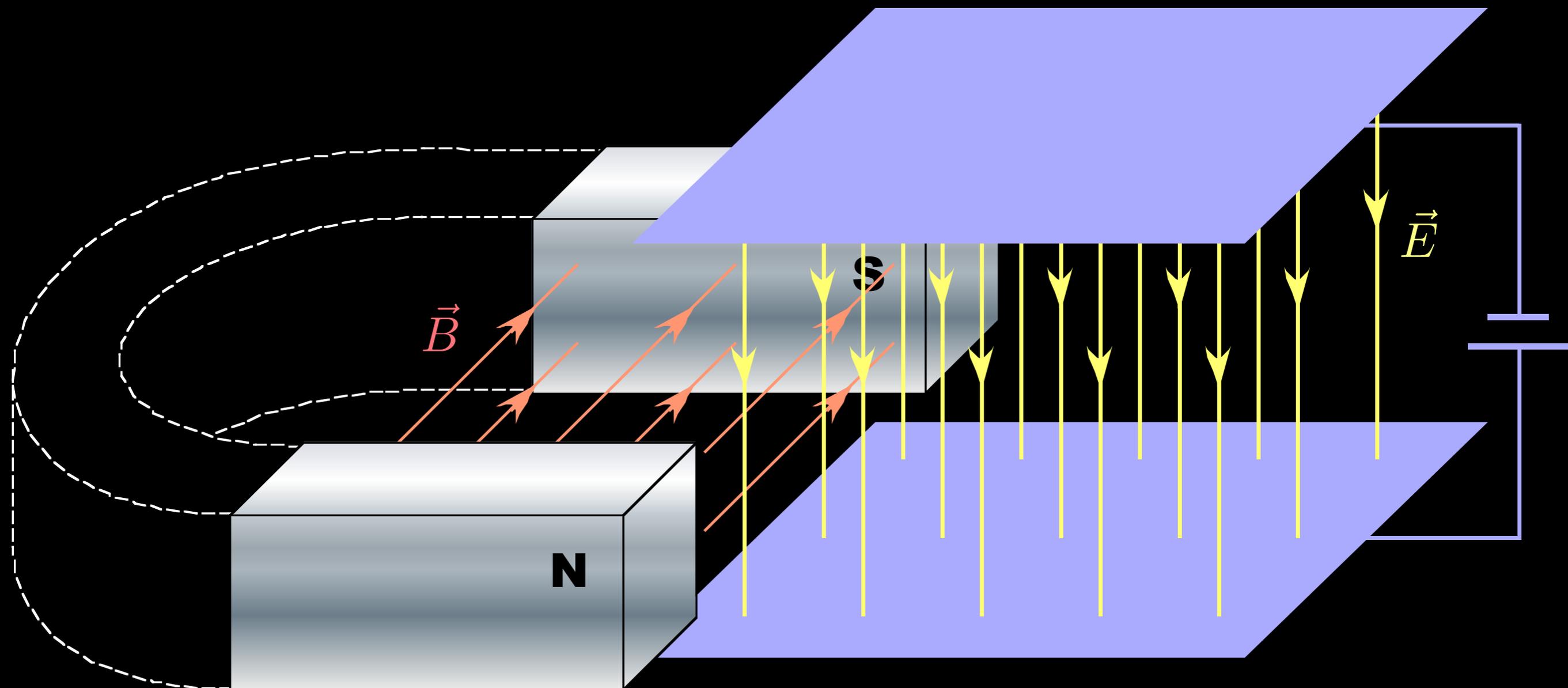
Un cas simple :  $\vec{v} \perp \vec{E} \perp \vec{B}$  (les 3 vecteurs forment un trièdre orthogonal)

## Partie 5 – Le magnétisme

### D. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et un champ électrique - Force de Lorentz

#### 2) Cas simple :

Un cas simple :  $\vec{v} \perp \vec{E} \perp \vec{B}$  (les 3 vecteurs forment un trièdre orthogonal)

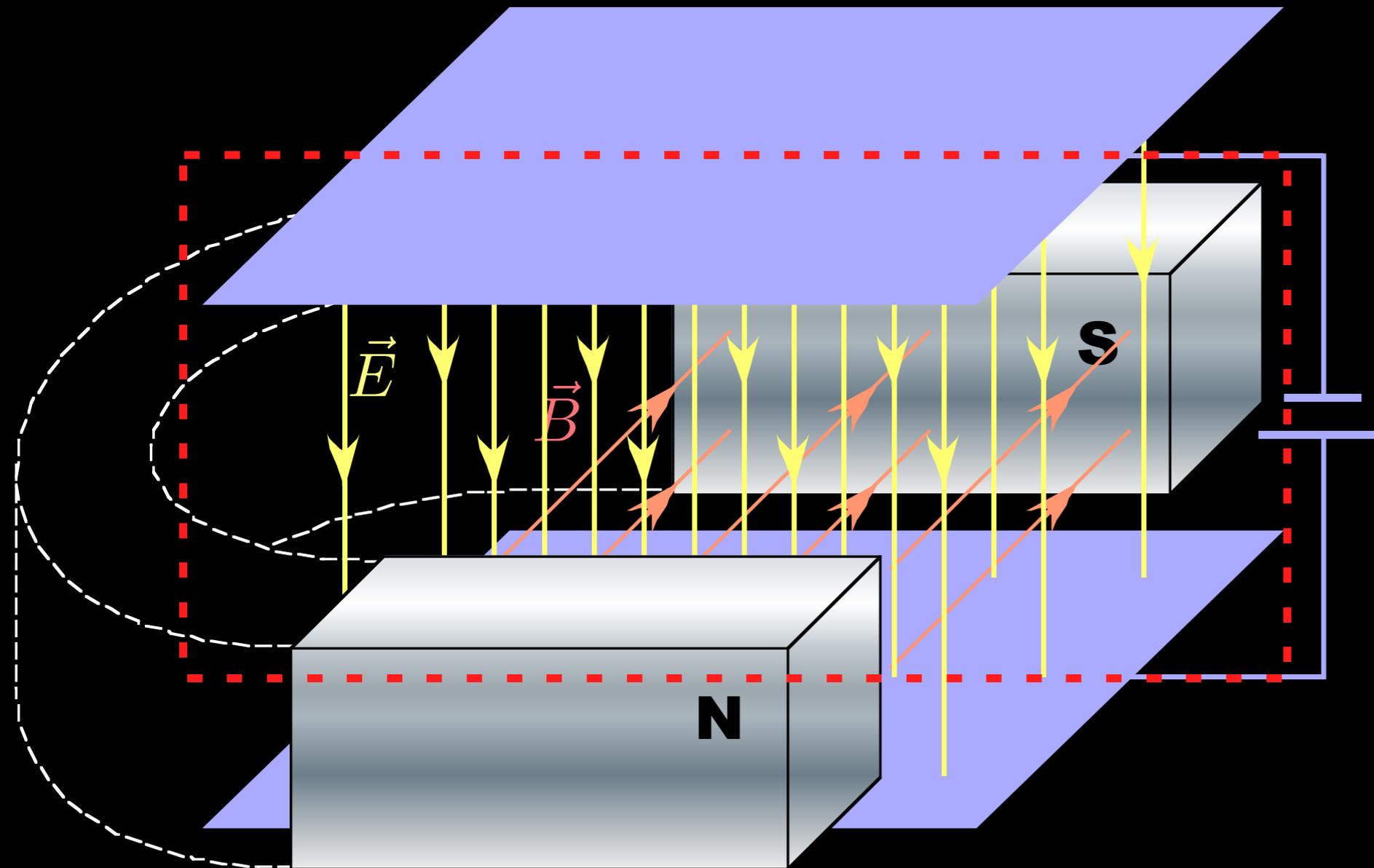


## Partie 5 – Le magnétisme

### D. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et un champ électrique - Force de Lorentz

#### 2) Cas simple :

Un cas simple :  $\vec{v} \perp \vec{E} \perp \vec{B}$  (les 3 vecteurs forment un trièdre orthogonal)



## Partie 5 – Le magnétisme

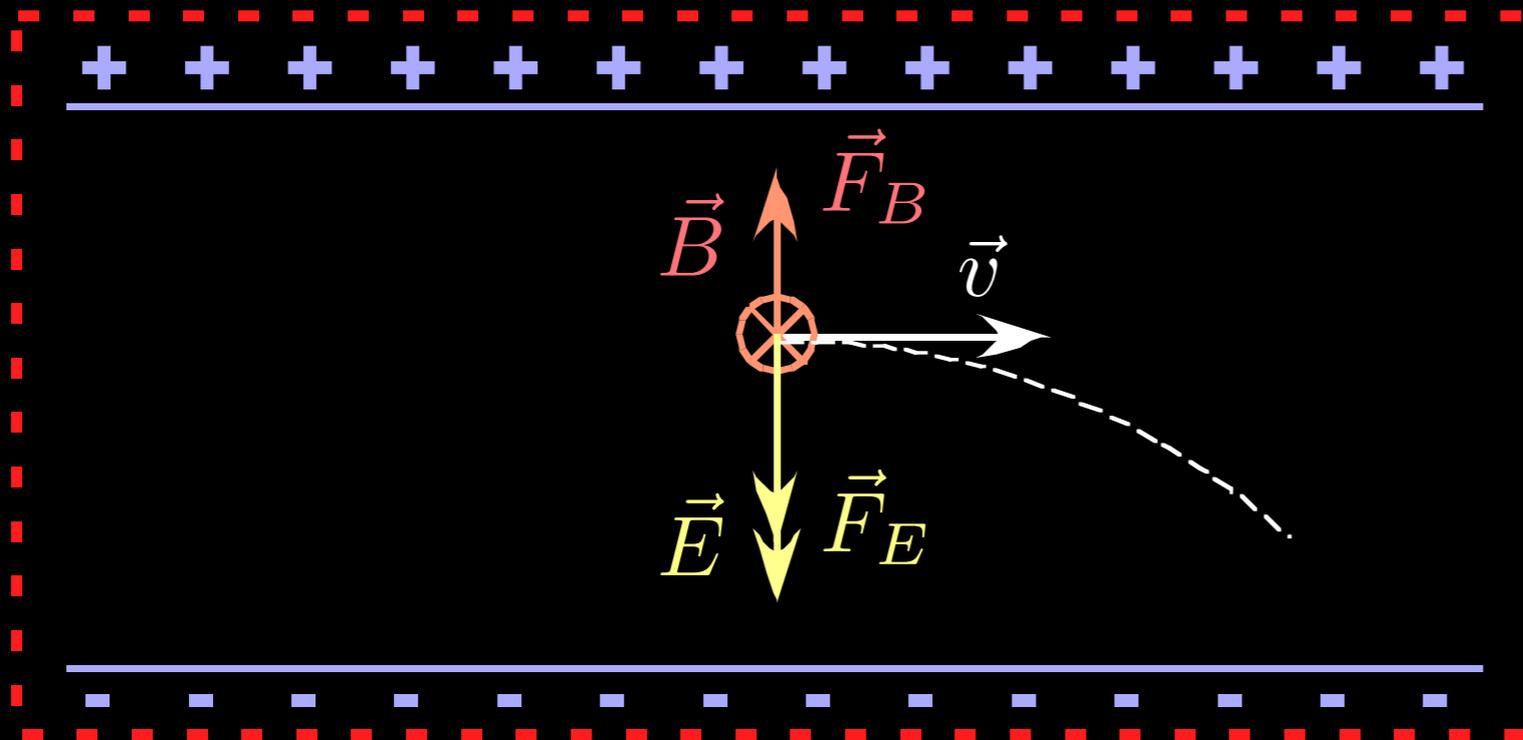
### D. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et un champ électrique - Force de Lorentz

#### 2) Cas simple :

Un cas simple :  $\vec{v} \perp \vec{E} \perp \vec{B}$  (les 3 vecteurs forment un trièdre orthogonal)

$$F = q |E - vB|$$

( $q > 0$ )



• si  $|F_E| \neq |F_B|$

$$\left(\vec{F} \neq \vec{0}\right) \perp \vec{v}$$

=> trajectoire déviée

## Partie 5 – Le magnétisme

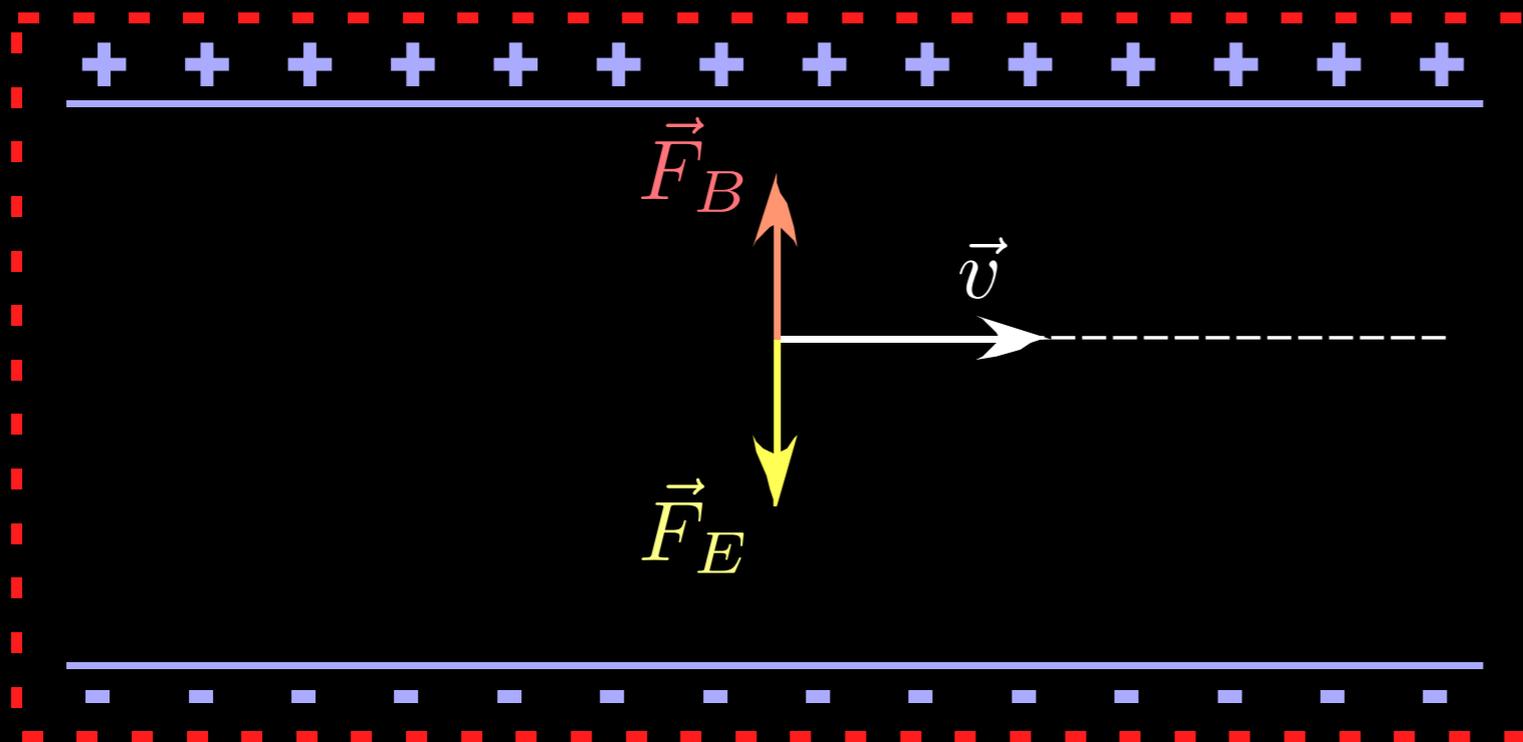
### D. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et un champ électrique - Force de Lorentz

2) Cas simple :

Un cas simple :  $\vec{v} \perp \vec{E} \perp \vec{B}$  (les 3 vecteurs forment un trièdre orthogonal)

$$F = q(E - vB)$$

( $q > 0$ )



• si  $\vec{F}_E = -\vec{F}_B$

alors

$$F = 0$$

$$|E - vB| = 0$$

soit

$$v = \frac{E}{B}$$

La force de Lorentz est nulle pour les charges dont la vitesse est elle que  $v = \frac{E}{B}$

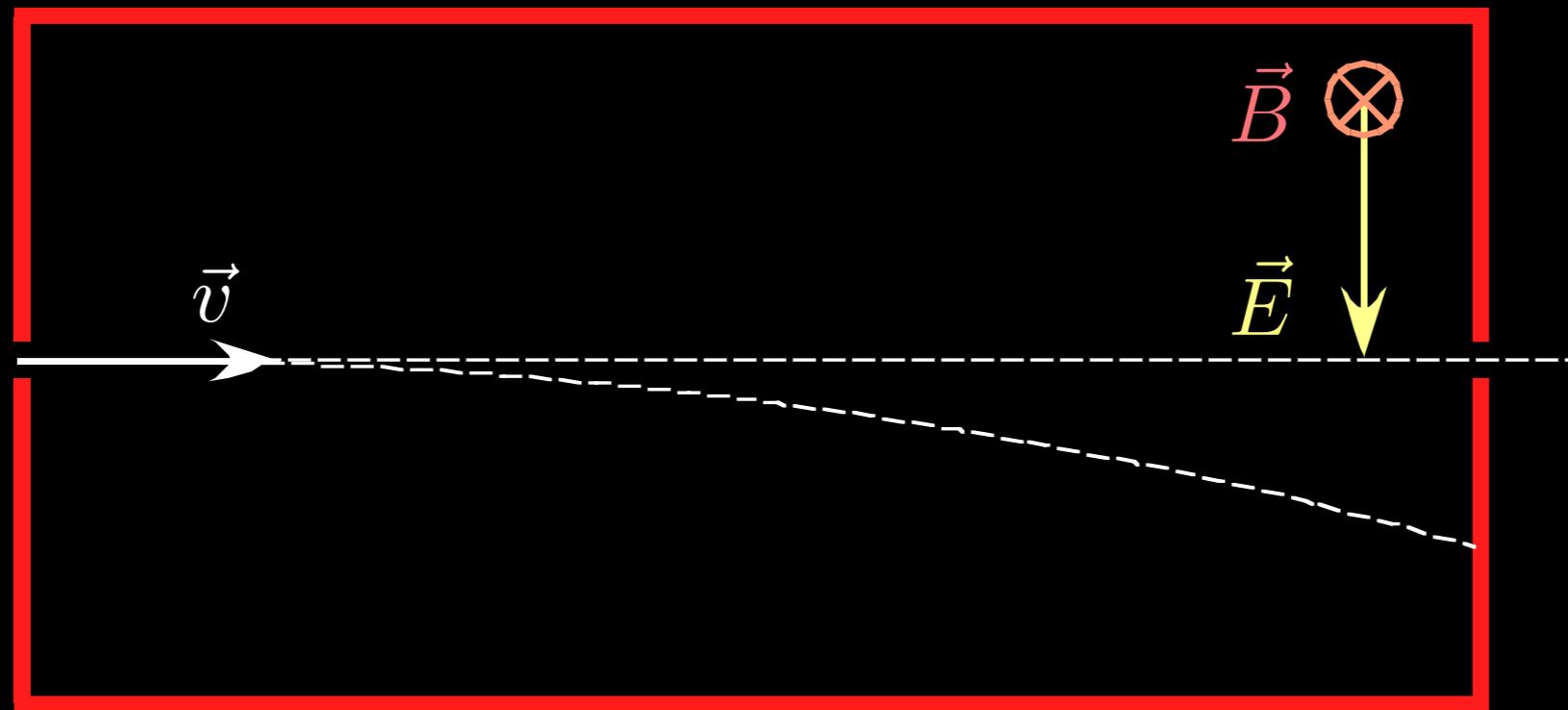
En l'absence d'autres forces, ces charges ne sont donc pas déviées de leur trajectoire.

## Partie 5 – Le magnétisme

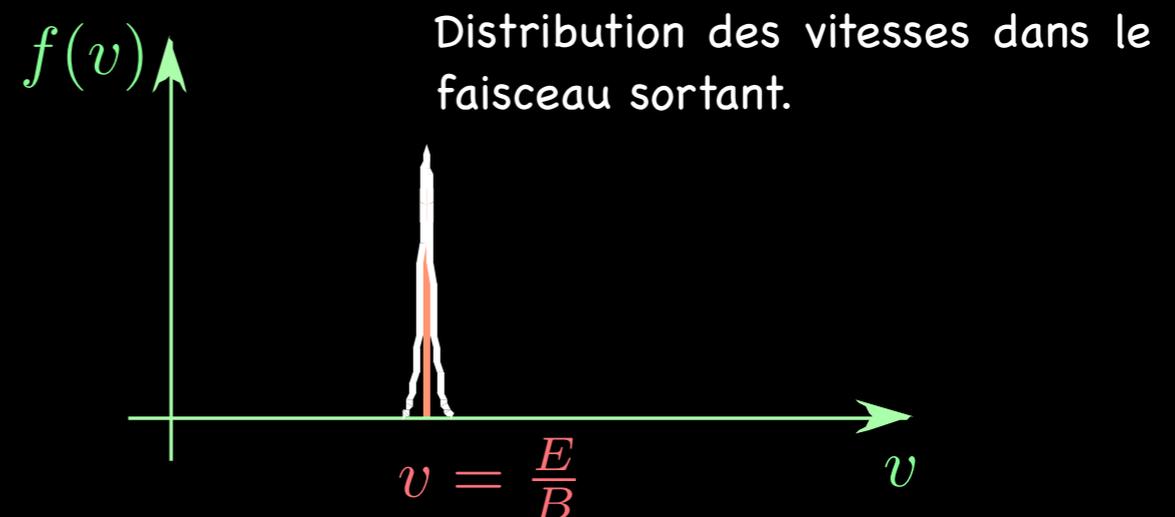
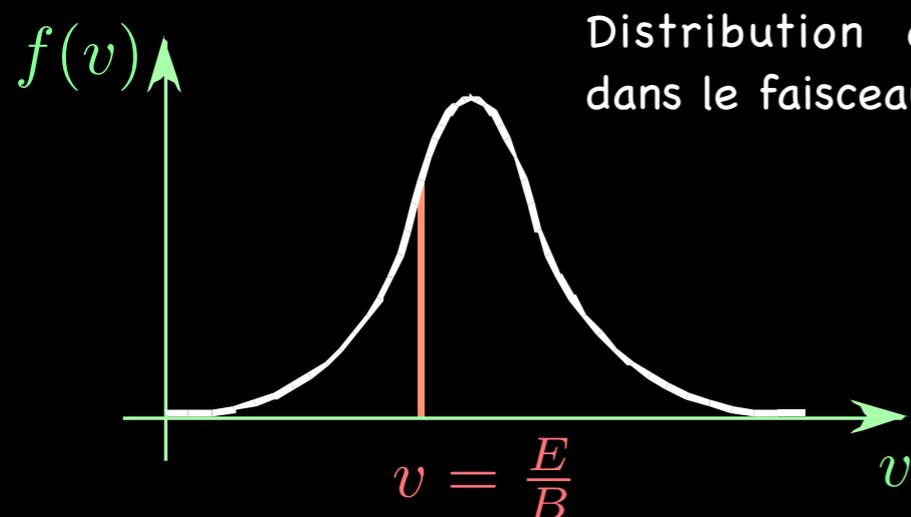
### D. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et un champ électrique - Force de Lorentz

#### 3) Application : sélecteur de vitesse

Un faisceau de particules chargées pénètre dans une enceinte où règnent un champ magnétique et un champ électrique uniformes. Si l'on néglige l'action de la pesanteur, seules les particules dont la vitesse est égale au rapport  $E/B$  conservent une trajectoire rectiligne.



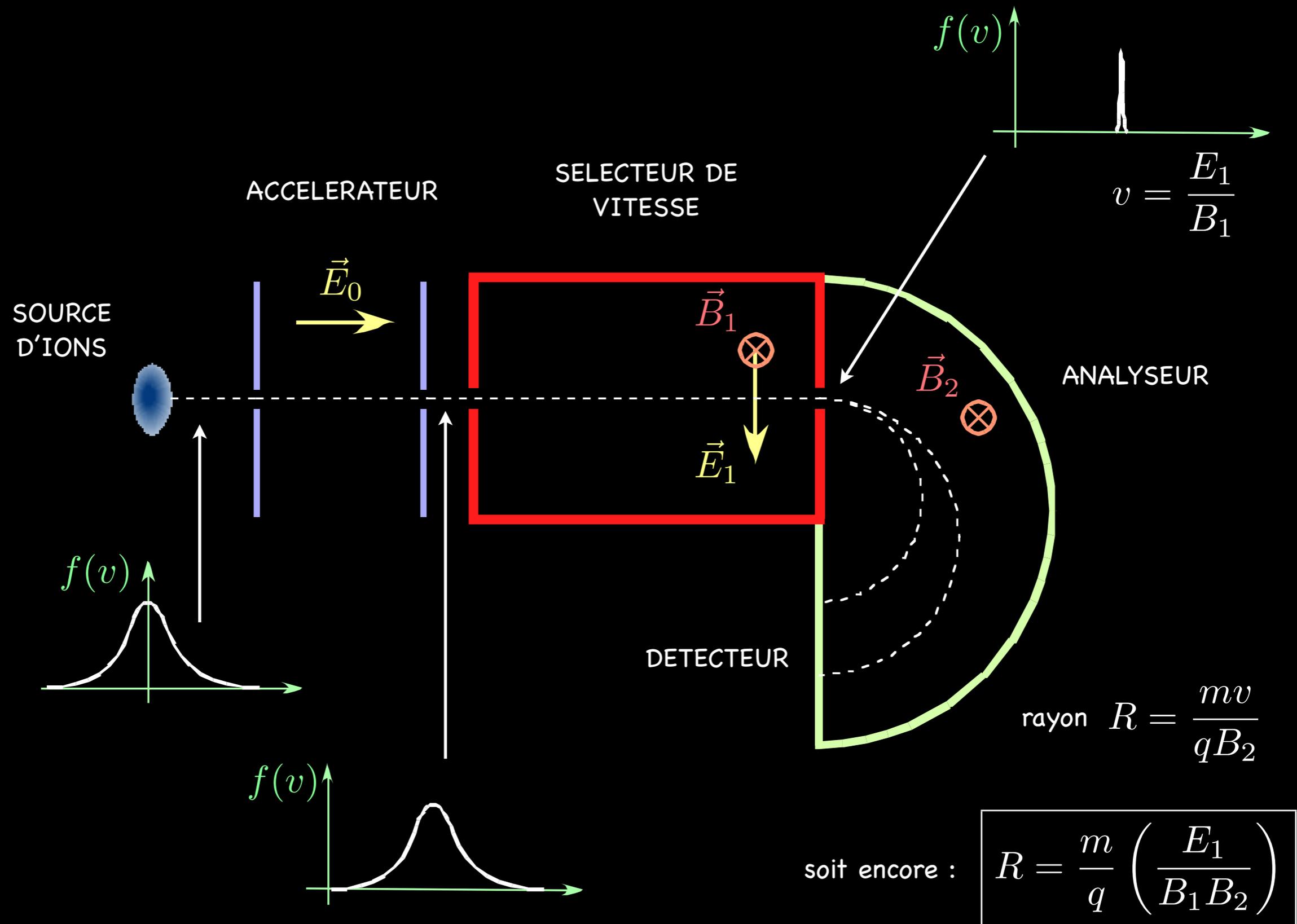
Les particules non déviées sont sélectionnées par un simple orifice situé en face du faisceau incident.



## Partie 5 – Le magnétisme

### D. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et un champ électrique - Force de Lorentz

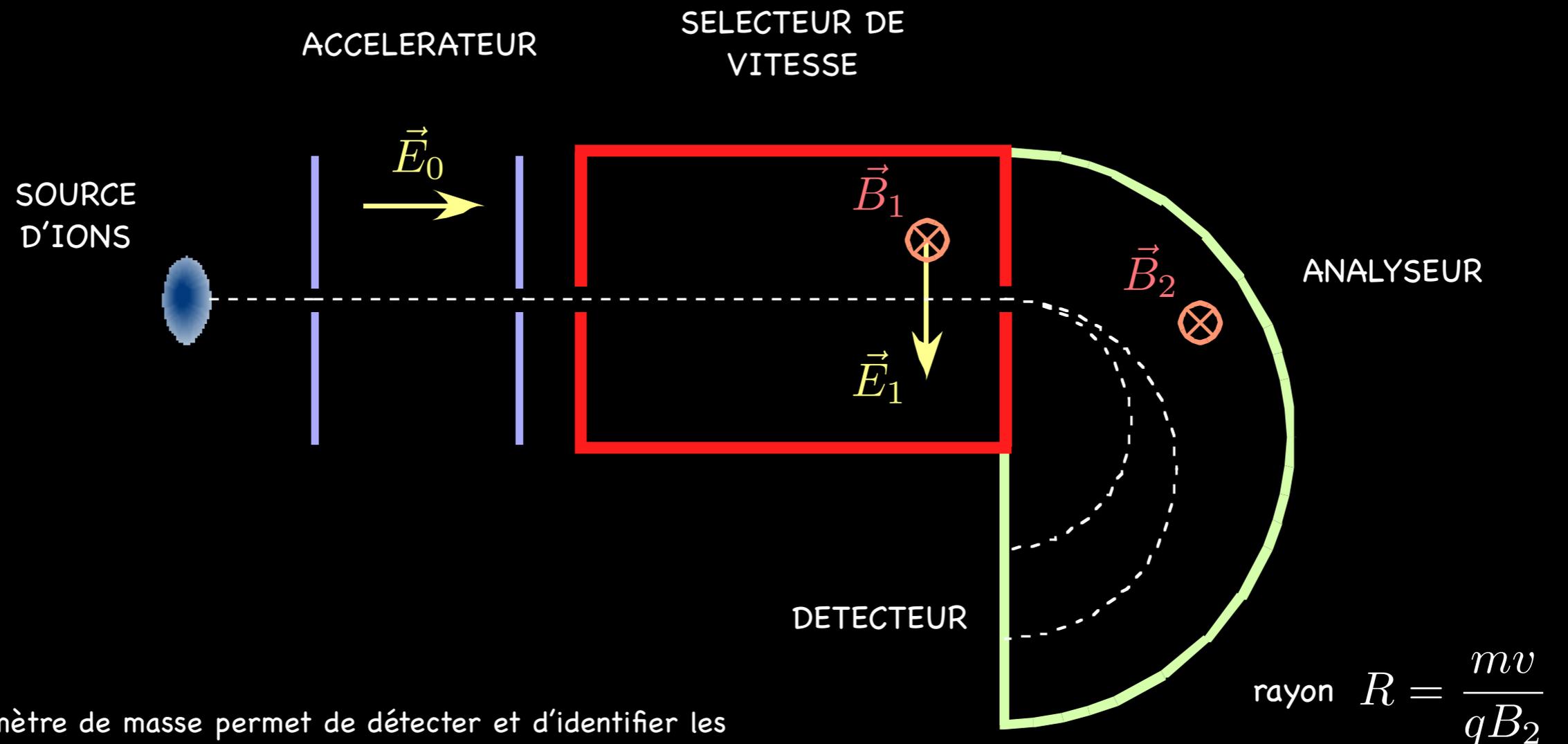
#### 4) Application : spectromètre de masse



## Partie 5 – Le magnétisme

### D. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et un champ électrique - Force de Lorentz

#### 4) Application : spectromètre de masse



Un spectromètre de masse permet de détecter et d'identifier les ions, c'est un outil de chimie analytique. La mesure du rapport  $m/q$  permet ainsi d'obtenir des formules brutes ou de mesurer l'abondance relative de plusieurs isotopes.

soit encore :

$$R = \frac{m}{q} \left( \frac{E_1}{B_1 B_2} \right)$$