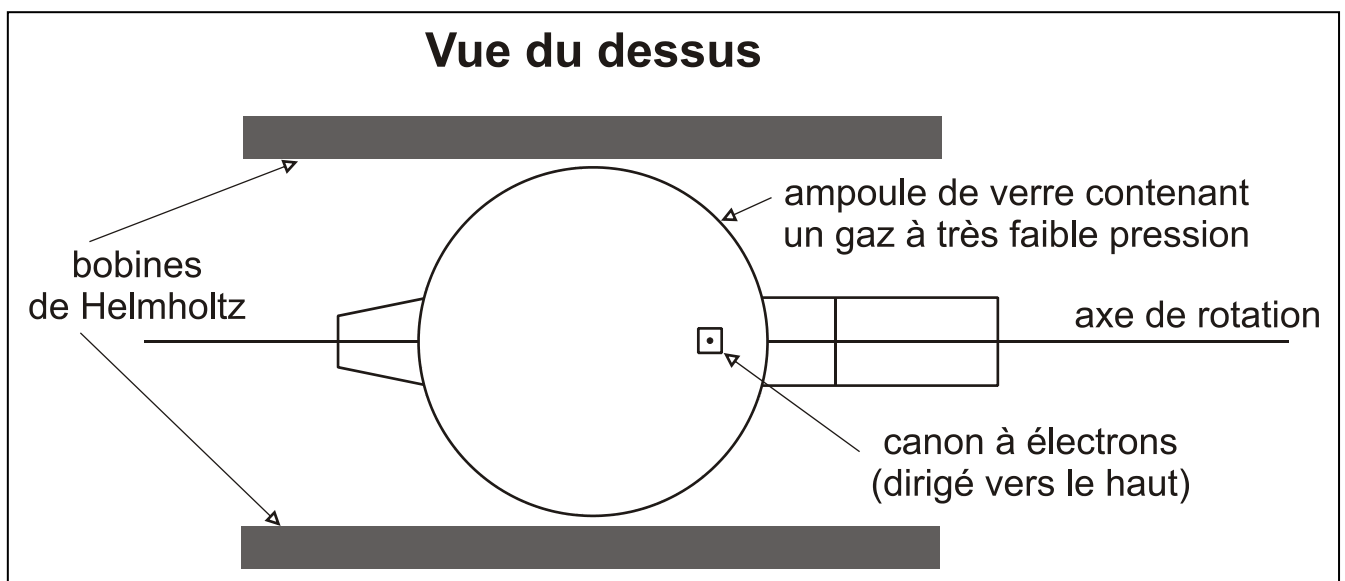


## Chapitre 2 : Force de Lorentz. Force de Laplace

### 1. Expérience

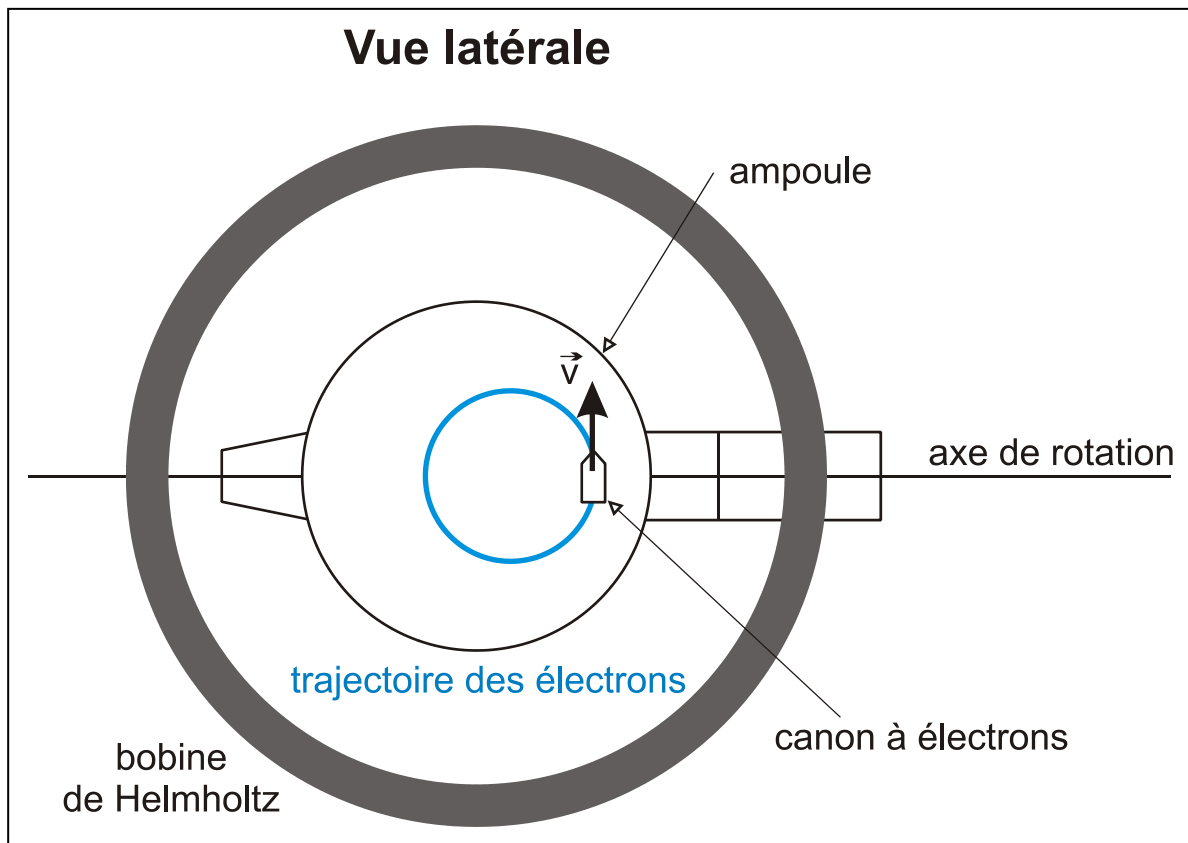
#### a) Dispositif expérimental

- Deux bobines de Helmholtz (2 bobines plates disposées parallèlement en regard, à la distance égale au rayon des bobines) créent un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme parallèle à l'axe des bobines.
- Un canon à électrons produit un faisceau d'électrons de vitesse  $v$  à l'intérieur d'une ampoule de verre. Les quelques molécules de gaz, excitées par des chocs avec les électrons, émettent ensuite un rayonnement lumineux permettant de visualiser la trajectoire du faisceau d'électrons.
- L'ampoule peut tourner autour d'un axe, de telle manière que l'angle  $\alpha$  entre la vitesse initiale  $\vec{v}$  des électrons et le champ  $\vec{B}$  puisse être varié.



#### b) Observations

1. En absence d'un champ  $\vec{B}$  la trajectoire des électrons est rectiligne.
2. En présence d'un champ  $\vec{B} \perp \vec{v}$  les électrons décrivent une trajectoire circulaire. Plus le champ est intense, plus le rayon de la trajectoire est petit. Plus la vitesse des électrons est grande, plus le rayon est grand.
3. En présence d'un champ  $\vec{B} \parallel \vec{v}$  les électrons décrivent une trajectoire rectiligne.
4. En présence d'un champ  $\vec{B}$  faisant un angle  $\alpha$  quelconque par rapport à  $\vec{v}$ , les électrons décrivent une hélice.



### c) Interprétations

1. En absence d'un champ  $\vec{B}$  il n'y a pas de forces s'exerçant sur les électrons. (Le poids des électrons peut être négligé!) En vertu du principe d'inertie le mouvement des électrons est rectiligne et uniforme.
2. En présence d'un champ  $\vec{B}$  une force magnétique s'exerce sur les électrons et dévie constamment leur direction. Cette force est toujours perpendiculaire à la vitesse (elle-même tangente au cercle). En plus la force est perpendiculaire au champ  $\vec{B}$ . Cette force augmente avec l'intensité du champ  $\vec{B}$  et dépend également de la vitesse  $v$  des électrons. *(Cette dépendance plus compliquée ne sera abordée qu'en classe de 1<sup>re</sup> après avoir étudié l'accélération d'un corps en mouvement circulaire !)*
3. Lorsque  $\vec{B}$  et  $\vec{v}$  sont parallèles il n'y a pas de force magnétique.
4. Nous n'interpréterons pas l'observation 4.

## 2. Force de Lorentz

### a) Définition

Une charge  $q$  qui se **déplace** avec une vitesse  $\vec{v}$  dans un champ magnétique caractérisé par le vecteur  $\vec{B}$  subit une force magnétique appelée **force de Lorentz**  $\vec{f}_m$  donnée par :

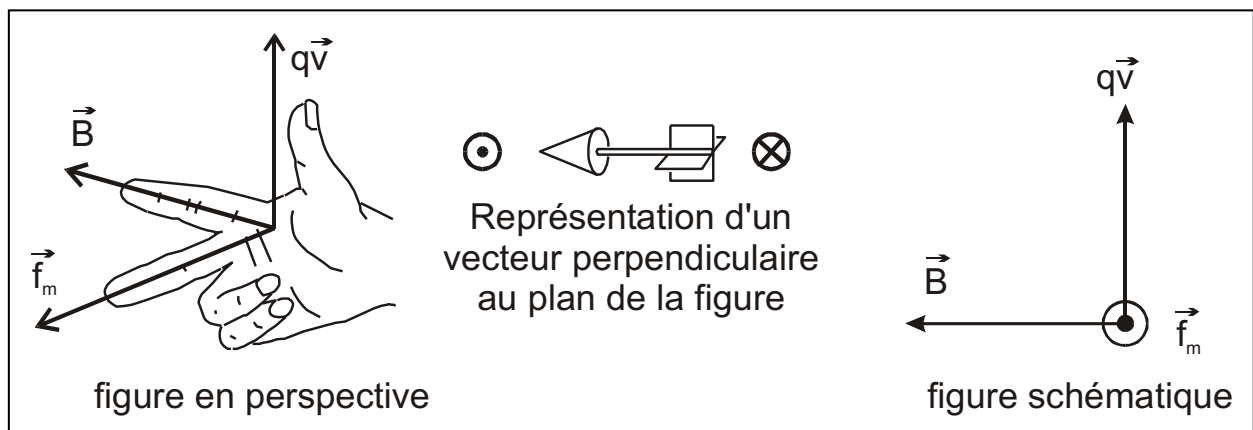
$$\vec{f}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

$\vec{f}_m$  est le **produit vectoriel** de  $q\vec{v}$  par  $\vec{B}$ .

(Cette formule ne sera utilisée qu'en classe de première !)

### b) Caractéristiques de la force de Lorentz

- **direction** : perpendiculaire à  $q\vec{v}$  et à  $\vec{B}$ , donc au plan formé par  $q\vec{v}$  et  $\vec{B}$
- **sens** : déterminé par la **règle des trois doigts de la main droite** :  
 pouce : sens de  $q\vec{v}$  (= sens de  $\vec{v}$  si  $q>0$  ; = sens opposé à  $\vec{v}$  si  $q<0$ )  
 index : sens de  $\vec{B}$   
 majeur : sens de  $\vec{f}_m$



- **norme** :  $f_m = |qvB \sin \alpha|$

où  $q$  est la charge (C)

$v$  est la vitesse de la charge (m/s)

$B$  est l'intensité (la norme) du vecteur champ magnétique (T)

$\alpha$  est l'angle formé par  $q\vec{v}$  et  $\vec{B}$ .

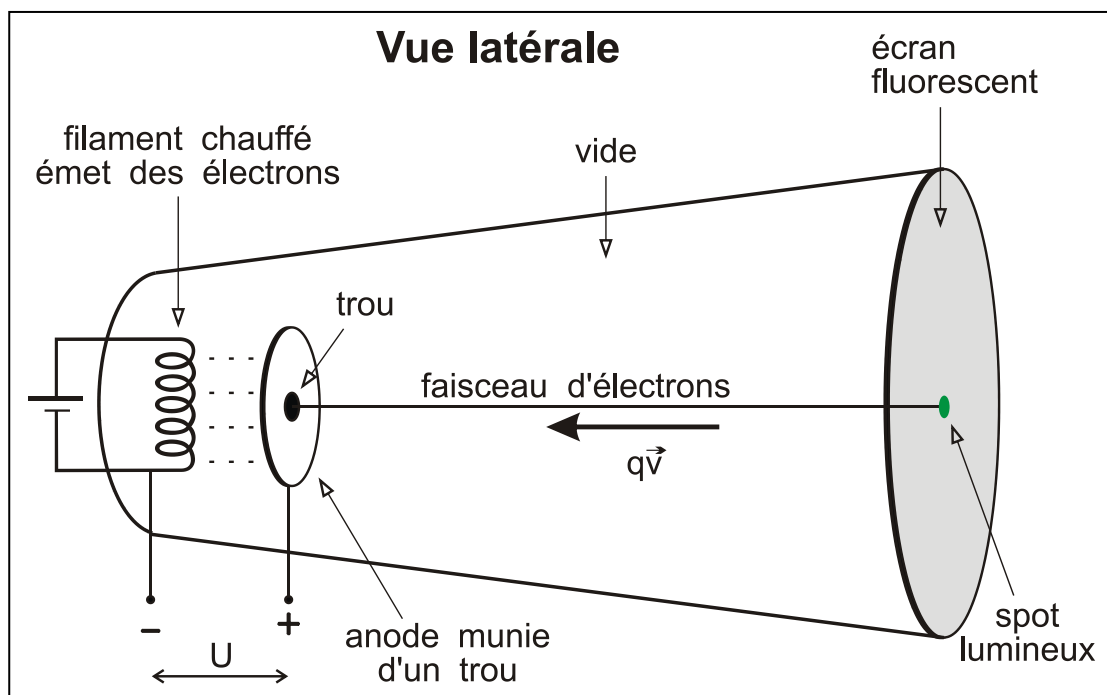
$$\text{si } \alpha = 90^\circ \text{ alors } f_m = |qvB| \text{ (force maximale) } \quad \text{si } \alpha = 0 \text{ alors } f_m = 0$$

### 3. Expérience: vérification de la règle de la main droite

#### a) Dispositif expérimental : tube de Braun

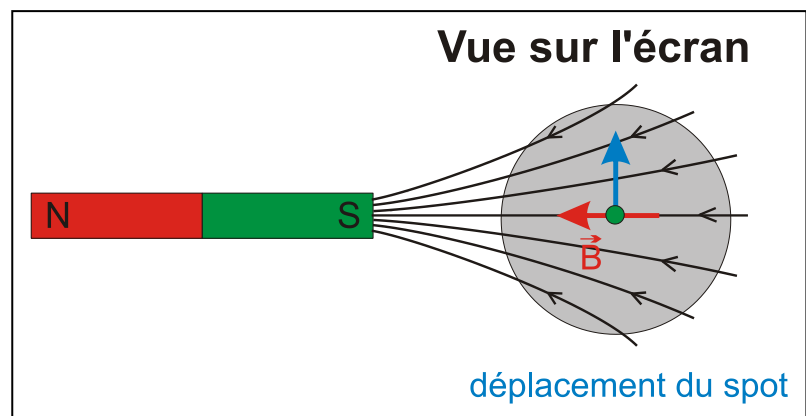
A l'intérieur d'un tube où règne un vide poussé, se trouve un canon à électrons, constitué d'un filament porté à incandescence et d'une anode munie d'un trou. L'anode est portée à une tension accélératrice  $U > 0$  par rapport au filament.

Le filament chauffé émet des électrons (= effet thermoélectronique) qui acquièrent une vitesse  $v$  dans le champ électrique régnant entre le filament et l'anode. Un grand nombre d'électrons passent par le trou et forment le faisceau électronique se dirigeant en ligne droite (en absence de forces) vers l'écran fluorescent. En heurtant l'écran à grande vitesse les électrons y produisent un spot lumineux.

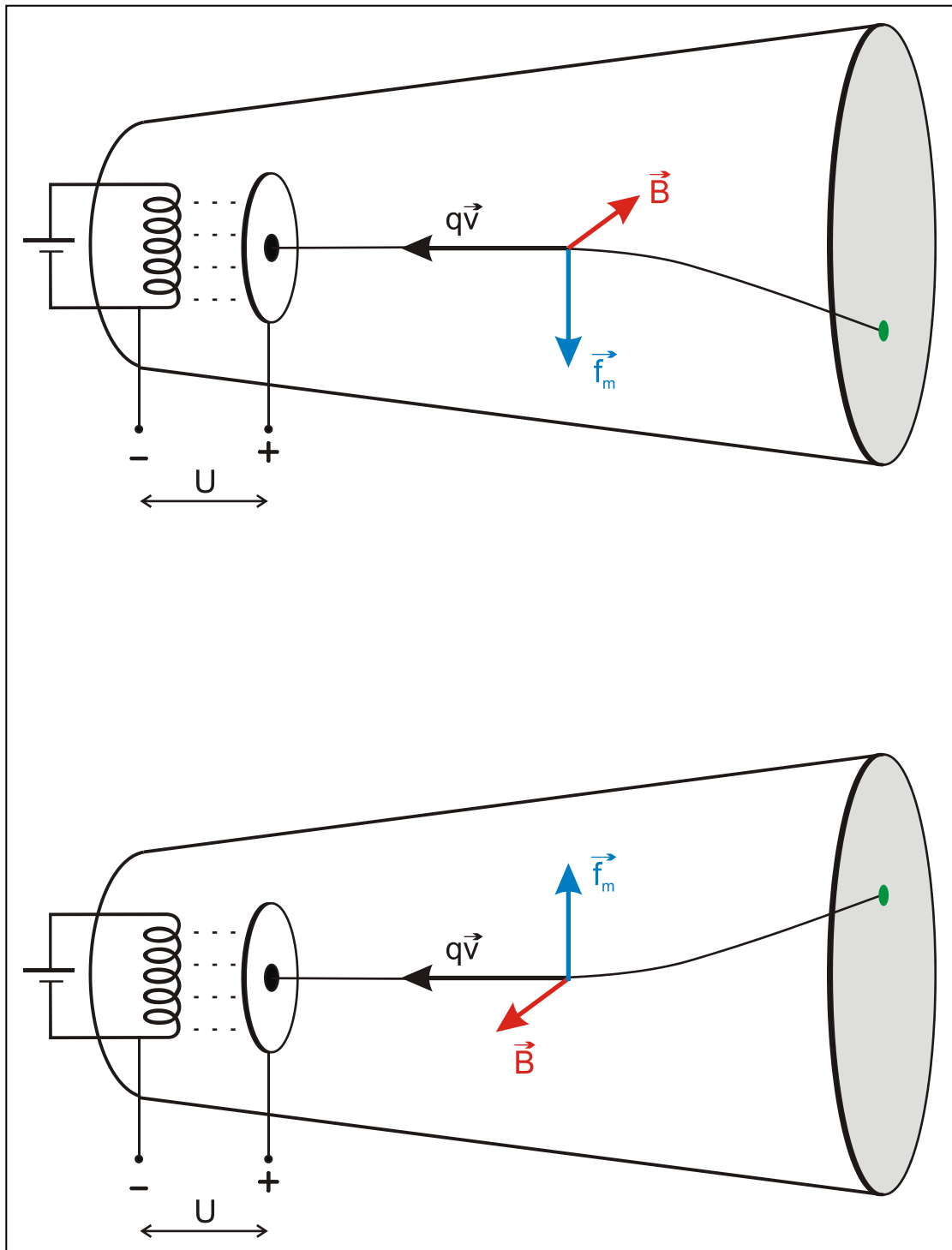


#### b) Observations

1. Lorsqu'on approche un aimant droit du tube le spot est dévié sur l'écran par rapport à sa position initiale.
2. En maintenant l'aimant de sorte que le champ magnétique est horizontal et perpendiculaire au faisceau on observe que le spot est dévié verticalement conformément à la règle de la main droite.



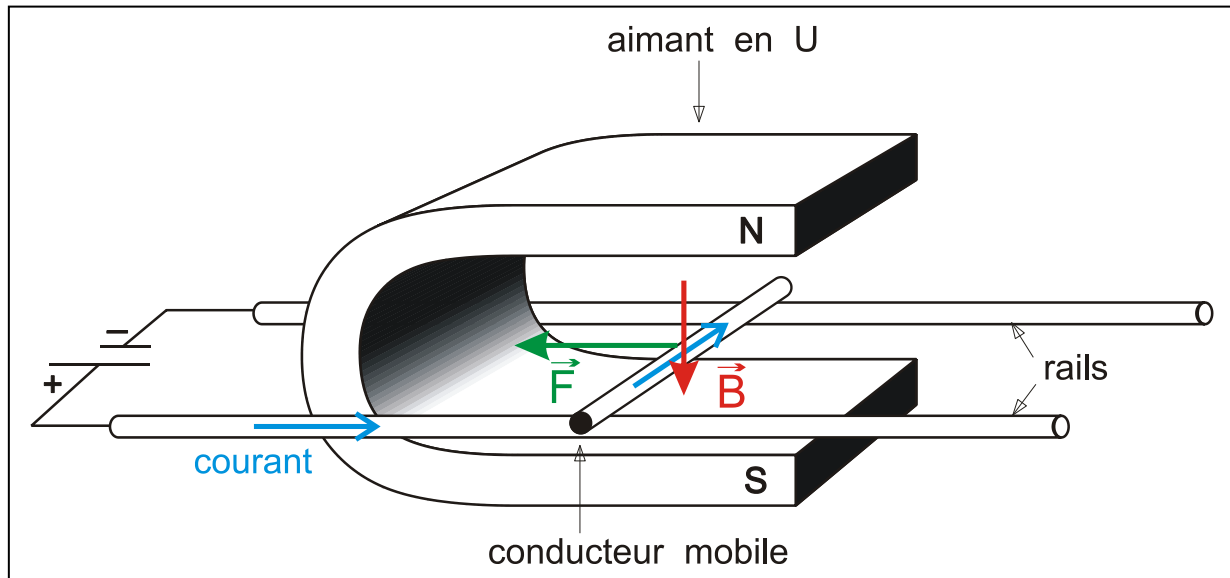
Attention :  $q\vec{v}$  est dirigé dans le sens opposé à celui de  $\vec{v}$  car  $q < 0$  (il s'agit d'électrons) !



#### 4. Expérience : force électromagnétique de Laplace s'exerçant sur un conducteur parcouru par le courant et placé dans un champ magnétique

##### a) Dispositif expérimental

Un conducteur mobile est placé sur deux rails horizontaux connectés à un accumulateur, et dans le champ magnétique d'un aimant en U.



##### b) Observations

Lorsque le courant passe le conducteur mobile roule vers la gauche ou vers la droite selon le sens du courant et selon le sens du champ magnétique.

##### c) Interprétation

D'après un modèle simplifié on peut considérer que le courant électrique est constitué d'innombrables électrons qui se déplacent tous avec la même vitesse  $\vec{v}$  dans le sens opposé au sens conventionnel du courant.

Ces électrons se déplacent donc dans un champ magnétique  $\vec{B} \perp \vec{v}$  de sorte que chaque électron est soumis à une même force de Lorentz. Comme les électrons sont retenus par les atomes du réseau cristallin constituant le conducteur, c'est finalement le conducteur tout entier qui est sollicité par une force appelée **force électromagnétique de Laplace**. Cette force est égale à la résultante de toutes les innombrables forces de Lorentz qui s'exercent sur les électrons qui constituent le courant électrique.

## 5. Force de Laplace

### a) Expression mathématique de la norme de la force de Laplace

On considère un conducteur rectiligne de longueur  $\ell = PM$  parcouru par un courant électrique d'intensité  $I$  et placé dans un champ magnétique  $\vec{B}$  perpendiculaire à  $PM$ . Les  $N$  électrons libres contenus dans ce conducteur et constituant le courant, de charge  $q = -e$ , se déplacent avec une certaine vitesse  $\vec{v}$  à travers  $\vec{B}$ . Ils subissent donc tous une force de Lorentz :

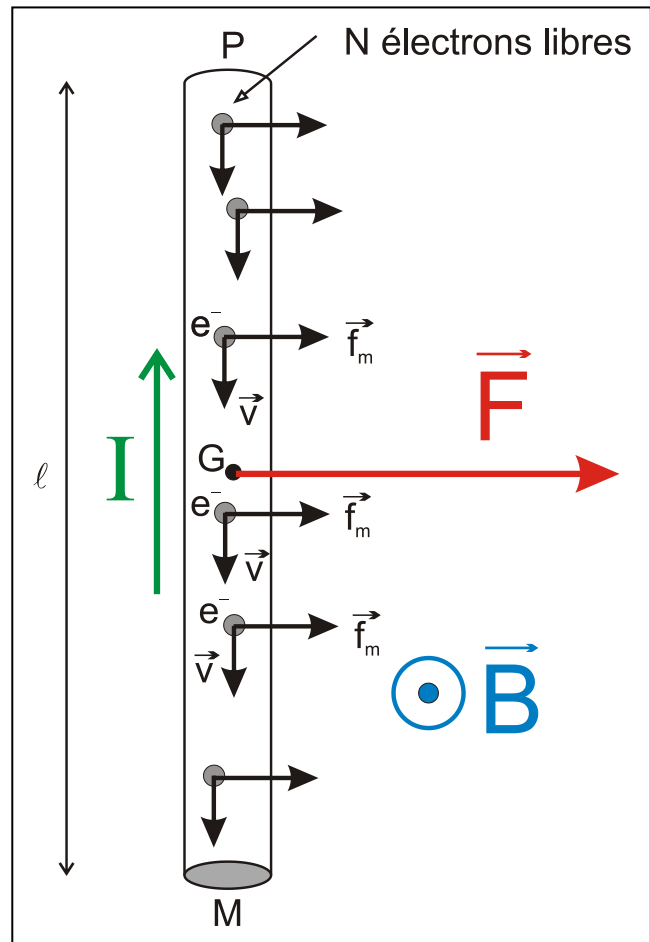
$$f_m = |qvB \sin \alpha| = evB \sin \alpha$$

La résultante  $\vec{F}$  des  $N$  forces de Lorentz constitue la force électromagnétique de Laplace s'exerçant sur le conducteur tout entier.

Afin de déterminer  $F$ , nous raisonnons sur le modèle simplifié du courant électrique où les  $N$  électrons libres se déplacent à la même vitesse constante  $\vec{v}$ .

Dans ces conditions, les  $N$  électrons subissent la même force de Lorentz  $\vec{f}_m$ .

Force de Laplace :  $F = Nf_m = N|qvB \sin \alpha| = NevB \sin \alpha$  avec  $\alpha =$  angle entre  $q\vec{v}$  et  $\vec{B}$ .



### Etablissons une relation entre la vitesse des électrons $v$ et l'intensité $I$ du courant !

Par définition :  $I = \frac{|Q|}{\Delta t}$   $|Q| =$  charge totale traversant une section quelconque du conducteur pendant la durée  $\Delta t$ .

Si  $|Q| = Ne$  alors  $\Delta t =$  durée qu'il faut aux  $N$  électrons présents dans le conducteur pour s'écouler à travers la section en  $M$  (figure!)

$\Rightarrow \Delta t = \frac{\ell}{v}$  chacun des électrons a parcouru une distance  $\ell$  avec la vitesse  $v$

Donc :  $I = \frac{Nev}{\ell} \Leftrightarrow I\ell = Nev$

**Exprimons la force de Laplace :**  $F = NevB \sin \alpha = IB\ell \sin \alpha$

(Ici  $\alpha = 90^\circ \Rightarrow F = NevB = IB\ell$ )

**b) Caractéristiques de la force de Laplace**

Un conducteur de longueur  $\ell$  placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant  $I$ , est soumis à une force de Laplace  $\vec{F}$  :

- direction : perpendiculaire au plan formé par le conducteur et  $\vec{B}$
- sens : déterminé par la règle des trois doigts de la main droite  
pouce : sens du courant  
index : sens de  $\vec{B}$   
majeur : sens de  $\vec{F}$
- norme :  $F = I B \ell \cdot \sin\alpha$

où  $I$  est l'intensité de courant (A)

$B$  est l'intensité (la norme) du vecteur champ magnétique (T)

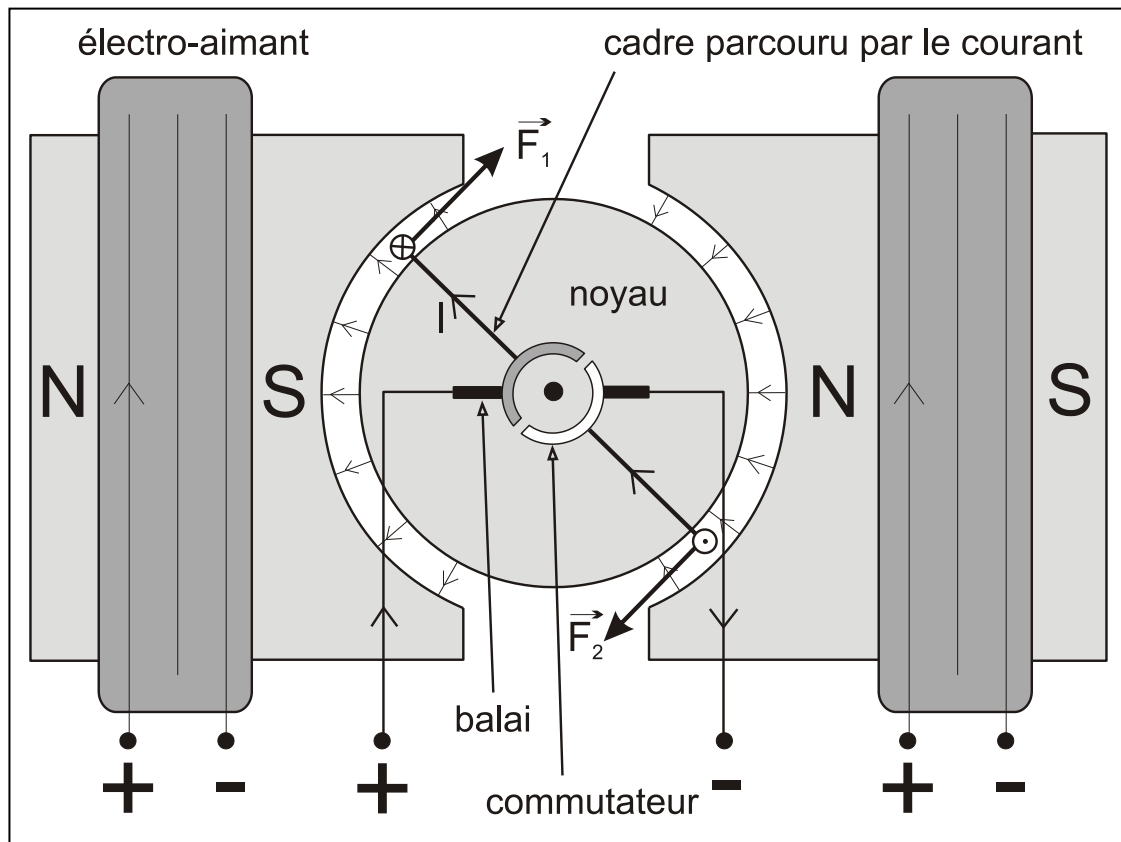
$\alpha$  est l'angle formé par  $\vec{B}$  avec le conducteur.

si  $\alpha = 90^\circ$  alors  $F = I B \ell$  (force maximale) si  $\alpha = 0$  alors  $F = 0$



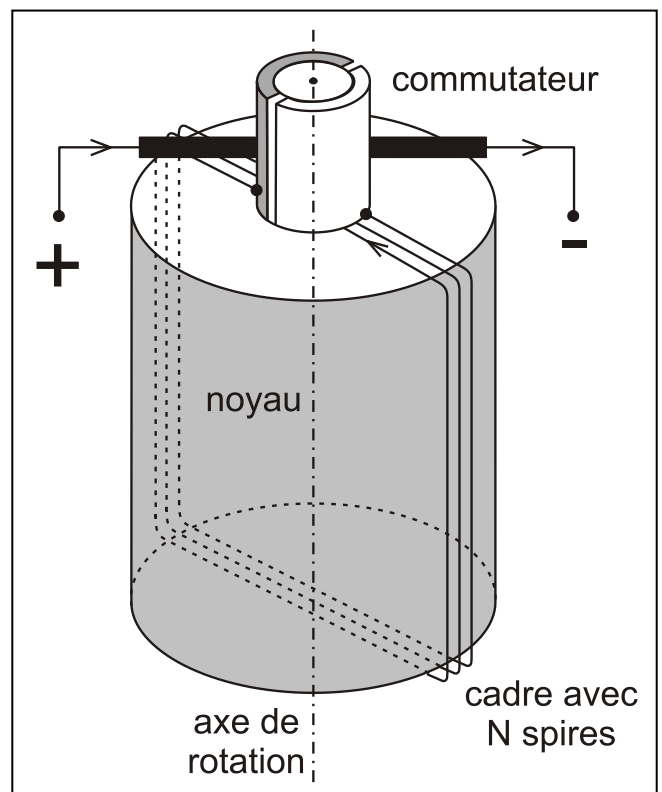
## 6. Applications de la force de Laplace

### a) Le moteur électrique

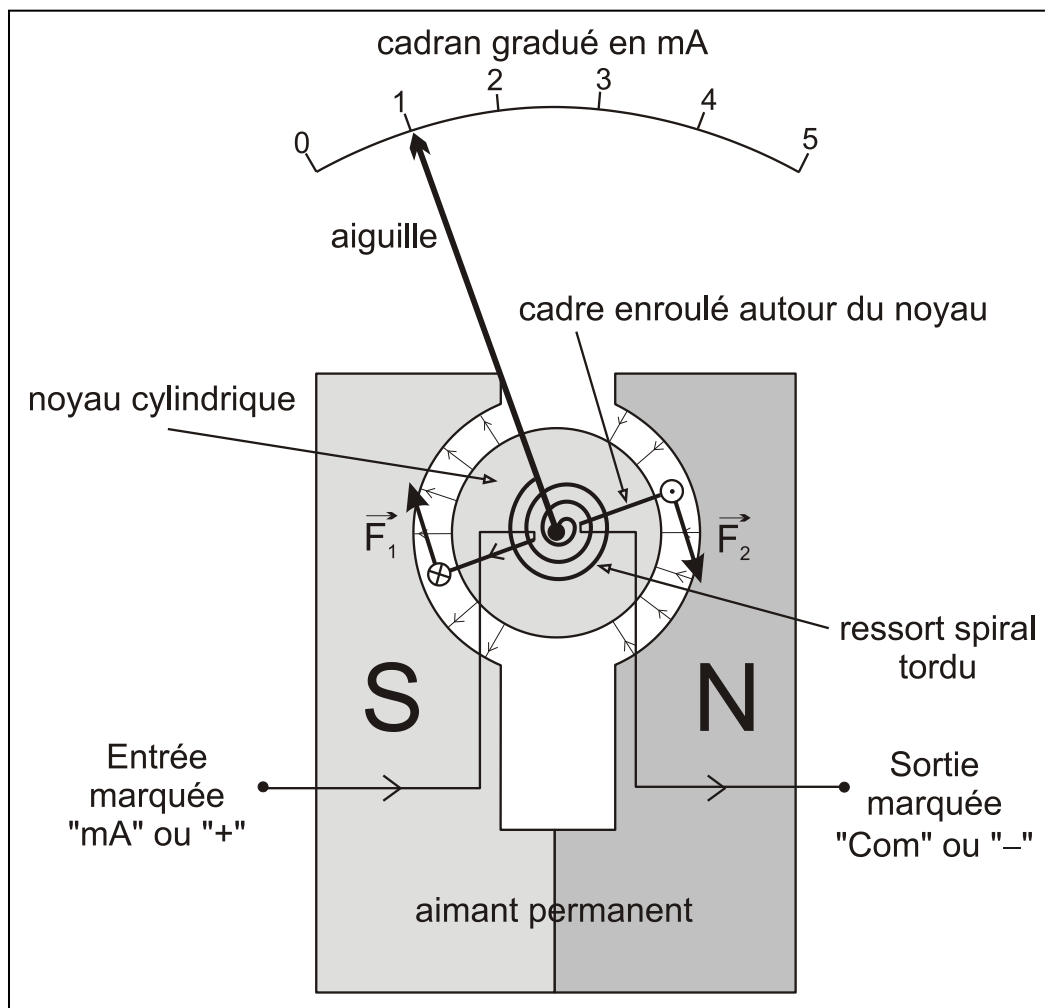


Un **cadre rectangulaire** est enroulé autour d'un noyau de fer cylindrique mobile autour d'un axe fixe. Le cadre est alimenté en courant par l'intermédiaire du **commutateur** : le courant entre et sort par deux balais en graphite fixes qui frottent contre deux demi-cylindres métalliques solidaires du cadre lorsque le moteur tourne ; ces demi-cylindres sont connectés aux extrémités du fil du cadre.

Dans l'entrefer, c'est-à-dire dans l'espace entre les électro-aimants fixes (stator) et la partie mobile (rotor), existe un **champ magnétique radial**. Placé dans ce champ, le cadre est soumis à un **couple de forces de Laplace** qui provoquent sa rotation. **A chaque demi-tour, le sens du courant dans le cadre est inversé grâce au commutateur.** Ainsi le couple agit toujours dans le même sens, et la continuité du mouvement de rotation est assurée !



## b) L'ampèremètre à cadre mobile



Un **cadre rectangulaire** est enroulé autour d'un **noyau de fer cylindrique** mobile autour d'un axe fixe.

Dans l'entrefer existe un **champ magnétique radial**. Placé dans ce champ, le cadre est soumis à un **couple de forces de Laplace** qui provoquent la rotation du cadre.

Un **ressort spiral** fixé d'une part au cadre et d'autre part à la carcasse de l'ampèremètre se tord de sorte que le cadre se retrouve finalement en équilibre sous l'action de deux couples : le couple moteur des forces de Laplace, proportionnel à l'intensité de courant et le couple résistant du ressort spiral, proportionnel à l'angle de torsion (égal à l'angle de déviation de l'aiguille). **Plus l'intensité est grande, plus la déviation de l'aiguille est grande.** (Le ressort doit être tordu davantage pour pouvoir équilibrer un couple moteur devenu plus important.)

