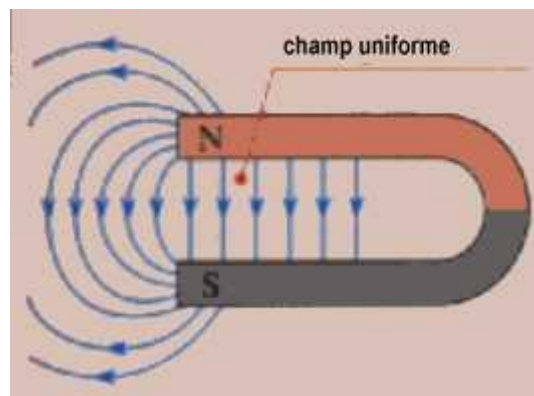


# ***Force de Laplace et force de Lorentz***

## **I L'expérience de Laplace à l'origine du moteur électrique à courant continu**

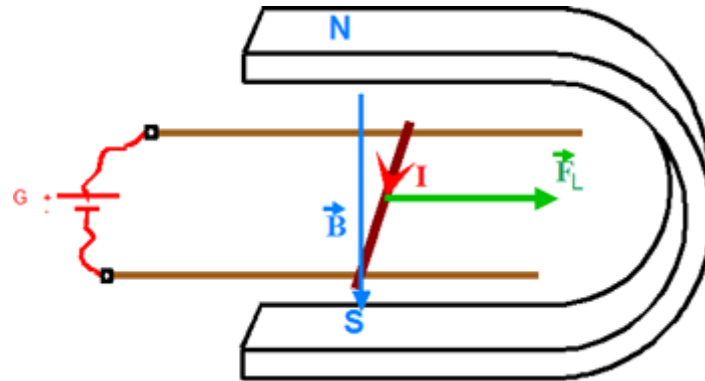
L'expérience de Laplace fut en quelque sorte l'expérience inverse de celle d'Oersted, si brillamment interprétée par Ampère. Oersted avait observé qu'un fil rectiligne parcouru par un courant électrique avait des effets magnétiques qui lui donnaient une action mécanique déviante sur l'aiguille d'une boussole, tout comme le fait un aimant naturel.

Laplace expérimenta le phénomène inverse, à savoir l'action mécanique d'un aimant sur un fil rectiligne parcouru par un courant, mettant ainsi en évidence une force ayant pour origine le magnétisme et appelée **force de Laplace**. Mais il lui fallut pour cela utiliser un aimant un peu particulier ayant une forme de fer à cheval et présentant les caractéristiques d'avoir des lignes de champ parallèles dans sa partie interne (voir figure), un peu comme un condensateur plan génère des lignes de champ électrique parallèle entre ses deux armatures planes. Des instruments plus précis inventés plus tard (teslamètres) montreront d'ailleurs que le champ magnétique a une intensité quasi constante dans cette région interne où les lignes de champ sont parallèles.



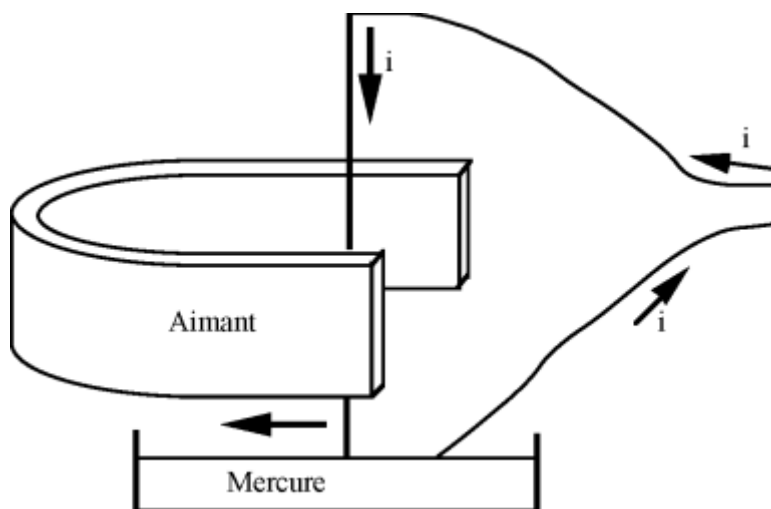
Deux dispositifs font référence à la force de Laplace, le rail de Laplace et le fil conducteur plongé dans une cuve de mercure.

Rail de Laplace :



Un fil conducteur parcouru par un courant d'intensité  $I$  délivré par un générateur de courant continu (pile de Volta par exemple), peut glisser sur deux conducteurs rectilignes du circuit, disposés perpendiculairement aux lignes de champ créées par l'aimant. Le fil conducteur se déplace alors sous l'action d'une force à la fois orthogonale à la direction du fil et orthogonale aux lignes de champ.

Fil conducteur plongé dans une cuve de Mercure :



Dans ce dispositif, un fil vertical conducteur est libre de tourner librement autour d'un axe de même direction que les lignes de champ de l'aimant. On constate que le fil pivote

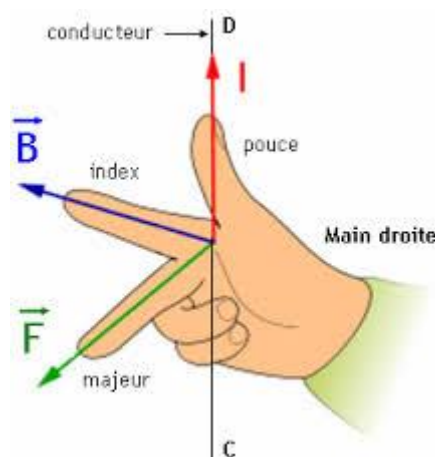
lorsqu'il est alimenté par un courant. Une cuve de mercure permet de maintenir le circuit fermé et alimenté par un générateur de courant continu, lorsque le fil pivote. Les mêmes observations que pour le rail de Laplace se font quant aux caractéristiques de la force agissant sur le fil.

Dans les deux expériences précédentes, on peut constater, en ajoutant un second aimant, que la force augmente. On peut même vérifier qu'elle double. On peut vérifier le même effet si on double l'intensité du courant.

Laplace en a déduit, en supposant l'intensité du champ magnétique, dans lequel baigne le fil conducteur, constante de valeur  $\|\vec{B}\|$ , une expression de cette force sous la forme :

$$\|\vec{F}\| = \|\vec{B}\| I L$$

La règle des trois doigts de la main droite permet d'établir la direction de cette force



Cette formule offre alors un moyen d'évaluer l'intensité du champ magnétique constant produit par les aimants en fer à cheval dans l'espace intérieur où leurs lignes de champ sont parallèles, car une force se mesure à l'aide d'un dynamomètre et une intensité à l'aide d'un galvanomètre (actuellement ampèremètre)

La force de Laplace est à l'origine de la conception des premiers moteurs électriques à courant continu. La roue de Barlow en est une illustration.

### Roue de Barlow :

La roue de Barlow est un dispositif permettant de mettre en rotation une roue dentée à partir d'un courant électrique. Le mécanisme est fondé sur la force de Laplace. La dent de la roue plongeant dans une cuve de mercure est parcourue par un courant électrique. La pointe de cette dent se trouvant située entre les deux pôles d'un aimant en fer à cheval, elle se trouve soumise à une force de Laplace qui fait pivoter la roue autour de son axe.

4° On produit encore la *rotation continue* d'une portion de courant mobile, dans l'expérience de la *roue de Barlow* (fig. 599). — Une roue de cuivre dentée est mobile autour d'un axe métallique C, qui communique par le fil N avec le pôle négatif d'une pile; une ou plusieurs dents de la roue plongent dans une auge DF, contenant du mercure,

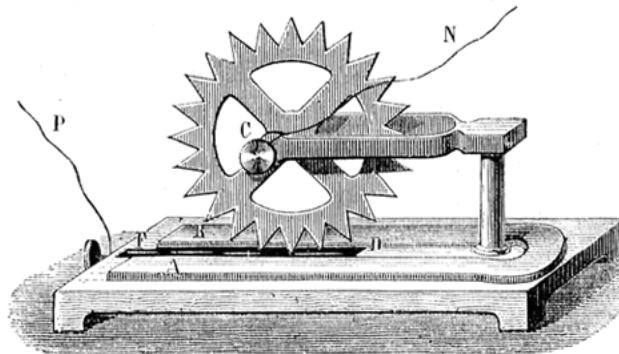


Fig. 599. — Roue de Barlow.

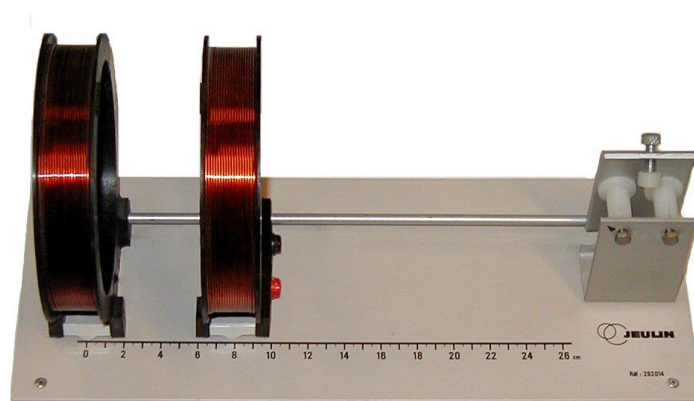
que l'on mettra en communication avec le pôle positif de la pile, par le fil P : dans ces conditions, le courant sera ascendant dans la partie inférieure de la roue. — Au moment où l'on ferme le circuit, l'action d'un aimant en fer à cheval, dont les deux branches sont fixées de part et d'autre de l'auge DF, imprime à la roue un mouvement de rotation continue. Le sens de la rotation est celui des aiguilles d'une montre, pour un observateur regardant l'appareil du côté du pôle austral A. En effet, les lignes de force étant dirigées de A en B, un observateur placé dans le courant ascendant, et regardant le pôle A, aurait sa droite du côté de F. — Si l'on renverse le sens du courant, la rotation de la roue se produit en sens inverse (\*).

Cet appareil peut être considéré comme constituant un moteur électro-magnétique. Supposons en effet que l'on suspende un corps pesant à l'extrémité d'un fil fixé en un point de l'axe C : lorsqu'on fera passer un courant suffisamment intense, le mouvement de rotation de la roue aura pour effet d'enrouler le fil sur l'axe, en soulevant le poids qui y est suspendu. — Une partie de l'énergie dépensée sous forme de courant se retrouvera dans le travail mécanique produit par le moteur électromagnétique.

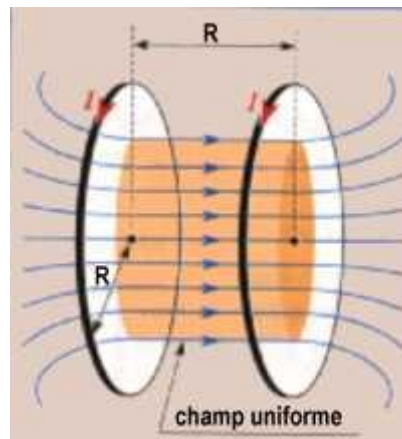


Il va falloir attendre d'autres expériences pour avoir une explication plus générale de la force de Laplace, avec la force de Lorentz, ce qui se fera après la découverte et l'analyse des propriétés du rayonnement électronique dans un tube de Crookes, expérience faite par Thomson en 1895, mettant en évidence la nature mobile de l'électricité négative, sous forme de particules qu'il appellera électrons.

## II Les bobines d'Helmholtz



Les bobines d'Helmholtz sont deux bobines plates identiques disposées sur un même axe et permettant pour un réglage adéquat de la distance les séparant (distance égale au rayon de chaque bobine), de créer un champ magnétique pratiquement constant dans la zone cylindrique formée par leur séparation.



Elles recréent donc dans cette zone un champ magnétique analogue à celui créé par un aimant en fer à cheval entre ses deux pôles, mais avec l'avantage de pouvoir faire varier l'intensité de ce magnétisme, en faisant varier l'intensité du courant parcourant les deux bobines.

Ces bobines vont être employées pour analyser l'impact des champs magnétiques sur les particules chargées, une fois les premières d'entre elles découvertes par Thomson, les électrons.

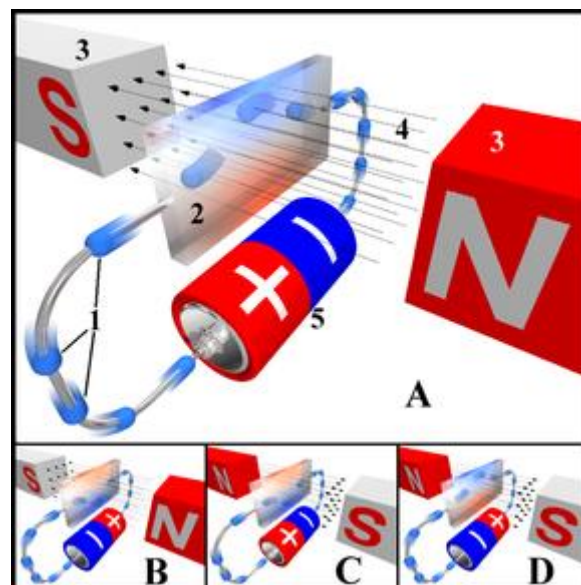
### III L'effet Hall

L'effet Hall est un phénomène qui va permettre de détecter la présence d'un champ magnétique en une région de l'espace ainsi que d'apprécier son intensité par la mesure d'une tension. Combiné à la force de Lorentz qui sera mise en évidence par un effet similaire, il sera à l'origine des instruments de mesure du champ magnétique appelés **tesla-mètres**.

C'est en 1879 que le physicien américain Edwin Herbert Hall découvre l'effet qui porte son nom. Le principe est le suivant : Lorsqu'une portion de conducteur est parcourue par un courant d'intensité  $I$ , et que cette portion est plongée dans un champ magnétique constant perpendiculaire au courant (créé par des bobines d'Helmholtz par exemple ou un aimant en fer à cheval), il apparaît entre les faces supérieures et inférieures du conducteur une tension qui est d'autant plus forte que le champ magnétique est intense.

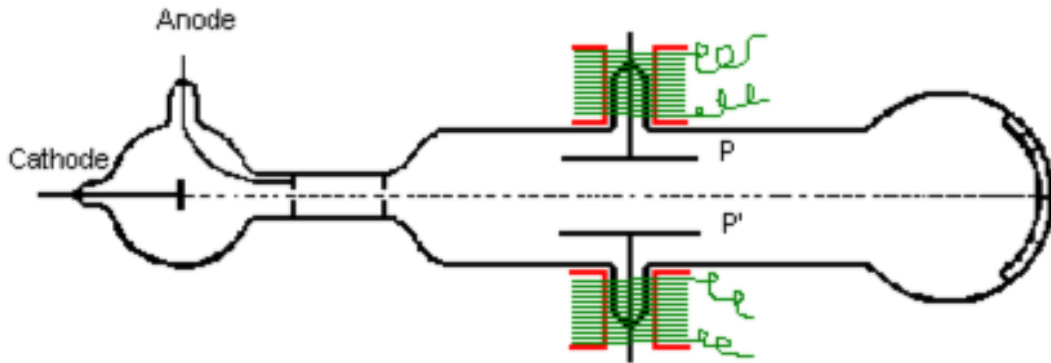
L'explication de l'effet Hall viendra avec l'expérience faite par Thomson sur un faisceau de particules qu'il découvrira dans le même temps, les électrons. Anticipant, il s'explique par le fait que les porteurs de charge mobiles que sont les électrons (non encore connus au moment de la découverte de Hall) sont déviés par une force liée au champ magnétique et qui prendra le nom un peu plus tard, de force de Lorentz, la même force expliquant la force de Laplace.

De ce fait des électrons tendent à apparaître sur une des faces laissant des charges antagonistes sur l'autre, ce qui conduit à l'apparition d'une tension.



## IV L'expérience de Thomson

C'est J.J Thomson (Lord Kelvin) qui va mettre en évidence le caractère mobile de l'électricité négative dans la matière et qualifiera leurs particules supposées d'électrons (elektron = ambre en grec)



### Le dispositif

Le dispositif expérimental est un tube de Crookes, c'est-à-dire un tube de verre dans lequel on a fait un vide poussé (mais pas total, ce serait impossible, et on ne pourrait y voir se produire des rayonnements puisque rien ne pourrait intercepter le rayonnement sur son passage)

A une extrémité du tube se trouvent logés dans le tube de verre, une cathode  $C$  et une anode  $A$ , la tension entre anode et cathode étant positive  $U_{AC} > 0$ .

La partie centrale du tube est placée entre deux bobines d'Helmholtz (d'axe horizontal) créant un champ magnétique quasi-constant horizontal dans l'espace les séparant.

Deux armatures de condensateur plan  $P$  et  $P'$  horizontales sont logées également dans la partie centrale afin de créer un champ électrique constant entre les armatures, pouvant être fixé à une valeur variable selon la tension appliquée.

### Les observations :

En l'absence d'alimentation des bobines d'Helmholtz, donc de champ magnétique, et de tension aux bornes du condensateur, donc de champ électrique entre ses armatures, un faisceau de couleur verte rectiligne apparaît dans le tube à partir d'une certaine valeur de



tension entre anode et cathode. Ce faisceau émerge de la cathode, siège de l'électricité négative.

En appliquant seulement une tension au condensateur, le faisceau est dévié du côté de l'armature positive, donc ce faisceau est chargé d'électricité négative. Thomson suppose que cette électricité est portée par des particules infimes qu'il baptise électrons du nom de l'ambre en grec (elektron) résine sur laquelle apparaît par frottement avec de la laine l'électricité négative.

Appliquant alors seulement un champ magnétique par l'intermédiaire des bobines, le faisceau se trouve également dévié.

L'application conjointe d'un champ magnétique et d'un champ électrique réglé de façon adéquate permet de maintenir le faisceau rectiligne

Cela permet d'identifier les propriétés de la force magnétique et noter qu'elle dépend de façon proportionnelle à la vitesse des électrons. En effet, dans la formulation classique, la seule en vigueur à l'époque, la physique quantique n'ayant pas encore désorienté la pensée, on peut écrire, par application du théorème de l'énergie cinétique, en supposant les électrons porteurs d'une charge encore inconnue  $-e$ , accélérés par la tension  $U_{AC}$ , et ayant une vitesse  $v$  entre les plaques de condensateur :

$$\frac{1}{2} m v^2 = -e U_{AC}$$

Ainsi, bien que ne connaissant pas la charge des électrons supposés, on voit qu'un quadruplement de la tension  $U_{AC}$  conduit à un doublement de leur vitesse. Pour une valeur de champ magnétique donné imposée par un courant dans les bobines d'Helmholtz, on devrait alors observer qu'en doublant la vitesse des électrons, il faut doubler la valeur du champ électrique compensateur du champ magnétique et donc que la force magnétique double. On sera alors à formuler l'idée :

**Un électron ayant une vitesse dans une direction perpendiculaire à un champ magnétique est soumis à une force orthogonale au champ magnétique et à son vecteur vitesse et dont l'intensité est proportionnelle à la vitesse.**

On peut ensuite, pour une tension  $U_{AC}$  fixée imposant une vitesse  $v$  fixée aux électrons, doubler la valeur du champ magnétique. Il suffit de doubler la valeur du champ électrique compensateur dans un premier temps, puis régler le courant dans les bobines pour que le faisceau électronique reste rectiligne. On devrait constater qu'il faut pour cela doubler l'intensité du courant dans les bobines, ce qui fait doubler la valeur du champ magnétique (voir l'expérience de Laplace). Autrement dit, la force magnétique est proportionnelle au champ magnétique.

Il reste à considérer qu'elle est proportionnelle à la charge, ce qui par analogie avec la force électrostatique, semble justifié.

On parvient ainsi à la **force de Lorentz** qui donne pour l'intensité de la force magnétique, une expression de la forme :

$$\|\vec{F}\| = e v \|\vec{B}\|$$

Avec pour la direction de cette force, la règle présentée plus haut, des trois doigts de la main droite, où le sens du courant est remplacé par celui du vecteur  $-e \vec{v}$

Faisons alors varier la direction du champ magnétique, en changeant l'orientation des bobines d'Helmholtz. On doit alors constater que si le champ magnétique  $\vec{B}$  est colinéaire au vecteur-vitesse  $\vec{v}$ , alors, en l'absence de champ électrique compensateur, il n'y a pas de déviation du faisceau électronique donc pas de force magnétique. Si  $\vec{B}$  est quelconque, seule la composante  $\vec{B}^\perp$ , orthogonale au vecteur vitesse, agit sur le faisceau.

La loi de Lorentz s'exprime alors sous une forme vectorielle générale, pour une particule porteuse d'une charge  $q$  de vecteur-vitesse  $\vec{v}$  en un point où le champ magnétique est  $\vec{B}$  :

$$\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

En annulant maintenant le champ compensateur et en maintenant un champ  $\vec{B}$  constant orthogonal aux rayons cathodiques, on peut déduire par les lois de la mécanique que la force de Lorentz a un travail nul, car elle est orthogonale au vecteur vitesse à tout instant, et donc que la trajectoire de l'électron dans le tube est circulaire uniforme (le poids de l'électron étant négligé). La seconde loi de Newton donne alors, en notant  $m$  la masse de l'électron, et  $B$ , l'intensité du champ magnétique :

$$m \frac{v^2}{R} = e v B$$

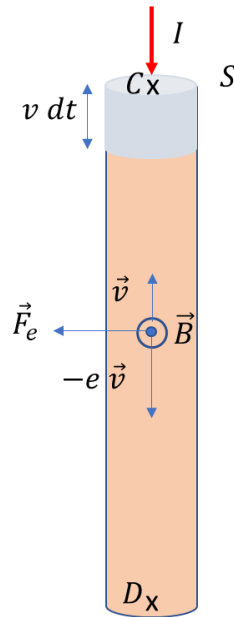
On en déduit :

$\frac{e}{m} = \frac{v}{R B}$
-------------------------------

Thomson a mesuré ce rapport dans son expérience de 1895, mais cela ne lui permit de connaître ni la masse de l'électron, ni sa charge. Il faudra attendre l'expérience de l'américain Millikan plus de deux décennies plus tard, pour connaître la charge de l'électron et en déduire ensuite sa masse.

**Remarque importante** : La force de Laplace introduite avant peut s'expliquer par la force de Lorentz. En effet, considérons un conducteur rectiligne filiforme  $[C, D]$  plongé dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  orthogonal à  $\overrightarrow{CD}$ , parcouru par un courant d'intensité  $I > 0$  lue de  $C$  vers  $D$  et donc soumis, comme nous l'avons vu, à une force de Laplace d'expression :

$$\vec{F}_{Laplace} = I \overrightarrow{CD} \wedge \vec{B} = I CD B \vec{u}$$



Désignons par  $n$  la densité volumique d'électrons libres dans le conducteur et faisons l'hypothèse qu'ils sont au nombre de  $N$  dans le conducteur et chacun animés d'un même vecteur vitesse  $\vec{v}$ . Désignons par  $S$  la section du conducteur, par  $e$  la charge élémentaire,  $dt$  une durée de temps élémentaire, par  $\vec{F}_e$  la force de Lorentz agissant sur un électron libre et par  $\vec{u}$  le vecteur unitaire de même sens que  $\vec{F}_e$ .

Pendant la durée  $dt$ , le nombre d'électrons  $dN$  franchissant la section  $S$  est celui contenu dans un cylindre de hauteur  $v dt$  donc de volume  $S v dt$  et la charge correspondante est :

$$dq = -e dN = -e n S v dt$$

L'intensité qui va de  $C$  vers  $D$  est alors :

$$I = -\frac{dq}{dt} = e n S v$$

Or :

$$N = n S CD$$

La somme des force de Lorentz agissant sur chaque électron de conduction est donc :

$$\vec{F}_{Lorentz} = N \vec{F}_e = N(-e \vec{v} \wedge \vec{B}) = N e v B \vec{u} = n S CD e v B \vec{u} = I CD B \vec{u} = \vec{F}_{Laplace}$$

**La force de Laplace n'est donc que la somme des forces de Lorentz agissant sur les porteurs de charge mobile, ici les électrons**

## V L'expérience de Millikan (1910)

Le principe de l'expérience est de pulvériser des gouttes d'huile qui se chargent par friction (effet triboélectrique) avant de tomber entre les deux armatures horizontales d'un condensateur plan dont la tension est réglable. En ajustant cette dernière, Millikan a pu s'arranger pour obtenir de certaines gouttes qu'elles soient en sustentation puis les faire remonter à vitesse constante. Il en a déduit que les charges négatives, dont les gouttes étaient porteuses, étaient toutes multiples entières d'une même charge  $-e$ , dont il n'a pas trouvé la juste valeur initialement, à cause d'une mauvaise mesure de la viscosité de l'air donnée par son assistant.

La mesure de cette charge actuellement donnée est, à quatre chiffres significatifs :

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

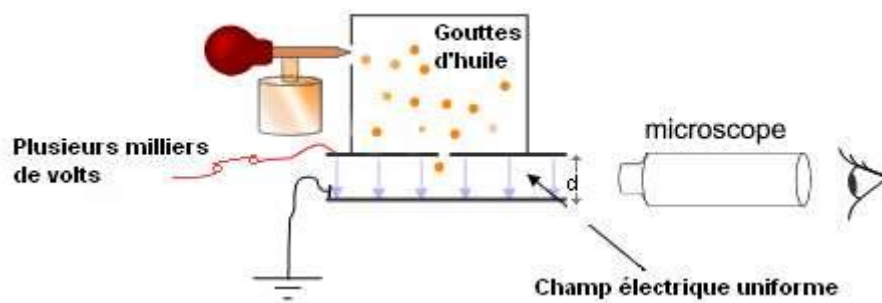


Schéma de l'expérience de Millikan

La valeur de la masse qui en a résulté, suite à l'expérience de Thomson est :

$$m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

### Comparaison des intensités de la force électrique et du poids :

Voyons un peu le rapport entre la force électrique et la force gravitationnelle s'exerçant sur un électron se trouvant entre les armatures d'un condensateur plan dont la tension est de 1 000 Volts et la distance entre plaques de 1 cm.

Intensité du champ électrique :

$$E = \frac{U}{d} = \frac{1\,000}{0,01} = 10^5 \text{ V/m}$$

Intensité de la force électrique :

$$F = e E \approx 1,6 \times 10^{-19} \times 10^5 = 1,6 \times 10^{-14} \approx 10^{-14} \text{ N}$$

Intensité de la force gravitationnelle (poids de l'électron):

$$P = m g \approx 9,1 \times 10^{-31} \times 9,8 \approx 8,9 \times 10^{-30} \approx 10^{-29} \text{ N}$$

Rapport :

$$\frac{F}{P} \approx 10^{15}$$

Le poids de l'électron est donc sans commune mesure négligeable devant la force électrique, même pour de très faibles champs électriques rencontrés dans la pratique.

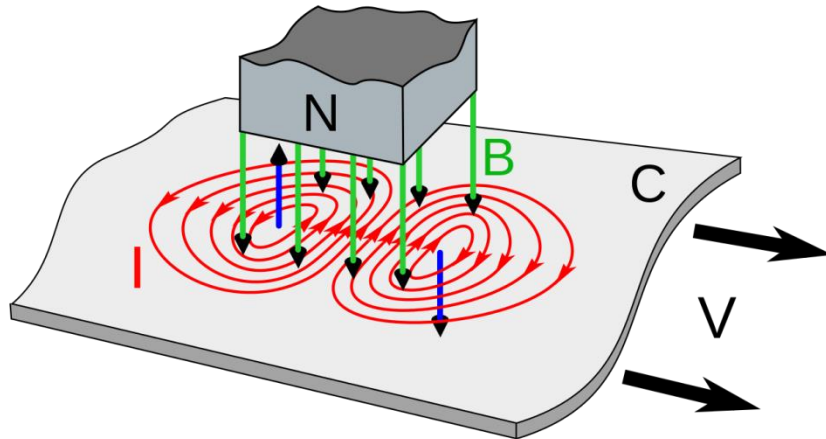
Cela explique que les électrons accélérés dans des tubes à vide, y acquièrent de très grandes vitesses de l'ordre du dixième de la vitesse de la lumière, car ils opposent peu d'inertie compte tenu de leur faible masse.

La force de Lorentz et la force de Laplace permettent d'expliquer de nombreux phénomènes liés au magnétisme et conduisent à des technologies, comme les galvanomètres à cadre mobile utilisés en ampèremètres ou en voltmètres, ou bien en tant que galvanomètres balistiques, pour la mesure de la charge d'un condensateur.

Nous n'allons présenter qu'une des conséquences, le freinage électromagnétique par courants de Foucault, employé pour le freinage de véhicules comme des trains.

## **VI Freinage électromagnétique par courants de Foucault**

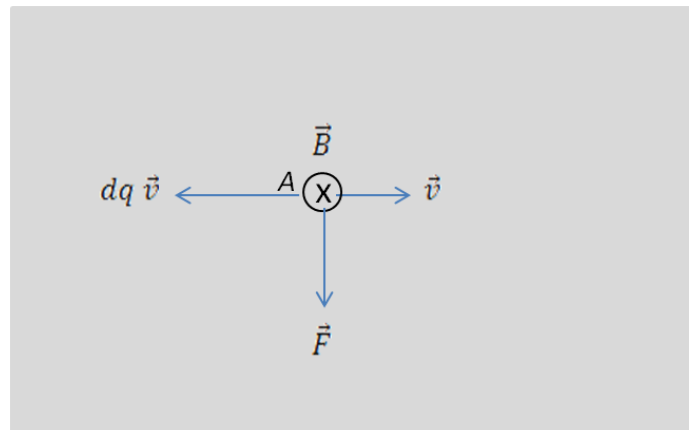
Dans une masse métallique se déplaçant perpendiculairement aux lignes de champ magnétique créées par un aimant (naturel ou électro-aimant), apparaissent des courants induits appelés courants de Foucault (en rouge sur la figure) et responsables d'une force de freinage de la masse en déplacement.



Courants de Foucault induits dans une plaque métallique (source Wikipédia)

Voyons une explication simple de ce phénomène, à la lumière de la force de Lorentz.

Un volume  $dV$  en point  $A$  de la plaque, en lequel les porteurs de charge mobiles que sont les électrons, ont une densité  $n = dN/dV$  ( $dN$  = nombre d'électrons mobiles dans le volume élémentaire  $dV$ ) est soumis à une force de Lorentz d'expression :



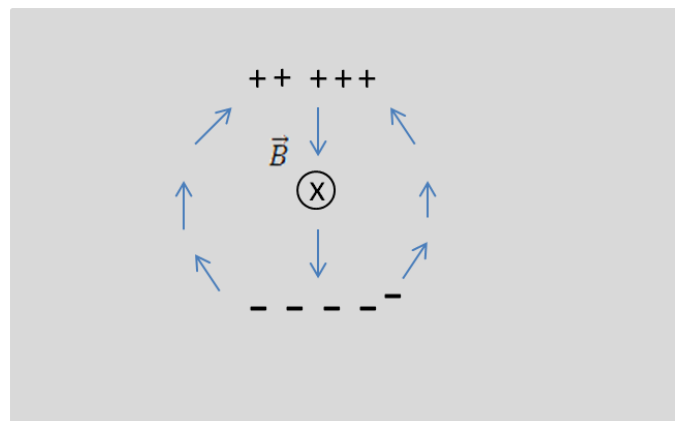
$$\vec{F} = dq \vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$\text{avec : } dq = -n e dV$$

Cette force est à la fois orthogonale au vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  et au vecteur vitesse  $\vec{v}$  de la plaque, donc déplace ces porteurs dans un plan parallèle à la plaque

perpendiculairement au vecteur vitesse, et de sens donné par la règle des trois doigts de la main droite, donc vers le bas de la plaque sur la figure.

Il en résulte une accumulation de charges négatives en bas de plaque, et positives en haut, comme dans l'effet Hall, mais qui se dissipe en boucles de courants, le matériau aux alentours étant conducteur. On peut voir cela ainsi : Le champ magnétique crée une sorte de condensateur, comme dans l'effet Hall, dans le conducteur en mouvement et ce condensateur se boucle en court-circuit dans la masse du conducteur, d'où la formation de ces spires concentriques.



Dans la zone de l'aimant où les lignes de champ sont parallèles, les courants induits sont majoritairement orthogonaux à la fois au champ  $\vec{B}$  et au vecteur vitesse  $\vec{v}$ . Du fait de ces courants, les électrons sont donc animés, dans le référentiel par rapport auquel la plaque bouge, d'une composante de vitesse  $\vec{v}'$  supplémentaire, opposée au sens du courant. Plus précisément, leur vecteur vitesse est  $\vec{v} + \vec{v}'$

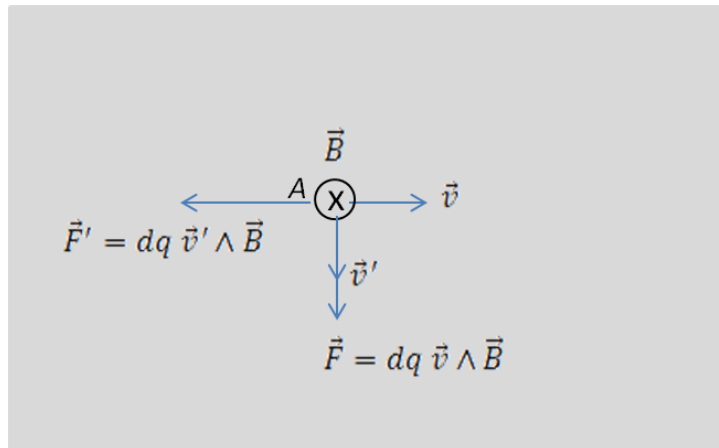
En un point A de la plaque, les électrons d'un volume  $dV$  sont donc soumis à la force de Lorentz :

$$\vec{F} = dq (\vec{v} + \vec{v}') \wedge \vec{B} = dq \vec{v} \wedge \vec{B} + dq \vec{v}' \wedge \vec{B}$$

La première composante de cette force  $\vec{F} = dq \vec{v} \wedge \vec{B}$  est celle qui est à l'origine du courant induit. Si on se place dans le référentiel de la plaque, c'est une force de la nature de la force de Laplace.

La seconde composante  $\vec{F}' = dq \vec{v}' \wedge \vec{B}$  est une force opposée au vecteur-vitesse  $\vec{v}$ , qui agit ainsi comme une force de freinage sur la plaque.





Remarque :

Il est à noter qu'un volume  $dV$  contient également des électrons liés et des charges positives qui sont soumises à la force de Lorentz. Cependant, n'étant pas mobiles, ces derniers ne génèrent pas de courants induits.

Application : freinage de train

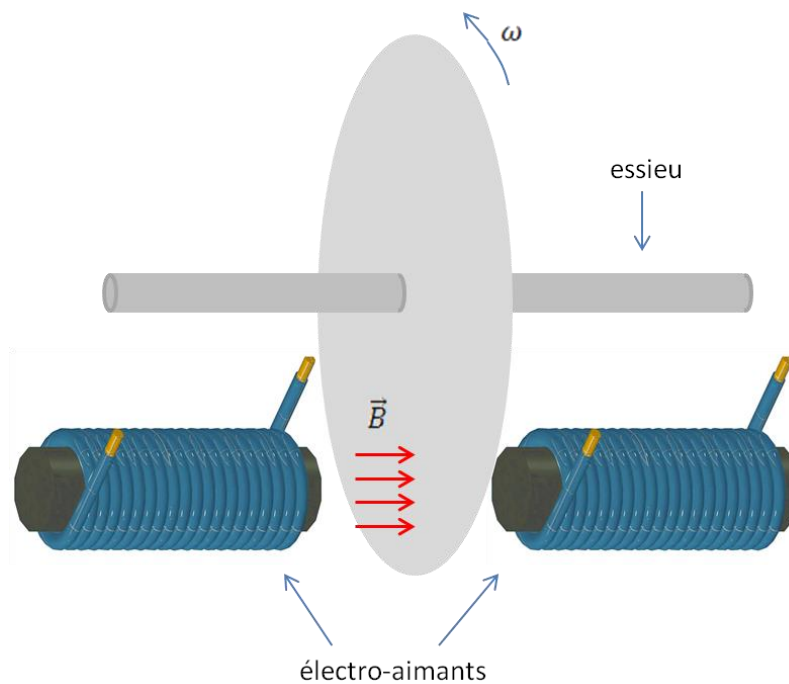


Le Shinkansen (train japonais)

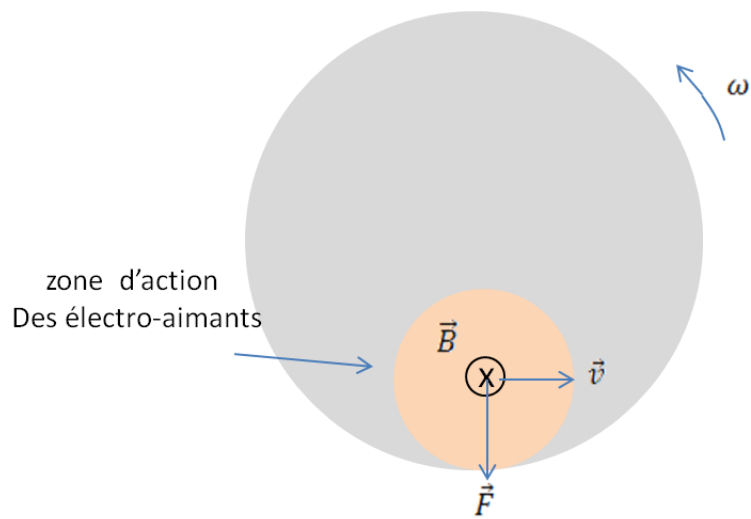


Freinage par courant de Foucault- Shinkansen source wikipédia

Le principe est employé pour freiner les essieux de trains. Un disque en rotation solidaire de l'essieu, est soumis au champ électromagnétique d'un électro aimant, ce qui a pour effet de générer un couple de freinage, selon un principe similaire à celui décrit précédemment



Un volume de porteurs de charge mobiles (électrons) dans la zone d'action des électro-aimants est soumis à une force de Lorentz, qui déplace les électrons dans le sens d'un rayon du disque (vers la périphérie sur notre schéma).



Il en résulte une condensation de charges antagonistes entre le centre et la périphérie du disque, laquelle se dissipe en boucles de courant (courants induits de Foucault). Chaque portion de courant créé une force de freinage  $d\vec{f}$  (force de Laplace) laquelle produit un couple de freinage sur le disque.

