

UAA6 Applications : L'électromagnétisme

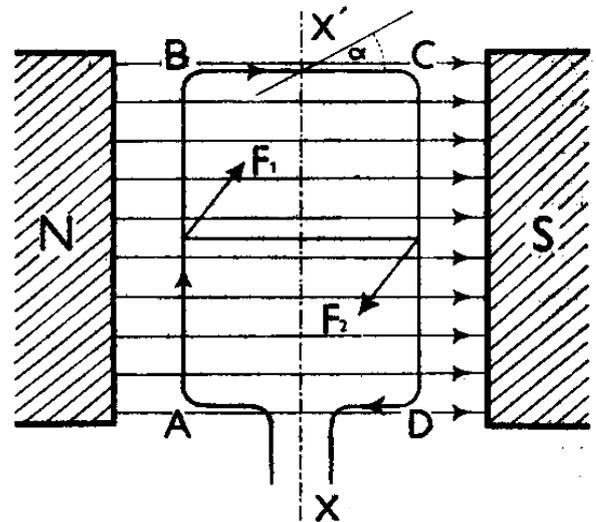
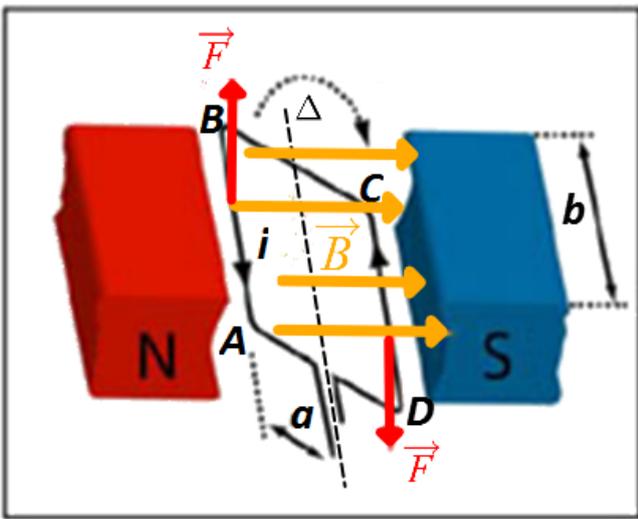
I- ACTION D'UN CHAMP D'INDUCTION UNIFORME B SUR UN CIRCUIT RECTANGULAIRE	2
II- PRINCIPE DU MOTEUR À COURANT CONTINU	5
5	
III- PRINCIPE DU HAUT-PARLEUR	7
IV- LE SPECTROMÈTRE DE MASSE	8
1) Le sélecteur de vitesse	8
2) Le spectromètre de masse	9
3) Utilisation du spectromètre de masse	10
4) Exercices résolus	10
V- ANNEXE : LE GALVANOMÈTRE (OU AMPÈREMÈTRE) À CADRE MOBILE	11

UAA6 Applications : L'électromagnétisme

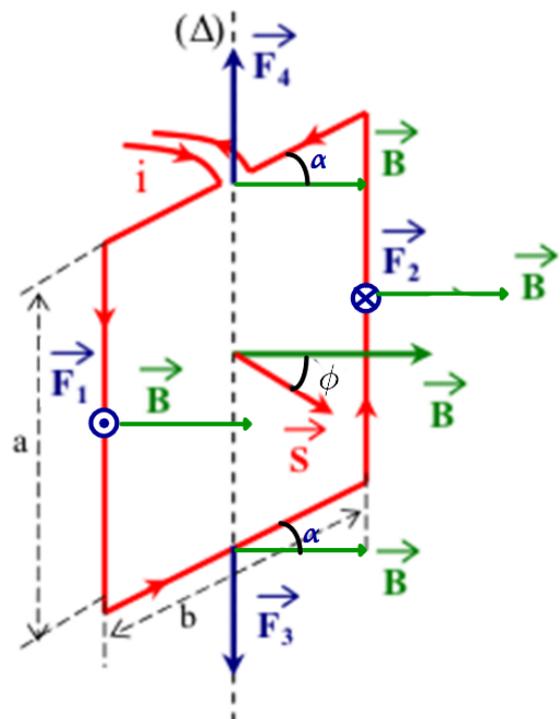
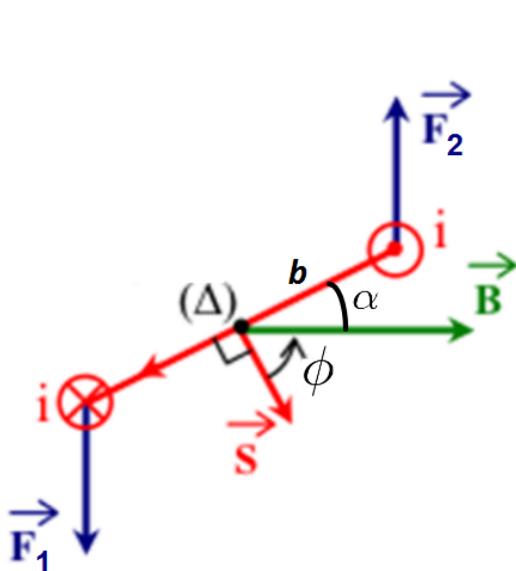
I- Action d'un champ d'induction uniforme B sur un circuit rectangulaire

Considérons le conducteur ABCD placé dans un champ magnétique uniforme d'induction B .

Lorsqu'on fait passer un courant électrique i dans le conducteur, celui-ci tourne autour de son axe Δ et tend à se mettre perpendiculairement à la direction du champ.



a) Cas général



Soit ϕ l'angle que fait la normale à la spire avec la direction de \vec{B} .

Soit α l'angle entre le vecteur induction magnétique et le petit côté du cadre (voir figure ci-dessus).

Chacun des côtés du cadre est soumis à une force de Laplace appliquée en son milieu. Ces forces ont les propriétés suivantes :

- $\vec{F}_3 = -\vec{F}_4$ et $F_3 = F_4 = B.i.b.\sin\alpha$

Les forces sont de même intensité, de sens contraires et toutes deux parallèles à l'axe Δ .

Elles sont compensées par le principe "action-réaction" car elles s'exercent sur les points d'ancrage de l'axe Δ . Elles agissent selon la même ligne d'action et n'entraînent donc aucune rotation autour de l'axe Δ

- $F_1 = F_2 = B.i.a$

i est toujours perpendiculaire à \vec{B} , le sinus de leur angle est toujours égal à 1

Ces deux forces **ne sont pas parallèles** à l'axe Δ , elles ont donc un effet de rotation du cadre autour cet axe.

\vec{F}_1 et \vec{F}_2 forment un couple de forces.

Rappel :

Lorsque deux forces agissent sur le même objet mais avec des points d'application différents et selon des lignes d'action parallèles mais différentes, l'objet se met à tourner sur lui-même jusqu'au moment où il atteint une position d'équilibre de rotation.

On parle alors d'un couple de forces agissant sur l'objet.

Le moment d'un couple de forces identiques est défini par :

$$M_{\vec{F}} = \vec{F} \cdot \vec{d}$$

\vec{F}_1 et \vec{F}_2 forment un couple de forces dont le moment vaut :

$$M_{\vec{F}_1\vec{F}_2} = F_{1,2} \cdot b \cdot \sin\phi = B.i \cdot \underbrace{b \cdot \sin\phi}_S$$

$$M_{\vec{F}_1\vec{F}_2} = B.i.S \cdot \sin\phi \quad S: \text{surface de la spire}$$

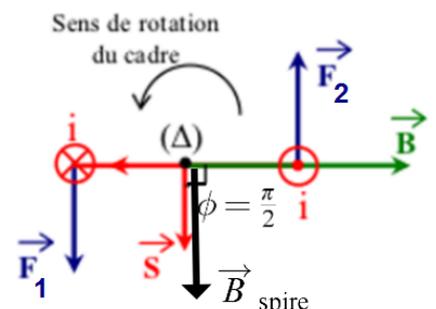
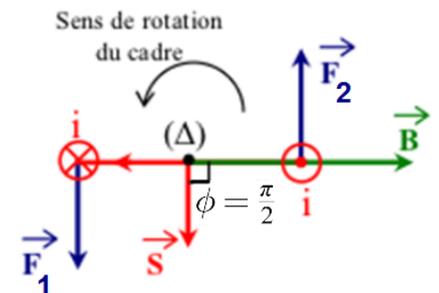
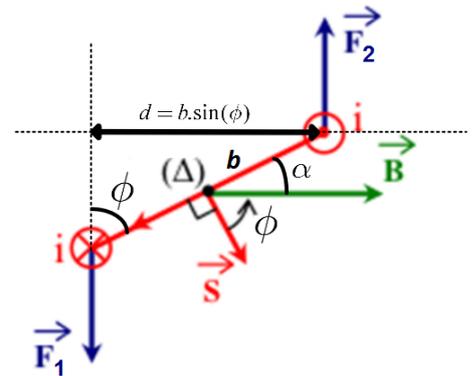
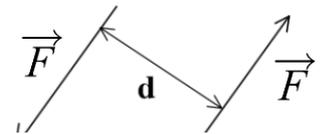
b) Lorsque $\alpha = 0$ et $\phi = \pm \frac{\pi}{2}$

- Dans ce cas \vec{F}_3 et \vec{F}_4 n'existent pas car $\vec{B} \perp \vec{i}$ et $\sin\alpha = 0$ donc les forces électromagnétiques sont nulles.

L'action des forces électromagnétiques est maximale puisque :

$$M_{\vec{F}_1\vec{F}_2} = B.i.S \cdot \underbrace{\sin\phi}_1 = B.i.S$$

- Le champ magnétique produit par la spire \vec{B}_{spire} est dans le même sens que le vecteur \vec{S} (normal à la spire) par la règle de la main droite. L'action électromagnétique est donc optimale lorsque le champ \vec{B}_{spire} produit par le courant de la spire est perpendiculaire champ extérieur inducteur \vec{B} .



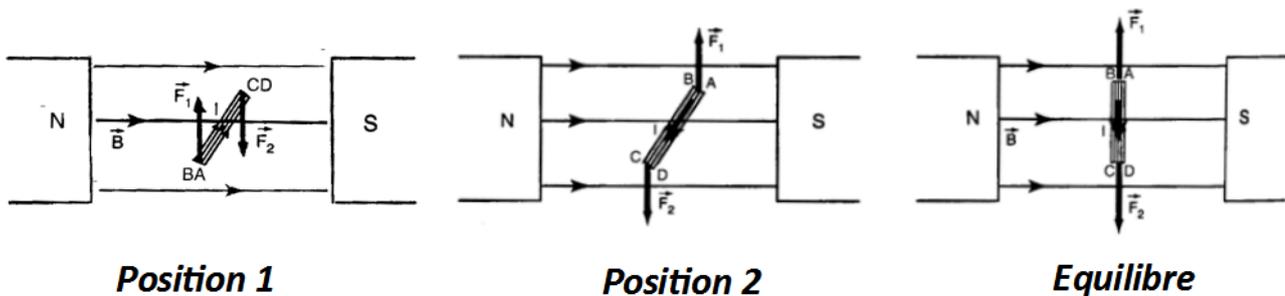
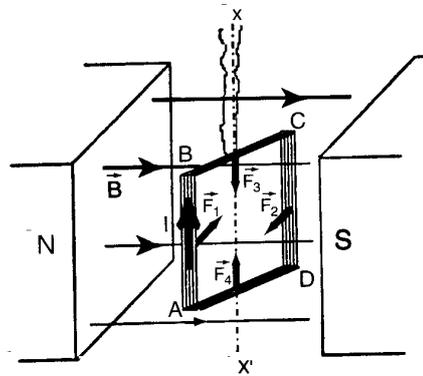
c) Conclusions

L'action des forces électromagnétiques augmente avec :

- Les dimensions a et b du cadre : la surface S
- Les intensités du courant i et du champ inducteur B
- La position angulaire ϕ du cadre par rapport aux lignes de champ de \vec{B}

En pratique, lors de la rotation du cadre, sous l'effet d'inertie, le cadre ne s'arrête pas les deux forces ramènent à nouveau le cadre dans sa position d'équilibre.

Il y a donc un mouvement de va-et-vient entre la position 1 et la position 2 autour d'une position d'équilibre dans laquelle le cadre va s'immobiliser après quelques oscillations. (Voir figure ci-dessous)



d) A
vec
plu
sie
urs
spi
res

Si au lieu d'une spire il y en a N , l'induction magnétique soumet chacune d'elles à un couple de forces et la somme des moments des couples de forces équivaut à $M_{F \text{ total}}^m = N \cdot B \cdot i \cdot S \cdot \sin \phi$.

Le raisonnement établi précédemment reste valable pour une spire circulaire ou pour un solénoïde.

Le solénoïde, placé dans une induction B , sera soumis à un couple de forces qui orientera son axe dans la direction de \vec{B} , l'induction le traversera de la face S à la face N.

e) Exemples :

Soit un repère orthonormé Oxyz. On suppose que l'axe Oz sort du plan de la feuille. Un cadre rectangulaire ABCD de 8cm (AB) sur 6cm (BC) est parcouru par un courant de 10 A. Le côté AB coïncide avec l'axe Oy. Sachant que le cadre fait un angle de 30° avec le plan Oxy et qu'il est placé dans une induction magnétique de 0,2 T dont la direction est parallèle à Ox, déterminer le moment du couple à exercer pour le maintenir en équilibre.

Figure 1 : Vue face au cadre ABCD

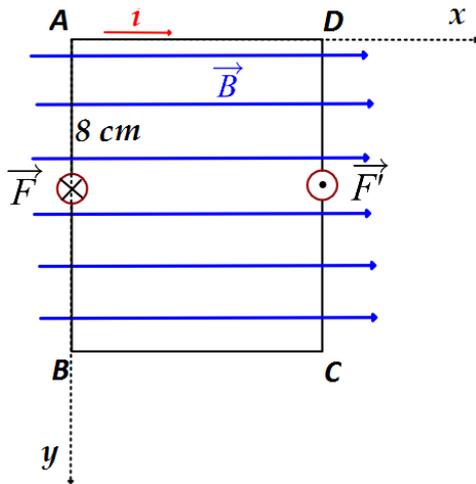
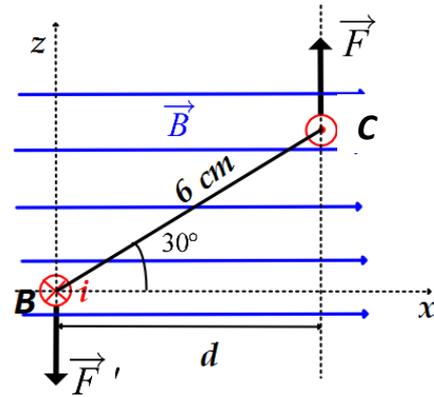


Figure 1 : Vue face à BC



Calcul de F et F' : les forces sont exercées respectivement sur les parties AB et DC du cadre.

L'angle entre i et \vec{B} est : $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$

$$F = F' = B \cdot i \cdot l \cdot \sin \alpha = 10 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 0,2 \cdot 1 = \underline{16 \cdot 10^{-2} \text{ N}}$$

Il faudra exercer un moment de couple de forces qui s'opposera à celui de \vec{F} et \vec{F}' et dont l'intensité sera égale.

$$M_{\vec{F}} = F \cdot d = 16 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-2} \cdot \cos 30^\circ = 16 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \underline{83,14 \cdot 10^{-4} \text{ N.m}}$$

II- Principe du moteur à courant continu

Soit une spire rectangulaire ABCD placée verticalement et mobile autour d'un axe XX' .

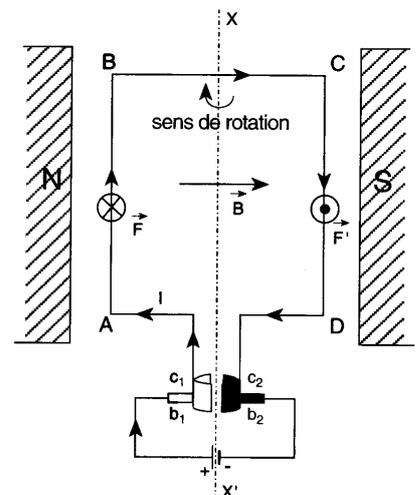
Cette spire est placée dans une région de champ uniforme B créé par un aimant ou un électro-aimant.

Les extrémités A et D sont solidaires de deux demi-anneaux en cuivre

C1 et C2 sont **appelés collecteurs** et isolés l'un de l'autre et tournent avec la spire. Des **balais** de carbone qui frottent sur les collecteurs sont connectés aux bornes d'un générateur.

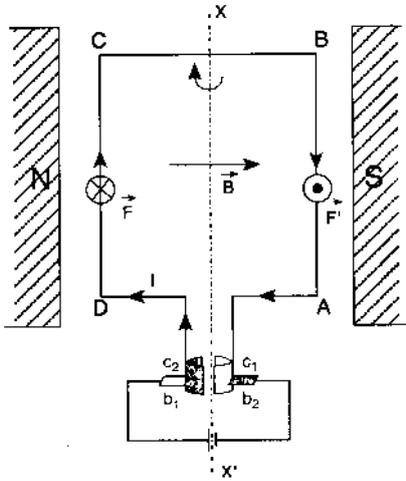
- **Les balais sont fixes**

Le plan ABCD est parallèle aux lignes de champ et le courant entre par le collecteur C_1 relié à la borne + du générateur par l'intermédiaire du balai b_1 . Le courant circule donc dans le sens ABCD.



Les côtés AB et CD sont parcourus par des courants de même intensité et de sens contraires : les forces électromagnétiques \vec{F} et \vec{F}' qui leur sont appliquées sont aussi de même intensité et de sens contraires. Il s'agit d'un couple de forces provoquant une rotation de la spire.

- **Après un quart de tour**



Après un peu plus d'un quart de tour, chaque collecteur a quitté son balai pour entrer en contact avec l'autre balai.

Ainsi, le collecteur C_1 est mis en contact avec le balai b_2 et le collecteur C_2 est connecté au balai b_1 .

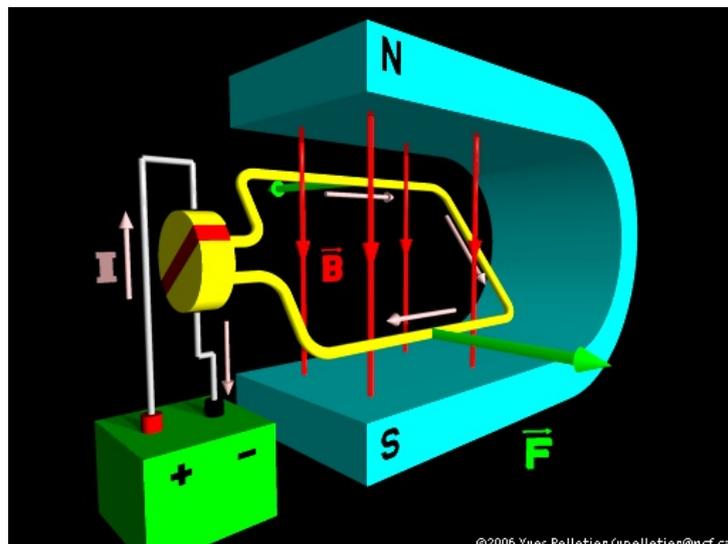
le courant dans la spire a changé de sens et circule alors dans le sens $DCBA$.

- **Après un demi-tour**

La spire se retrouve à nouveau dans la position parallèle aux lignes de champ. Le côté DC est alors à gauche et le côté AB à droite.

Les forces \vec{F} et \vec{F}' agissant respectivement sur le côté gauche et le côté droit de la spire ne sont pas modifiées et maintiennent le même sens de rotation.

Après un demi-tour encore, on se retrouve dans la situation de départ. Le système de balais et de collecteurs est donc nécessaire pour assurer une rotation continue de la spire.



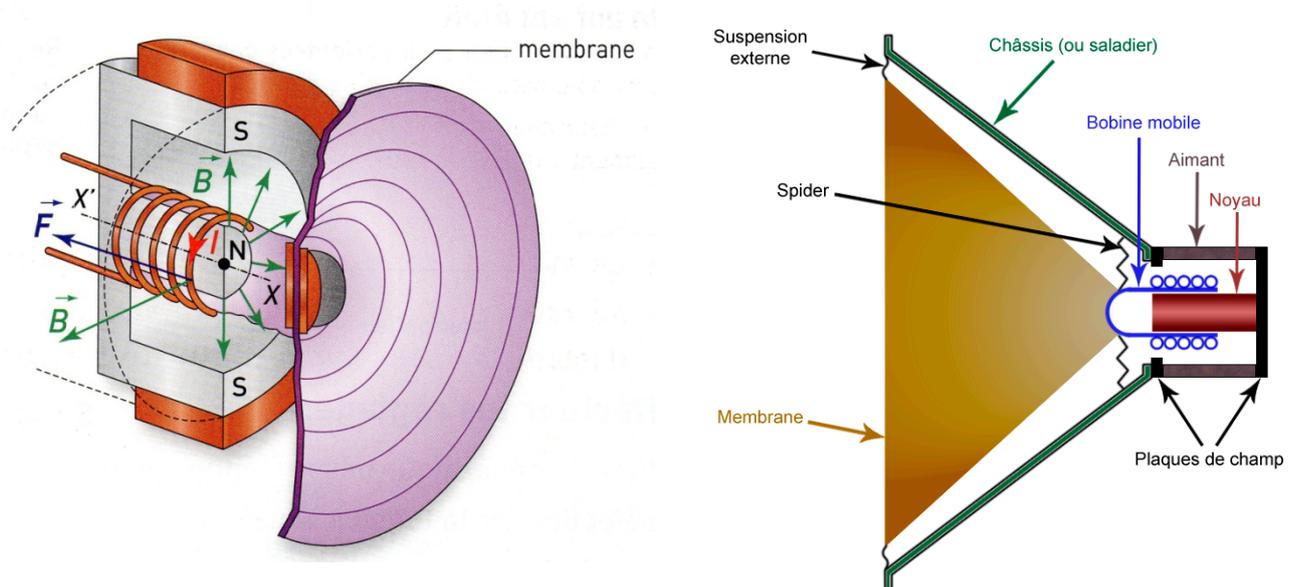
III- Principe du haut-parleur

Le haut-parleur le plus largement utilisé (99%) est le haut-parleur électrodynamique. Sa fonction, dans une enceinte, est d'agir comme un double transformateur d'énergie :

- Il reçoit le signal audio, qui est une énergie électrique, qu'il va transformer en une énergie mécanique. En effet, certaines parties du haut-parleur (la bobine mobile) vont se mettre en mouvement lorsqu'un signal audio est reçu.
- Il transforme cette énergie mécanique en une énergie acoustique, grâce à sa membrane. Celle-ci est reliée à la bobine mobile, et aura donc les mêmes mouvements que cette dernière. C'est en se déplaçant sous l'action de la bobine mobile que la membrane crée une pression acoustique qui est le son produit (voir cours sur les ondes).

Principe de fonctionnement :

Coupe longitudinale d'un haut-parleur



L'**aimant** crée un champ magnétique au niveau de la bobine.

La **bobine mobile** est parcourue par un courant, qui provient de l'amplificateur audio. Il apparaît une force \vec{F} qui fait déplacer la bobine mobile sur l'axe X'X (dans un sens ou dans l'autre) en fonction du sens du courant qui la parcourt.

Comme la bobine mobile est reliée à la **membrane**, ce qui suit les mouvements de la bobine. Par ses déplacements, la membrane exerce des pressions sur l'air environnant (des surpressions lorsque la bobine et la membrane se dirigent vers l'extérieur du haut-parleur, et des dépressions lorsque la bobine et la membrane rentrent vers l'intérieur).

Ce sont ces variations de pression qui produisent le son que l'on perçoit.

Le rôle du **spider** et de la **suspension extérieure** est simplement de guider le mouvement de va-et-vient de la bobine et de la membrane bien dans l'axe du haut-parleur, et que ceux-ci n'aillent pas de travers.

IV- Le spectromètre de masse

1) Le sélecteur de vitesse

Une particule de masse m et de charge q , au repos, est accélérée par une différence de potentiel V connue.

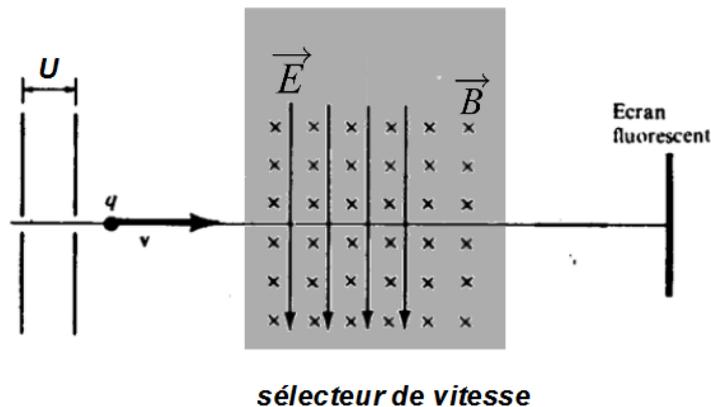
Toute l'énergie potentielle qu'elle possédait est alors transformée en énergie cinétique:

$$E_{\text{potentielle}} = q.U \quad \text{transformée en} \quad E_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\text{donc} \quad q.U = \frac{1}{2}mv^2 \Leftrightarrow \boxed{\frac{q}{m} = \frac{v^2}{2U}}$$

En mesurant la vitesse de la particule on peut alors calculer le rapport $\frac{q}{m}$

- La particule accélérée passe ensuite dans **un sélecteur de vitesse**. Dans cette région de l'espace la particule de masse m et de charge q est soumise à champ électrique et à un champ magnétique uniformes et perpendiculaires entre eux.



La particule est alors soumise à une force électromotrice :

$$F_{EM} = qv \wedge B \Leftrightarrow F_{EM} = q.v.B \cdot \underbrace{\sin \alpha}_1 = q.v.B$$

Lorsque la particule rentre dans le sélecteur de vitesse sa vitesse est perpendiculaire au champ donc $\alpha = 90^\circ$.

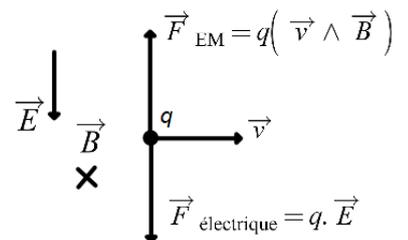
et à une force électrique: $F_{\text{électrique}} = q.E \Leftrightarrow F_{\text{électrique}} = q.E$

Les deux forces sont de sens opposés et lorsqu'elles se compensent alors :

$$F_{EM} = F_{\text{électrique}} \Leftrightarrow q.v.B = q.E \Leftrightarrow \boxed{v = \frac{E}{B}}$$

La résultante des deux forces est alors nulle pour une valeur déterminée de $\frac{E}{B}$

Quelles que soient leur charge et leur masse, on peut donc déterminer la vitesse des particules en ajustant les champs croisés. C'est le rôle du sélecteur de vitesse

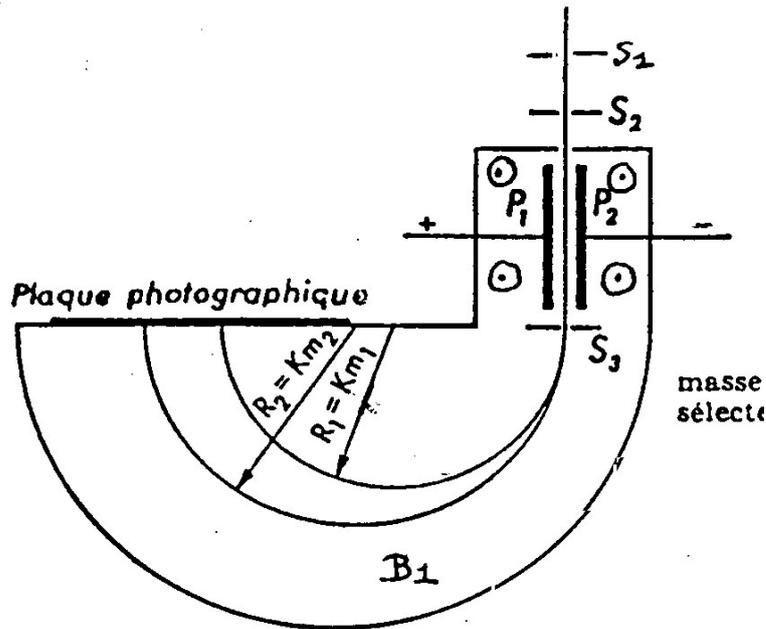




Thomson a utilisé un appareil de ce genre pour mesurer le rapport de la charge à la masse de particules chargées émises par une cathode (électrons). Il trouva également que leur vitesse dans son appareil, était environ un dixième de la vitesse de la lumière, ce qui est bien supérieur aux vitesses observées auparavant.

2) Le spectromètre de masse

Le spectromètre de masse permet de séparer des ions de même charge, mais de masses différentes.



Spectrographe de masse de Bainbridge ayant un sélecteur de vitesse

Dans la source d'ions, on ionise les molécules ou atomes en les bombardant avec des électrons.

Une partie de ceux-ci sortent par deux fentes parallèles très étroites S_1 et S_2 . Le potentiel de S_1 est 1000 fois plus grand que celui de S_2 . Les ions sont donc accélérés jusqu'en P_2 mais leur vitesse varie dans de larges limites car leur charge diffère.

Les particules qui sortent de S_2 , traversent alors un sélecteur de vitesse (deux plaques de condensateur P_1 et P_2 connectés à un générateur de courant continu et un champ magnétique perpendiculaire au champ E créé.).

Les ions passant par S_3 auront la même charge, leur vitesse dépendra du rapport $\frac{E}{B}$ (avec $E = \frac{U}{d}$), mais leur masse sera différente.

Ils débouchent ensuite dans une région où règne un second champ magnétique \vec{B}_1 perpendiculaire à leur trajectoire. Les ions sont alors déviés par la force électromagnétique et leur trajectoire devient alors circulaire.

$$R = \frac{mv}{qB_1}$$

Plus la masse des particules sera importante, plus le rayon de courbure de la trajectoire sera grande.

Les ions par impact viennent ensuite impressionner une plaque photographique.

3) Utilisation du spectromètre de masse

Le spectromètre de masse a été initialement développé dans des buts de recherche en physique nucléaire afin d'identifier les atomes et leurs isotopes naturels (280/325 furent ainsi découverts). Il permet aussi de déterminer la composition chimique d'un échantillon. Les spectromètres de masse sont très précis, donc très utiles pour l'analyse de mélanges complexes.

Ils ont permis par exemple :

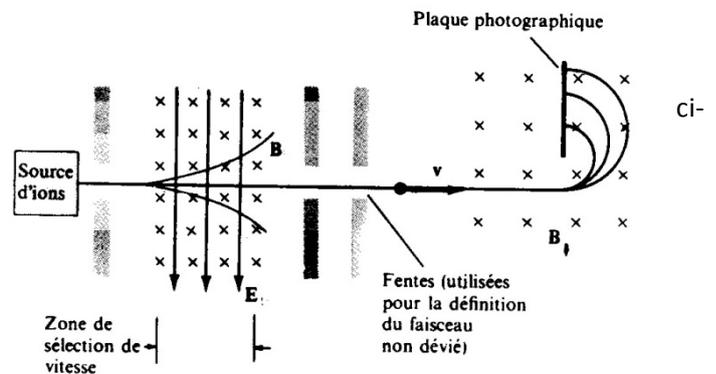
- De séparer les produits résultant du raffinage et du traitement du pétrole qui contiennent divers hydrocarbures de compositions chimiques relativement proches.
- D'établir en biologie moléculaire, en quelques minutes seulement, la séquence linéaire des acides aminés dans une molécule de protéine.
- De séparer l'isotope fissible de l'uranium (^{235}U) d'un mélange d'isotopes ^{235}U et ^{238}U pendant la seconde guerre mondiale afin de développer des armes.
- De rendre possible l'utilisation d'isotopes stables comme traceur en médecine. (ex : ^{17}O et ^{18}O qui ne sont pas radioactifs.)

Autre exemple d'utilisation :

La différence de masse des isotopes d'atomes légers (C, O, H) peut induire des vitesses de réaction, d'évaporation, légèrement différentes selon les cas. Les rapports des isotopes présents dans les minéraux ou les organismes vivants peuvent varier légèrement d'un endroit à un autre. On a pu remonter à la source du carbone utilisé par le plancton dans un lac et ainsi trier les fragments de plusieurs colonnes grecques portant des inscriptions.

Exercice:

Déterminer l'erreur qui se trouve sur le schéma contre



4) Exercices résolus

- 1) Quel champ magnétique faut-il pour qu'un ion O_2^+ se déplace sur une orbite de 2 m, sa vitesse étant de 10^6 m/s ?

Remarque : la masse de O_2^+ est approximativement de 32 uma.

$$R = \frac{mv}{qB} \Leftrightarrow B = \frac{mv}{qR} = \frac{32,1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 10^6}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2} = \underline{0,167\text{T}}$$

- 2) Dans un spectromètre de masse, des ions de charge q ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C) sont accélérés par une tension $V = 4800$ V, leur vitesse initiale étant nulle. Ils pénètrent dans un champ magnétique $B = 0,1$ T uniforme perpendiculaire à la vitesse acquise.

Les ions arrivent sur une plaque sensible après avoir décrit des demi-cercles. Deux taches se forment à 118,3 cm et 121,7 cm de la fenêtre d'admission des ions. Les ions sont en fait des ions chlorures Cl^- .

La masse atomique molaire du chlore étant 35,5 g, on peut en déduire les proportions isotopiques du chlore.

$$\left. \begin{aligned} qU &= \frac{1}{2}mv^2 \\ R &= \frac{mv}{qB} \Leftrightarrow v = \frac{RqB}{m} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \cancel{q} \cdot U = \frac{1}{2} \cancel{m} \cdot \frac{R^2 \cancel{q} B^2}{\cancel{m}} \Leftrightarrow \frac{q}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2} \Leftrightarrow \boxed{\frac{m}{R^2} = \frac{qB^2}{2E}}$$

$$\frac{m}{R^2} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2}}{2.4800} = 1,66 \cdot 10^{-25} \text{ kg/m}^2$$

Lorsque m est exprimé en *u.m.a.* et R en *mètre* alors $m = 100 \cdot R^2$

$$R_1 = \frac{1,183}{2} = 0,5915m$$

Les deux rayons valent : $R_2 = \frac{1,217}{2} = 0,6085m$

donc les masses sont : $\begin{cases} m_1 = 100 \cdot (0,5915)^2 = 35,0 \text{ u.m.a.} & {}^{35}\text{Cl} \\ m_2 = 100 \cdot (0,6085)^2 = 37,0 \text{ u.m.a.} & {}^{37}\text{Cl} \end{cases}$

D'après la valeur de la masse atomique du Cl, on voit qu'il y a 75 % de ${}^{35}\text{Cl}$ et 25 % de ${}^{37}\text{Cl}$ dans le chlore naturel.

Annexes :

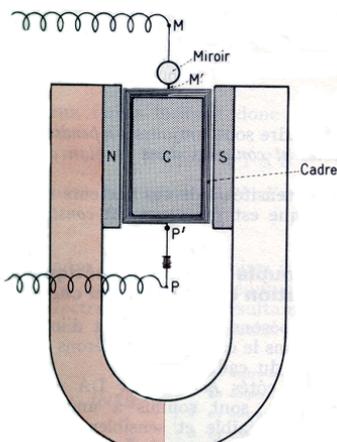
- Le nombre d'isotopes (atomes contenant le même nombre Z de protons mais qui diffèrent par leur nombre N de neutrons) existant à l'état naturel, pour un élément donné, varie entre un pour l'or ou le fluor, et dix pour l'étain. Puisqu'il y a environ 100 éléments différents, il y a en moyenne environ trois isotopes par élément.
- La masse atomique d'un atome est la masse de cet atome exprimée à l'aide de l'unité de masse atomique (*u.m.a.*), c'est-à-dire le 1/12 de la masse de l'isotope 12 du carbone.

(V. p. E.M.27; tableau reprenant les valeurs pour p, n, e)

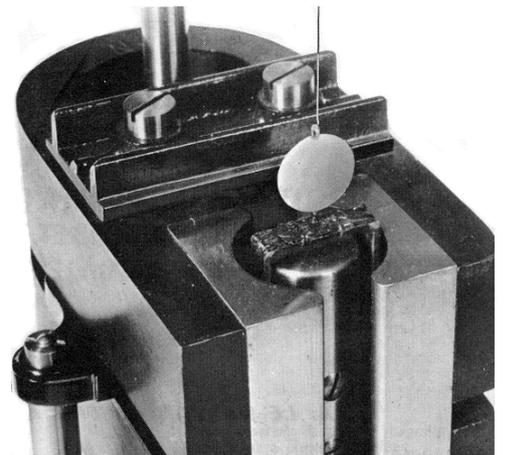
- La masse des atomes donnée dans le tableau périodique donne la valeur moyenne de la masse atomique d'un atome.

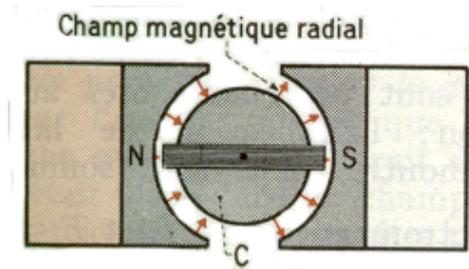
La masse de chaque isotope d'un élément est pondérée par le % de l'abondance de celui-ci dans la nature.

$$\text{Carbone} : 98,89 \cdot 12/100 + 0,0111 \cdot 13/100 = 12,011 \text{ u.m.a.}$$



V- Annexe : Le galvanomètre (ou ampèremètre) à cadre mobile





Un galvanomètre à cadre du champ magnétique sur un courants de très faible

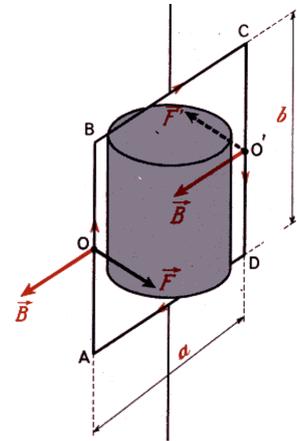
mobile est un appareil utilisant l'action courant pour mesurer ou déceler des intensité.

Un cadre ABCD (généralement rectangulaire) est formé par une bobine rectangulaire comprenant quelques centaines de spires d'un fil de cuivre fin. Ce cadre est recouvert d'un verni isolant et suspendu entre deux points fixes M et P par des fils métalliques fins, leur tension étant assurée par un ressort.

Le cadre peut tourner autour de l'axe MP et ses côtés verticaux AB et CD se déplacent entre les pièces polaires N et S d'un aimant et un cylindre de fer doux C. On donne aux pièces polaires une forme cylindrique, de même axe que C, de façon à réaliser un entrefer étroit où règne un champ magnétique intense.

Dans cet entrefer, les lignes d'induction sont normales (perpendiculaires) au deux surfaces voisines :

Le champ \vec{B} est radial de même intensité dans tout l'entrefer et toujours dans le plan du cadre, quelle que soit la position de celui-ci.



Lorsque le cadre est parcouru par un courant d'intensité i , les côtés verticaux sont soumis à des forces \vec{F} et \vec{F}' de même intensité et formant un couple de moment égal à:

$$M_{\vec{F}, \vec{F}'} = N \cdot B \cdot i \cdot S$$

Le moment de couple ne dépend pas de la position du cadre puisque la direction du courant i reste perpendiculaire à la direction du vecteur \vec{B} quel que soit la position du cadre dans l'entrefer.

Le couple de forces électromagnétiques fait tourner le cadre dans le sens des forces \vec{F} et \vec{F}' . Il en résulte une torsion des fils de suspension MM' et PP', qui réagissent en exerçant sur le cadre un couple de torsion de sens contraire au couple électromagnétique et dont le moment a pour expression :

$$M_T = C \cdot \delta$$

C : constante de torsion des fils

δ : angle de rotation du cadre à partir de sa position zéro

A l'équilibre les deux moments de couple sont égaux :

$$M_{\vec{F}, \vec{F}'} = M_T \Leftrightarrow N \cdot B \cdot i \cdot S = C \cdot \delta \Leftrightarrow \delta = \frac{N \cdot B \cdot S}{C} \cdot i$$

Pour un galvanomètre donné $\frac{N \cdot B \cdot S}{C}$ est une constante de sorte que la déviation du cadre est proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse. Le sens de rotation du cadre dépend du sens du courant.

Remarque :

On peut augmenter la sensibilité du galvanomètre :

- Soit en augmentant l'intensité de l'induction B,
- Soit en diminuant la constante de torsion (fil très fin).

Détermination de l'angle de rotation du cadre (méthode de Poggendorff)

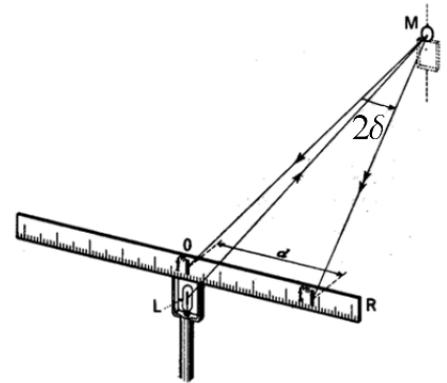
On utilise un petit miroir solidaire du cadre et une lampe L qui se trouve

face au miroir, sous une latte graduée.

La distance, D, entre le miroir et la latte est connue et la déviation, d, du spot lumineux apparaît sur la latte. Lorsque le miroir tourne d'un angle α , le rayon réfléchi tourne d'un angle 2α .

$$\text{tg } 2\delta = \frac{d}{D}$$

Si l'angle α est petit, $\text{tg } 2\alpha \approx 2\alpha$ radian et donc : $\delta ; \frac{d}{2.D}$

**Exemple :**

Le cadre d'un galvanomètre possède 500 spires rectangulaires de 3 cm de hauteur et de 2 cm de largeur. Il est supporté par des fils dont la constante de torsion est de 10^{-7} m.N par radian.

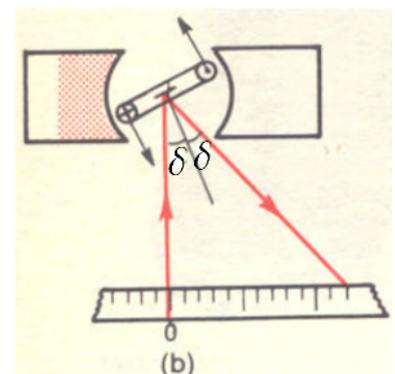
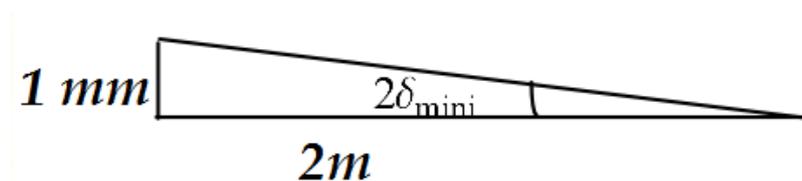
Le cadre tourne dans un champ magnétique radial dont l'induction a pour intensité 0,2 T.

a) Calculer la constante α / i qui caractérise la sensibilité du galvanomètre.

$$M_{F,F'} = M_T \Leftrightarrow N.B.i.S = C.\delta \Leftrightarrow \delta = \frac{N.B.S}{C} i$$

$$\frac{\delta}{i} = \frac{N.B.S}{C} = \frac{500.2.10^{-2}.3.10^{-2}.0,2}{10^{-7}} = 6.10^5 \text{ rad} / A$$

b) Sachant que les déviations sont mesurées par la méthode Poggendorff et que l'on peut apprécier un déplacement de 1mm sur une règle placée à 2 m du miroir solidaire du cadre, calculer la plus petite intensité que l'on peut déceler avec le galvanomètre.



$$2\delta_{\min} = \frac{10^{-3}}{2} \Leftrightarrow \boxed{\delta_{\min} = \frac{1}{4} \cdot 10^{-3} \text{ rad}}$$

or

$$\frac{\delta}{i} = 6 \cdot 10^5 \text{ rad} \Leftrightarrow i = \frac{\delta}{6 \cdot 10^5} = \frac{1}{4.6} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-5} = \underline{\underline{4,2 \cdot 10^{-10} \text{ A}}}$$