



THEME: ELECTRICITE

TITRE DE LA LEÇON : LOI DE LAPLACE

I. SITUATION D'APPRENTISSAGE

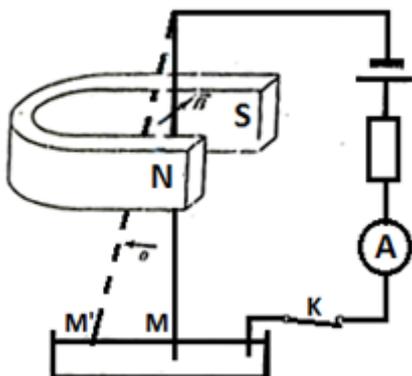
Lors de la lecture d'une revue scientifique, un élève de la classe de Terminale du Lycée Municipal 2 Attécoubé, apprend que lorsqu'une tige métallique parcourue par un courant électrique continu est plongée dans un champ magnétique, elle subit une force électromagnétique. L'élève partage cette information avec ses camarades de classe. Voulant en savoir plus, ces élèves entreprennent avec l'aide de leur professeur de s'informer sur la force de Laplace, de déterminer ses caractéristiques et d'analyser quelques applications de la loi de Laplace.

II. CONTENU DE LA LEÇON

1. Mise en évidence expérimentale de la Force de Laplace

1.1 Expérience de la tige de Laplace

1.1.1. Dispositif



1.1.2. Observations

A la fermeture de l'interrupteur K, on fait les observations suivantes :

- le conducteur en cuivre dévie ;
- cette déviation change de sens si l'on modifie le sens du champ magnétique ou le sens du courant (changement de bornes) ;
- le conducteur reprend sa position si on supprime \vec{B} ou si on ouvre l'interrupteur K.

1.1.3. Conclusion

Le conducteur (ou la tige) subit une force électromagnétique. Le sens de cette force dépend de ceux de \vec{B} et I

1.2 Expérience des Rails de LAPLACE

1.2.1 Dispositif

Deux rails horizontaux et parallèles sont reliés aux bornes d'un générateur de courant constant. Une barre conductrice est placée sur les rails et ferme le circuit.

L'ensemble (rails+ conducteur) est placé dans l'entrefer d'un aimant en U. (voir figure 1)

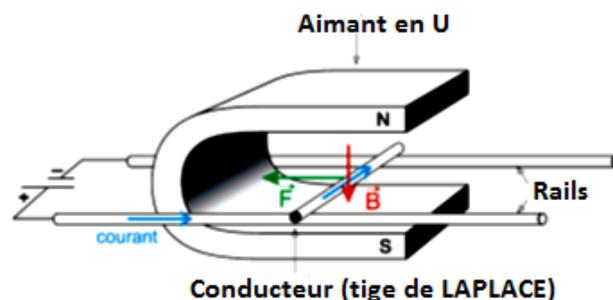


Figure 1

1.2.2 Observations

Lorsque la barre est parcourue par un courant électrique constant, elle se met en mouvement. Le sens de son déplacement change selon le sens du courant électrique ou celui du champ \vec{B} . Sa vitesse augmente avec l'intensité de courant.

1.2.2 Interprétation

La barre est soumise à une force électromagnétique dont la valeur dépend de l'intensité I du courant électrique et celle du champ magnétique \vec{B} .

1.2.3 Conclusion

Un conducteur placé dans un champ magnétique et traversé par un courant électrique constant subit une force électromagnétique appelée force de LAPLACE.

2. Loi de Laplace

2.1 Énoncé

Un conducteur rectiligne de longueur ℓ , parcouru par un courant électrique constant d'intensité I , placé dans un champ magnétique uniforme \vec{B} , est soumis à une force \vec{F} appelée force de LAPLACE d'expression :

$$\vec{F} = I \vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

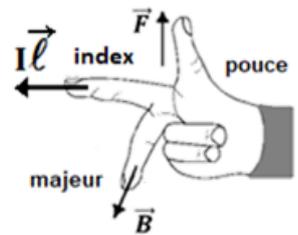
2.2 Caractéristiques de la force de Laplace

Les caractéristiques de la force de Laplace sont :

- Point d'application : le milieu de la partie du conducteur placée dans le champ magnétique
- Direction : la perpendiculaire au plan formé par le conducteur rectiligne et le champ \vec{B}
- Sens : le sens de \vec{F} est tel que le trièdre $(\vec{\ell}, \vec{B}, \vec{F})$ est direct.

Le sens de \vec{F} est déterminé par plusieurs règles, dont celle des trois doigts de la main droite

- Si l'**index** indique le sens du courant électrique I ;
- et le **majeur** indique le sens de \vec{B} ;
- alors le **pouce** indique le sens de \vec{F} .



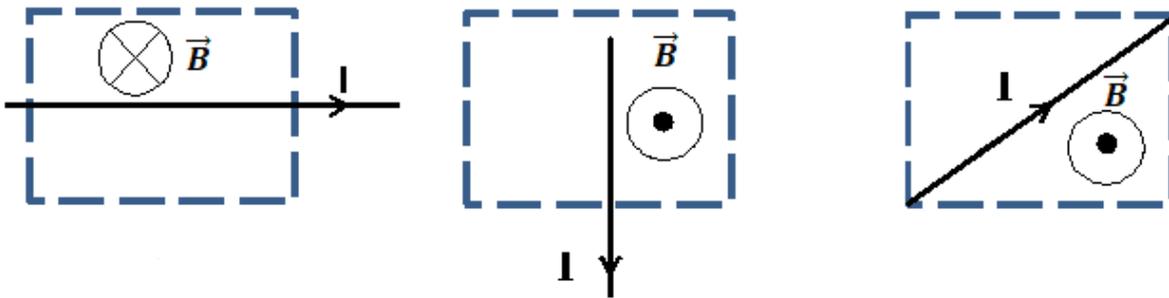
Règle de la main droite

- **valeur** : $F = I \cdot \ell \cdot B |\sin\alpha|$ avec $\alpha = (\vec{\ell}, \vec{B})$

Pour $\vec{\ell} \perp \vec{B}$: $\alpha = (\vec{\ell}, \vec{B}) = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin\alpha = 1$ donc $F = I \cdot \ell \cdot B$

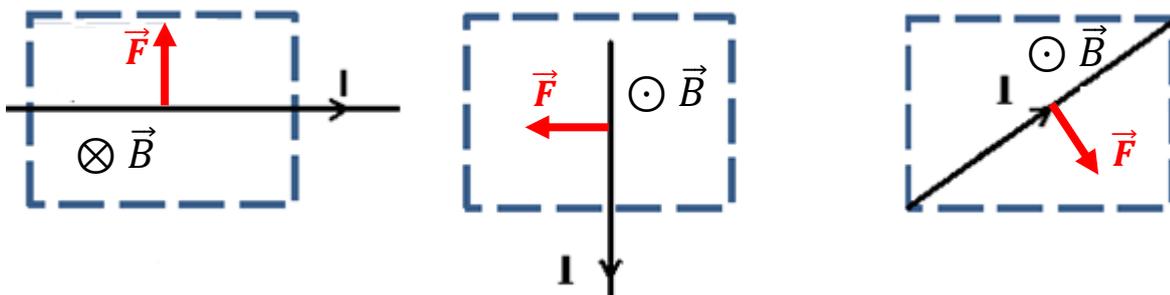
Activité d'application

Représente sur chacun des conducteurs placés dans l'espace champ magnétique \vec{B} délimité par le rectangle, la force de LAPLACE.



CORRECTION

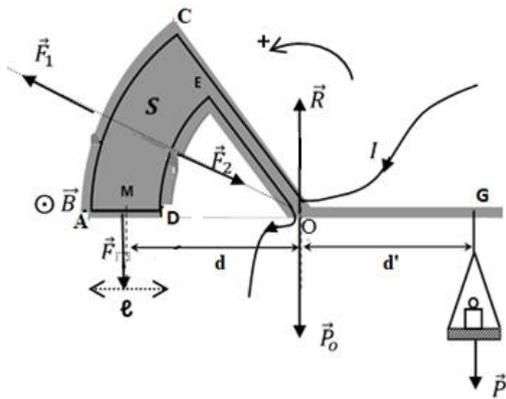
En utilisant la règle des trois doigts de la main droite



3. Applications de la loi de Laplace

3.1 Balance de Cotton ;

3.1.1 Schéma et description



Elle comprend :

- un bras de fléau supportant un plateau ;
- un circuit électrique OCADE fixé sur l'autre bras de fléau.

La partie CADE est plongée dans le champ magnétique à mesurer. \widehat{CA} et \widehat{DE} sont des arcs de cercle de centre O.

La balance est mobile autour de l'axe horizontal (Δ) passant par O, perpendiculaire au plan de figure. Elle est équilibrée en l'absence de courant électrique.

3.1.2 Détermination de la valeur du champ magnétique

- Système : ensemble (fléau + plateau + masse)
- Référentiel terrestre supposé galiléen
- Bilan des forces extérieures au système :
 - La réaction \vec{R} ,
 - les poids \vec{P} , \vec{P}_0 ,
 - les forces de Laplace \vec{F} , \vec{F}_1 et \vec{F}_2
- À l'équilibre, on a $\sum M_{(\Delta)}(\vec{F}_{ext}) = 0$

$$M_{(\Delta)}(\vec{P}) + M_{(\Delta)}(\vec{R}) + M_{(\Delta)}(\vec{P}_0) + M_{(\Delta)}(\vec{F}) + M_{(\Delta)}(\vec{F}_1) + M_{(\Delta)}(\vec{F}_2) = 0$$

Compte tenu de la forme des conducteurs AC et DE (arcs de cercle de centre O), les moments des forces \vec{R} , \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et \vec{P}_0 sont nuls car leurs droites d'action coupent l'axe de rotation (Δ) en O.

$$M_{(\Delta)}(\vec{P}) + M_{(\Delta)}(\vec{F}) = 0$$

$$-P \times d' + F \times d = 0 \Leftrightarrow F \times d = P \times d'$$

Or $F = I\ell B$ et $P = mg$

$$I\ell B = mg \Rightarrow B = \frac{mgd'}{I\ell d}$$

Pour $d' = d$ alors $B = \frac{mg}{I\ell}$

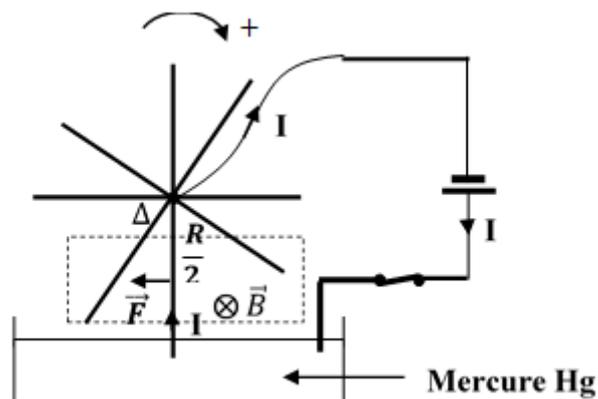
3.1.3 Intérêt du dispositif

Il permet de déterminer la valeur du champ magnétique \vec{B}

3.2 Roue de Barlow

3.2.1 Schéma et description

La roue de Barlow est constituée d'un disque de cuivre, mobile autour d'un axe horizontal Δ ; cet axe est relié à l'une des bornes d'un générateur de tension continue. L'autre borne est reliée à une cuve contenant une solution conductrice, lui-même en contact avec le disque. Un aimant en U crée, autour de la portion basse du disque, un champ magnétique uniforme \vec{B} .



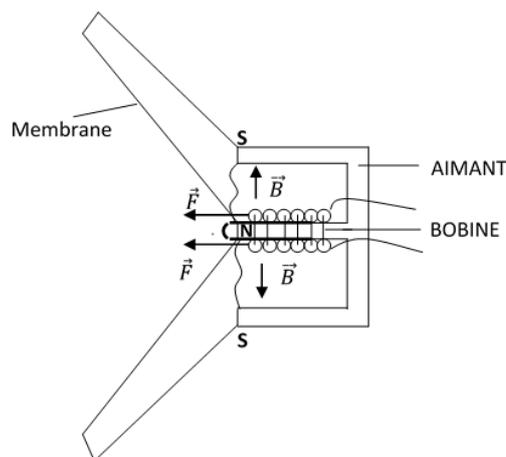
3.2.2 Fonctionnement

A la fermeture du circuit, le rayon qui plonge dans la solution conductrice est traversé par le courant I et subit la force de la Laplace. Si l'intensité de \vec{F} est grande, ce rayon sort de la solution et un autre y pénètre. Les rayons se suivent ainsi les uns après les autres dans la solution et l'ensemble tourne dans le sens de \vec{F} .

3.3 Haut-parleur

Un haut-parleur est un appareil qui transforme des courants électriques en ondes sonores.

Il est constitué d'un aimant, d'une bobine et d'une membrane. La membrane est solidaire de la bobine. Les variations du courant électrique dans la bobine créent une force (force de Laplace) qui fait vibrer la membrane. Cette vibration de la membrane crée le son.



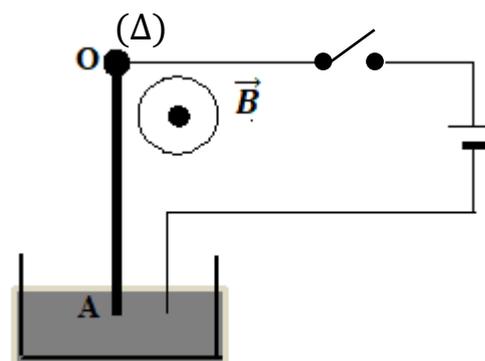
SITUATION D'ÉVALUATION

Au cours d'une séance de T.P. un groupe d'élèves de terminale, sous la supervision de leur professeur de Physique – Chimie, réalise le montage schématisé ci-contre. OA est une tige de cuivre mobile autour de l'axe horizontal (Δ). Le groupe veut déterminer l'angle de déviation α du fil dans différentes situations. Les parties 1 et 2 sont indépendantes.

1. Première partie

Précise ce qui se passe au niveau de la tige dans chacun des cas suivants :

- 1.1 le circuit est fermé et le champ magnétique \vec{B} existe ;
- 1.2 on intervertit les bornes du générateur, en présence du même champ magnétique \vec{B} ; le circuit étant fermé ;
- 1.3 le circuit est fermé et le champ magnétique est supprimé ;
- 1.4 le circuit est ouvert en présence du champ magnétique \vec{B} .



2. Deuxième partie

Un élève du groupe fixe la valeur de \vec{B} à $5 \cdot 10^{-2} \text{T}$ et $I = 5 \text{A}$. La tige OA de longueur $\ell = 20 \text{ cm}$ est entièrement plongée dans le champ \vec{B} . La masse de la tige est $m = 10 \text{ g}$.

2.1 Fais le bilan des forces s'exerçant sur la tige OA. Représente-les sur un schéma.

2.2 Écris les conditions d'équilibre de la tige OA.

2.3 Détermine l'inclinaison α de la tige OA par rapport à la verticale.

On donne $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$

Correction

1. Première partie

1.1 Circuit fermé et la valeur de \vec{B} est non nulle

La tige rectiligne de cuivre (tige OA) est déviée

1.2 On intervertit les bornes du générateur et la valeur de \vec{B} est non nulle.

La tige est déviée dans l'autre sens.

1.3 Circuit fermé et la valeur de \vec{B} est nulle

La tige reste dans sa position d'équilibre verticale.

1.4 Circuit ouvert et la valeur de \vec{B} est non nulle

La tige reste dans sa position d'équilibre verticale

2. Deuxième partie

2.1 Le bilan et représentation des forces

Systeme : tige OA

Bilan des forces extérieures à la tige OA

- La réaction \vec{R} du support
- Le poids de la tige \vec{P}
- La force de LAPLACE \vec{F}

2.2 Les conditions d'équilibre de la tige OA autour d'un axe fixe (Δ).

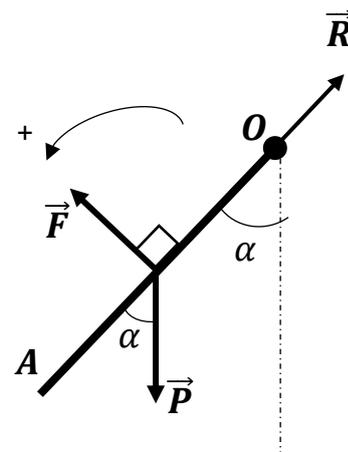
Lorsque la tige OA est en équilibre autour d'un axe de rotation (Δ) fixe alors :

$$\sum \vec{F}_{(ext)} = \vec{0}$$

$$\sum M_{(\Delta)}(\vec{F}_{ext}) = 0$$

2.3 Détermination de l'inclinaison α de la tige OA par rapport à la verticale.

$$M_{(\Delta)}(\vec{P}) + M_{(\Delta)}(\vec{F}) + M_{(\Delta)}(\vec{R}) = 0$$



$$-F \times \frac{\ell}{2} + P \times \frac{\ell}{2} \sin\alpha = 0 \Leftrightarrow F = P \times \sin\alpha$$

Or $F = I\ell B$ et $P = mg$ alors $I\ell B = mg \sin\alpha$

$$\sin\alpha = \frac{I\ell B}{mg} \text{ d'où } \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{I\ell B}{mg}\right) \quad \text{A.N. } \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{5 \times 0,2 \times 5 \cdot 10^{-2}}{10 \times 10 \cdot 10^{-3}}\right) \text{ soit } \alpha = 30^\circ$$

III. EXERCICES

Exercice 1 :

Un conducteur rectiligne de 0,4m de longueur et parcouru par un courant constant d'intensité 12A est placé dans un espace où règne un champ magnétique uniforme \vec{B} de valeur $B=0,25T$.

Déterminer la valeur de la force magnétique qui s'exerce sur le conducteur quand il fait avec les lignes de champ un angle de 30° puis de 45° .

Solution:

L'expression de la force de Laplace est $\vec{F} = I\vec{\ell} \wedge \vec{B}$

En norme, on a $F = I\ell B \sin(\vec{\ell}, \vec{B}) = I\ell B \sin\alpha$

A.N. Si $\alpha = 30^\circ$ $F = 0.6N$

Si $\alpha = 45^\circ$ $F = 0.86N$

Exercice 2

Une balance de Cotton possède un conducteur actif de 3cm traversé par un courant de 8A et placé perpendiculairement au vecteur-champ B dont on veut mesurer la valeur.

Déterminer la masse m du corps à placer dans le plateau pour équilibrer la balance lorsque $B = 0,5T$;

Solution :

Dans la balance de cotton, l'expression de la masse est donnée par la relation :

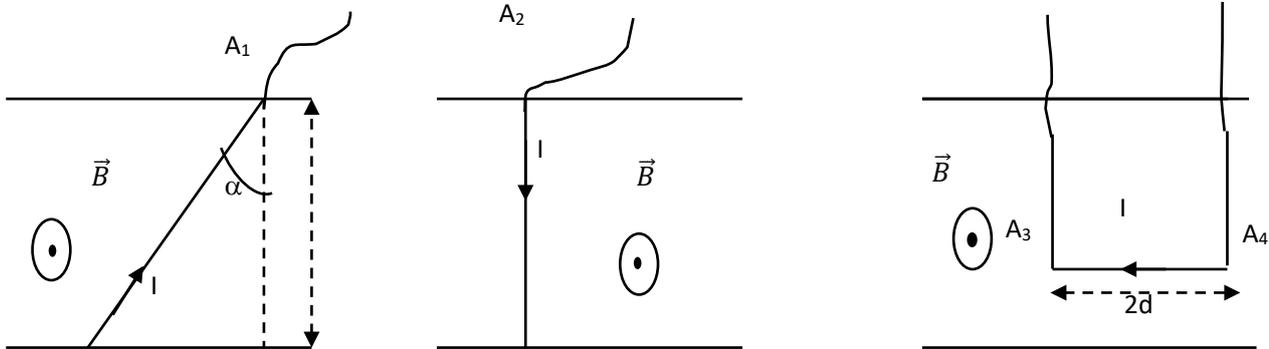
$$m = \frac{I\ell B}{g} \quad \text{A.N.} \quad \underline{m = 0.012kg}$$

Exercice 3

Une portion de conducteur de longueur d , traversé par un courant électrique constant d'intensité I , est plongée dans un espace où règne champ magnétique uniforme \vec{B} .

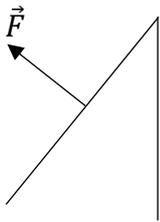
1. Représente la force de Laplace dans chaque cas.
2. Exprime la valeur de la force dans chaque cas.
3. Détermine le moment de la force de Laplace par rapport à un axe passant par A_i et parallèle au champ magnétique.

On donne : $d = 20\text{cm}$; $I = 500\text{ mA}$; $B = 0,4\text{ T}$.



Solution:

1^{er} cas: 1. Représentation de \vec{F}



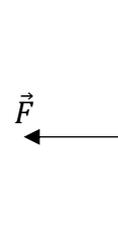
2. Valeur de \vec{F}

$$F = IdB = 0.04\text{N}$$

Moment de \vec{F} / A_1

$$M(\vec{F}) = F \cdot d/2 = 0.004\text{ N.m}$$

2eme cas: 1. Représentation de \vec{F}



2. Valeur de \vec{F}

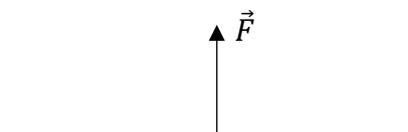
$$F = IdB = 0.04\text{N}$$

Moment de \vec{F} / A_2

$$M(\vec{F}) = F \cdot d/2 = 0.004\text{N.m}$$

3eme cas

1. Représentation de \vec{F}



2. Valeur de \vec{F} : $F=IdB=0.08N$

3. Moment de \vec{F} : $M(\vec{F})=F*d=0.008N.m.$

Exercice 4 : BALANCE DE COTTON

Tu es élève en classe de TC. Ton groupe de TP est choisi pour déterminer la valeur du champ magnétique \vec{B} dans l'entrefer d'un aimant en U. Pour cela votre professeur de Physique-Chimie met à votre disposition le dispositif de la balance de Cotton et tout le matériel nécessaire. Le groupe réalise le dispositif expérimental et sous la supervision du professeur, il effectue les mesures dont les résultats sont consignés dans le tableau suivant.

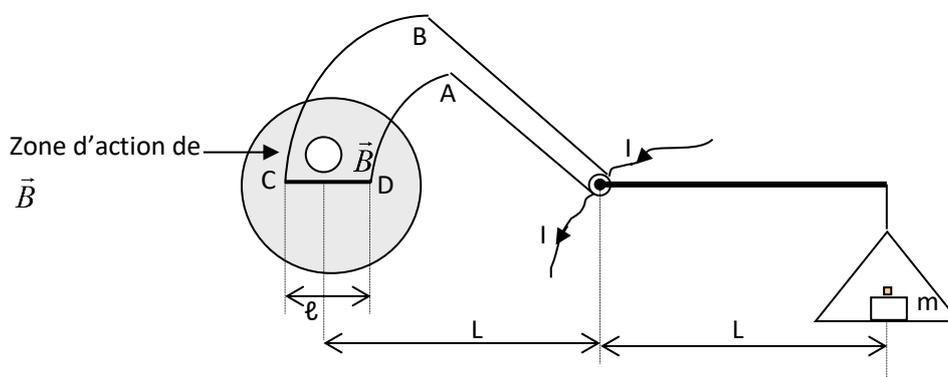
I(A)	0,74	1,50	2,35	3,20	3,90	4,80
m (mg)	0,5	1	1,5	2	2,5	3

Echelle : 2cm \leftrightarrow 5 mg ; 2 cm \leftrightarrow 0,75 A

On donne $g = 10m.s^{-2}$; $l = CD = 2,9$ cm.

En tant que porte-parole du groupe il t'est demandé de répondre aux questions suivantes.

- 1- Indique sur le schéma le sens du champ magnétique créé par l'aimant.
- 2- Montre que les forces de Laplace s'exerçant sur les portions AD et BC n'ont aucune influence sur l'équilibre de la balance.
- 3- Exprime l'intensité I du courant dans le dispositif expérimental en fonction de B, l, g et m.
- 4- Tracer la courbe $I = f(m)$
- 5- Déduire de cette courbe la valeur B du champ magnétique.

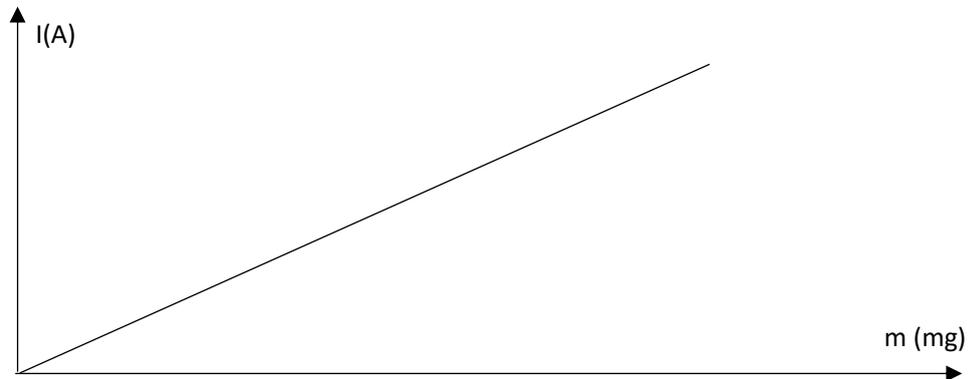


Solution:

1. I va de C à D et la force magnétique est descendant. Selon l'une des règles, \vec{B} est sortant.
2. Les forces s'exerçant sur les parties AD et BC (arc de cercle) ont leur droite d'action rencontre l'axe de rotation du fléau donc elles n'ont aucune influence.

3. En appliquant le théorème des moments, on a:
 $M(\vec{F}) + M(\vec{P})=0$ ce qui donne $I l B=mg$ d'où $I=\frac{mg}{lB}$

4. Tracé de la courbe $I=f(m)$



C'est une droite qui passe par l'origine du repère donc I est proportionnel à m : $I=k.m$.

Déterminons le coefficient de proportionnalité k .

$$K=\frac{3.90-1.50}{0.0025-0.0010}=1600\text{A/kg}$$

5. Par identification,

$$I=k.m=\frac{g}{lB}m \text{ ce qui donne } k=\frac{g}{lB} \text{ d'où } B=\frac{g}{kl} \quad \text{A.N.} \quad \underline{B=0,215\text{T}}$$

Exercice 5 : TIGE DE LAPLACE

La coordination régionale disciplinaire de physique-chimie organise chaque année un concours qui oppose les élèves des classes de TC des différents établissements d'enseignement secondaire.

Au cours de cette activité il est demandé aux élèves rapidité et justesse des réponses données. Les élèves seront notés et le vainqueur désigné sera le groupe qui aura eu la plus grande note.

Le libellé du sujet à traiter est le suivant :

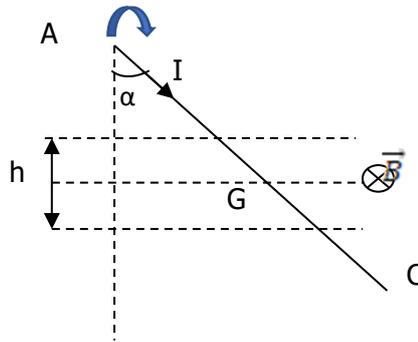
Un conducteur de longueur l et de masse m , est susceptible de tourner autour d'un axe passant par le point A. Dans sa position d'équilibre, le conducteur fait un angle α avec la verticale. Il est alors parcouru par un courant constant d'intensité I . La portion du conducteur soumise au champ magnétique est symétrique par rapport à son centre d'inertie G.

Données : $m = 20 \text{ g}$; $g = 10 \text{ N/kg}$; $h = 5 \text{ cm}$; $B = 0,5 \text{ T}$. $\alpha = 10^\circ$

Tu es candidat à ce concours et tu rends compte à tes camarades de classe.

1. Exprime l'intensité de la force de Laplace qui agit sur le conducteur en fonction de α , I , h et B .
2. Représente sur le schéma, les forces agissant sur le conducteur.
3. Ecris la relation entre les moments de ces forces traduisant l'équilibre du conducteur.
4. Déduis-en l'expression de l'intensité I du courant en fonction de m , g , α , h et B .

5. Calcule I.



1. $F = I l B$ avec $h = l \cos \alpha$ d'où $l = \frac{h}{\cos \alpha}$ et $F = \frac{I h B}{\cos \alpha}$

2. Les forces réagissant sur la tige

- Force de Laplace \vec{F}
- Poids du conducteur \vec{P}
- Réaction du support \vec{R}

3. A l'équilibre de la balance : $\Sigma M (\vec{F}_{\text{ext.}}) = 0$

$M(\vec{R}) = 0$ car \vec{R} rencontre l'axe de rotation

$$M(\vec{P}) = \frac{m g l \sin \alpha}{2}$$

$$M(\vec{F}) = - \frac{I h B l}{2 \cos \alpha}$$

$$\Sigma M (\vec{F}_{\text{ext.}}) = 0 \text{ soit } \frac{m g l \sin \alpha}{2} - \frac{I h B l}{2 \cos \alpha} = 0$$

4.

$$I = \frac{m g \sin 2 \alpha}{2 h B}$$

A.N. $I = 1,36 \text{ A}$

IV. DOCUMENTATION

COURANTS DE FOUCAULT

On appelle **courants de Foucault** les courants électriques créés dans une masse conductrice, soit par la variation au cours du temps d'un [champ magnétique](#) extérieur traversant ce milieu (le [flux du champ](#) à travers le milieu), soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique. Ils sont une conséquence de l'[induction électromagnétique](#).

Les courants de Foucault sont responsables d'une partie des pertes (dites *pertes par courants de Foucault*) dans les circuits [magnétiques](#) des [machines électriques alternatives](#) et des [transformateurs](#). C'est la raison pour laquelle les circuits magnétiques sont constitués de [tôles feuilletées](#) afin de limiter ces courants et les pertes par [effet Joule](#) qui en découlent, ce qui améliore le rendement global des transformateurs.

Le champ magnétique variable au cours du temps est responsable de l'apparition d'une [force électromotrice](#) à l'intérieur du milieu conducteur. Cette force électromotrice induit des courants dans la masse. Ces courants ont deux effets :

- ils créent un champ magnétique qui s'oppose à la variation du champ magnétique extérieur ([loi de Lenz](#)) ;
- ils provoquent un échauffement par [effet Joule](#) de la masse conductrice d'autant plus fort que la vitesse entre l'inducteur et la pièce conductrice est importante.

Lorsque la variation de flux est due à un déplacement du milieu devant un champ magnétique constant, les courants de Foucault sont responsables de l'apparition de [forces de Laplace](#) qui s'opposent au déplacement, d'où l'effet de freinage observé sur les systèmes utilisant ce genre de dispositif.

Freinage



Frein à courants de Foucault sur un train rapide japonais [Shinkansen](#).

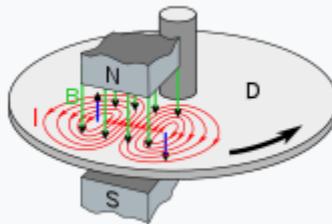


Schéma d'un disque de frein de Foucault actuel.

Le premier [brevet](#) de ralentisseur électromagnétique a été déposé par Steckel en [1903](#)². Raoul Sarazin a réalisé en [1936](#) la première application pratique sur véhicule d'un ralentisseur utilisant le principe des courants de Foucault².

Des systèmes de freinage à courants de Foucault sont utilisés notamment sur les véhicules [poids lourds](#)³ et sur les [autocars](#) sous le nom de « ralentisseur », ou sous le nom commercial [Telma](#)¹.

Ils sont constitués d'électroaimants fixes ([stator](#)) induisant des courants de Foucault dans des disques conducteurs ([rotor](#)) entraînés par les roues. Lorsque les électroaimants sont mis sous tension, les courants de Foucault induits dans les disques génèrent des [forces de Laplace](#) s'opposant au mouvement, donc générant un couple de freinage.

Contrairement aux freins classiques qui dissipent l'énergie par frottement, le freinage électromagnétique fonctionne sans contact, donc sans usure de garniture. Ces freins nécessitent peu de réglage. Bien que l'énergie de freinage reste dissipée sous forme de chaleur (par [effet Joule](#)), ils sont moins sensibles à l'échauffement. Ils sont de ce fait obligatoires sur les véhicules lourds pour produire un freinage d'endurance notamment en montagne ou en situations d'arrêts fréquents. Le freinage étant généré par la vitesse des disques, ils ne permettent en aucun cas l'immobilisation d'un véhicule jusqu'à l'arrêt complet. C'est pour cela qu'ils ne fonctionnent qu'en complément de freins conventionnels.

Dans les chemins de fer, la rame à grande vitesse [ICE 3](#) de la [Deutsche Bahn](#) utilise un système de freins à courant de Foucault comme système de frein de service sur certaines lignes nouvelles et comme système de freinage d'urgence ailleurs.

On peut leur reprocher que l'énergie est dissipée par effet Joule sous forme de chaleur et donc en pure perte, contrairement au [freinage régénératif](#) des [véhicules hybrides](#) qui la valorisent en électricité stockable.

Chauffage

Le chauffage par induction est produit par les courants de Foucault induits dans la pièce à chauffer. Ce type de chauffage est donc réservé aux matériaux [conducteurs d'électricité](#). Il est par exemple utilisé dans les [plaques de cuisson à induction](#), ou en métallurgie, où les [fours à induction](#) peuvent chauffer les lingots de métal jusqu'à leur [température de fusion](#).

Brasage

Dans le cas du [brasage](#) par induction, on place les éléments à braser dans un champ électromagnétique puissant pour chauffer les pièces ainsi que le métal d'apport.

Autres applications



Ancien [compteur électrique](#) français ([EDF](#)).

On utilise les courants de Foucault pour :

- comptabiliser la consommation électrique, dans les anciens [compteurs ERDF](#) (à roue dentée) ;
- réaliser des capteurs de distance sans contact. Ils sont généralement constitués d'une bobine excitée à haute fréquence (de 200 kHz à 2 MHz) ; la proximité d'une pièce conductrice en modifie l'impédance ; la mesure de cette impédance permet de déterminer la distance de la pièce mesurée ;
- le [contrôle non destructif](#), par exemple pour la détection des fissures dans les pièces métalliques comme les rails ferroviaires ou les pièces métalliques d'avion soumises à des contraintes répétées. En cas de défaut interne, les courants de Foucault sont différents, ce qui se traduit par une modification du champ magnétique induit. Un exemple est le contrôle de la qualité de fabrication des lames des armes d'[escrime](#) sportive⁵ ;
- afficher la vitesse d'un véhicule par [tachymètre](#) : un aimant est relié à la sortie de la [boîte de vitesses](#) et entouré d'un tube fait d'un métal conducteur allant de ladite boîte jusqu'au compteur sur lequel est fixé une aiguille. Le tube, pivotant autour de son axe, est retenu par un ressort en spirale chargé de ramener l'aiguille à zéro. Plus la roue tourne vite, plus la force exercée sur la rotation du tube est grande, et plus l'aiguille du compteur s'éloigne de sa position initiale ;
- le fonctionnement de certaines [dynamos](#) de vélo : un aimant est mis en rotation par l'effet des courants de Foucault dans la jante de la roue. Cet aimant permet ensuite de générer de l'énergie pour alimenter une lumière⁶. Contrairement aux dynamos traditionnelles, l'entraînement de l'aimant se fait ainsi sans contact.

Source : Wikipédia