

Expérience des tubes « paresseux » : les courants de Foucault et la loi de Lenz revisités

Des traversées de tunnel qui en laissent plus d'un dans le noir... !

par **Jean-Christophe FILLOUX**
Lycée Camille Guérin - 86000 Poitiers
jc.filloux@wanadoo.fr

RÉSUMÉ

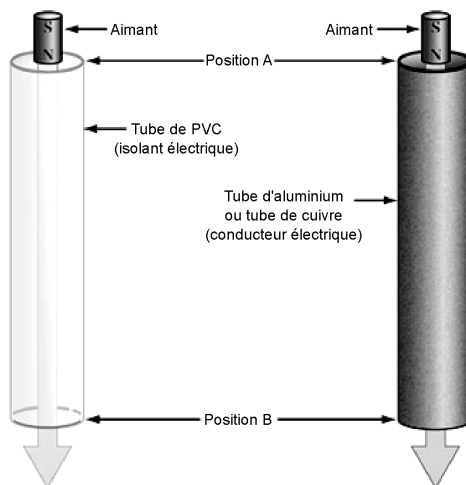
L'expérience décrite dans cet article est simple et spectaculaire. Elle consiste à faire tomber des aimants au Néodyme dans des tubes faits en matériaux différents, magnétiques ou non, conducteurs électriques ou non. Cela permet d'illustrer simplement les courants de Foucault et la loi de Lenz. L'interprétation est du niveau d'un élève de lycée.

J'ai découvert l'expérience qui suit sur un site Internet américain. Je n'en ai pas trouvé la trace dans mes manuels de physique ni sur des sites web français, pourtant je pense qu'elle présente un réel intérêt car elle a le mérite de fonctionner parfaitement, d'être très spectaculaire et de pouvoir être expliquée simplement à l'aide du programme en vigueur actuellement en première et terminale scientifique des lycées français. Cette expérience me paraît notamment intéressante pour faire un « pont » entre les chapitres de mécanique et ceux d'électromagnétisme.

1. L'EXPÉRIENCE

L'expérience est la suivante : on place trois tubes vides, un en plastique (PVC), un en cuivre et un en aluminium, en position verticale. Un élève tient des aimants cylindriques identiques contre l'extérieur des tubes et observe qu'aucun des tubes n'attire les aimants. Les aimants utilisés sont des aimants au Néodyme, les plus puissants fabriqués par l'industrie actuellement. À partir de cette observation, l'élève prédit que les trois aimants vont chuter dans leur tube respectif avec une accélération de $9,81 \text{ m.s}^{-2}$. Ensuite, l'élève laisse tomber les aimants au repos dans les tubes à partir de la position A, comme le montre l'illustration ci-après.





◆ L'élève observe ce qui suit

L'aimant ne touche pas aux côtés des tubes quand il tombe. Il faut beaucoup plus de temps à l'aimant pour tomber dans le tube en cuivre ou en aluminium qu'il ne lui en faut pour tomber dans le tube en plastique. Le tube le plus « paresseux » c'est-à-dire celui dans lequel l'aimant tombe le plus lentement correspond au tube le plus conducteur de l'électricité.

◆ Pour information, voici les résistivités des trois matériaux utilisés

Aluminium : ρ_{Al} (à 20 °C) = $265,5 \times 10^{-8} \Omega m$ (bon conducteur) ;

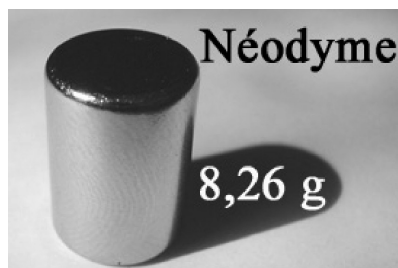
Cuivre : ρ_{Cu} (à 20 °C) = $167,3 \times 10^{-8} \Omega m$ (très bon conducteur) ;

PVC (polyvinyle chlorure) : ρ_{PVC} (à 20 °C) = $\approx 10^{13} \Omega m$ (isolant).

◆ L'élève note les résultats expérimentaux suivants

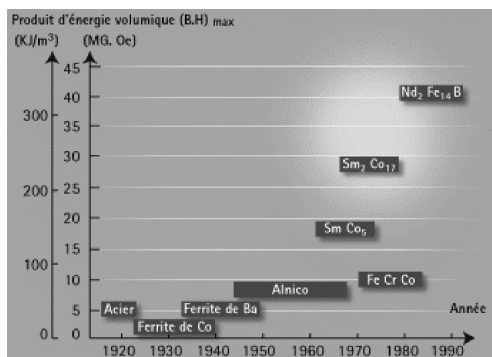
Expérience
complémentaire

	Tube n°1 en plastique épaisseur paroi = 1 mm diamètre interne = 14 mm diamètre externe = 16 mm	Tube n°2 en aluminium épaisseur paroi = 1 mm diamètre interne = 14 mm diamètre externe = 16 mm	Tube n°3 en cuivre épaisseur paroi = 1 mm diamètre interne = 14 mm diamètre externe = 16 mm	Tube n°4 en cuivre épaisseur paroi = 5 mm diamètre interne = 12 mm diamètre externe = 22 mm
Masse de l'aimant (en g)	8,26	8,26	8,26	8,26
Longueur du tube (en m)	1,0	1,0	1,0	1,0
Durée mise par l'aimant pour passer de la position A à la position B (en s)	0,45	7,0	10,0	38,0



Les aimants en terres rares de type Néodyme-Fer-Bore ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) sont actuellement les aimants les plus puissants au monde (voir leurs propriétés magnétiques dans le document donné en annexe). Le Néodyme développe une puissance sept à dix fois supérieure par rapport aux matériaux magnétiques traditionnels. Le champ magnétique d'un aimant au Néodyme peut atteindre 12,5 kiloGauss soit 1,25 Tesla (dix mille fois plus fort que le champ magnétique terrestre).

Chauffés au-dessus de 150 °C (température de Curie), ils perdent définitivement une bonne partie de leur aimantation.

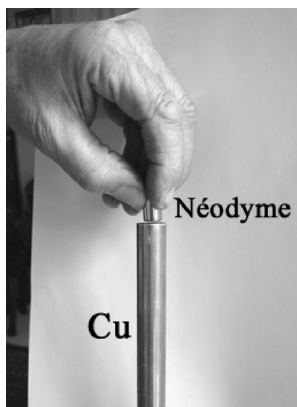


Évolution de la puissance des aimants

(source : Rhodia electronics <http://www.rhodia-ec.com/>)



L'éminent Professeur Tournesol
dans ses œuvres...



Positionnement de l'aimant avant
sa chute sans vitesse initiale.



Vue de l'aimant qui chute dans le tuyau en cuivre en donnant l'impression d'être freiné par un parachute invisible.



Mesure précise des durées de chute à l'aide
du chronomètre numérique

Les courants de Foucault

Les courants de Foucault sont des courants électriques tourbillonnaires induits dans un conducteur placé dans un champ magnétique variable. Les lignes de courant dans le conducteur forment des boucles (tourbillons) fermées sur elles-mêmes.

Les courants de Foucault circulent de manière à s'opposer aux mouvements du conducteur et sont utilisés dans certains appareils, pour freiner ou amortir les oscillations d'une pièce mobile. En revanche, ils sont nuisibles dans les noyaux des transformateurs, où on en limite les effets en utilisant des conducteurs feuilletés, qui s'opposent à leur propagation.

La loi de Lenz

La loi de Lenz dit que « *l'induction produit des effets qui s'opposent aux causes qui lui ont donné naissance* ».

En 1851, VON HELMHOLTZ fit remarquer que cette loi est en fait une conséquence de la loi de la conservation de l'énergie. De fait, si le champ magnétique induit venait renforcer le champ extérieur, il entraînerait une augmentation du courant induit qui à son tour viendrait augmenter le champ induit, augmentant ainsi le courant induit et ainsi de suite. Il est clair que cette escalade est impossible au plan énergétique.

Léon FOUCAULT

Physicien français
(Paris, 1819 - id., 1868)



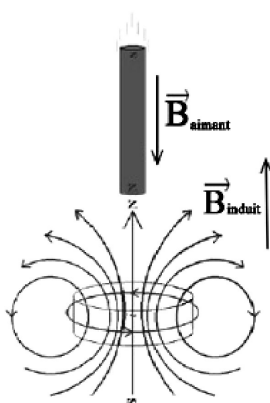
Heinrich Friedrich Emil LENZ

Physicien russe, d'origine balte
(Dorpat, Russie, 1804 - Rome, 1865)



2. ANALYSE DE L'EXPÉRIENCE

L'aluminium et le cuivre ne sont pas des matériaux magnétiques, ainsi, ils ne sont pas attirés par un aimant. Par contre ce sont des matériaux bons conducteurs de l'électricité à la différence du pvc qui est un isolant. Plus un matériau est conducteur de l'électricité, plus ses charges (électrons libres) peuvent être déplacées facilement par un champ magnétique en mouvement. On parle alors de courants induits (ou courants de Foucault - voir ci-contre) qui seront d'autant plus forts que le conducteur est meilleur. Ces courants induits créent à leur tour un champ magnétique induit qui s'oppose selon la loi de Lenz (voir ci-contre) au champ magnétique d'origine inducteur. Ainsi, les deux champs magnétiques s'opposent l'un à l'autre. C'est pour cette raison que l'aimant est freiné dans sa chute. Ce principe a de nombreuses applications techniques : freinage électrique (frein de Foucault) des locomotives et des camions ou mesure de vitesse avec un tachymètre.



Cette figure illustre la loi de Lenz dans le cas de la chute d'un aimant dans un tuyau de cuivre.

3. MATÉRIEL

Le matériel utilisé pour notre expérience :

- ◆ Tube n° 1 : un tube de plastique (pvc)
longueur 1,0 m (diamètre externe 16 mm et diamètre interne 14 mm) ;
- ◆ Tube n° 2 : un tube d'aluminium
longueur 1,0 m (diamètre externe 16 mm et diamètre interne 14 mm) ;
- ◆ Tube n° 3 : un tube de cuivre
longueur 1,0 m (diamètre externe 16 mm et diamètre interne 14 mm) ;
- ◆ Tube n° 4 : un tube de cuivre
longueur 1,0 m (diamètre externe 22 mm et diamètre interne 12 mm) ;
- ◆ Un aimant cylindrique (10 × 14mm) au néodyme fer bore (masse = 8,26 g).
- ◆ Un chronomètre numérique.

Remarques sur le matériel

- ◆ J'ai réalisé le tube n° 4 en emboîtant cinq tubes de cuivre de longueur 1,0 m et de diamètres externes respectifs 14 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm et 22 mm. Ces tubes peuvent s'acheter dans les magasins de bricolage ; les tubes de cuivre de diamètre externe 24 mm n'étant pas commercialisés, cela a constitué une limite à l'augmentation de l'épaisseur de mon tube.
- ◆ Je me suis procuré l'aimant cylindrique au néodyme fer bore à l'intérieur d'un kit à monter de la « Lampe électromagnétique de Faraday » commercialisée dans la chaîne de magasins « Nature et découvertes » - Réf. : 30124790 - Prix : 22,50 €

**SUR LA TOILE**

- ◆ Cool experiments with magnets « Copper pipes » (site américain) :
<http://my.execpc.com/~rhoadley/magpipes.htm>
- ◆ Les aimants et leurs secrets (site canadien) :
<http://www.fsg.ulaval.ca/opus/scphys4/module2/obj2.shtml>
- ◆ Miniaturisation des aimants permanents de haute performance selon Rhodia :
http://www.rhodia-ec.com/site_ec_fr/electronics/page_magnetisme.htm
- ◆ Application des aimants aux machines électriques :
http://www.clubeea.org/documents/mediatheque/BMulton_app_aimants_mac_elec.doc



Jean-Christophe FILLoux
Professeur de sciences physiques
 Lycée Camille Guérin
 Poitiers (Vienne)

Annexe

Caractéristiques des différentes technologies d'aimants permanents actuels

Type	Année d'apparition	$BH_{\max}$ kJ/m ³	B_r à 25°C (T)	H_{cJ} kA/m	$T_{\max_op}$	Prix approximatif €/kg
NdFeB	1983	200-380	1,2 à 1,5	900 à 2000	140 à 210	76 à 152
SmCo ₅	1966	140-200	1	2000	250	229
Sm ₂ Co ₁₇		180-240	1,05	2000	350	305
Alnico	1932	50-85	1,1 à 1,3	130	500	46
Ferrites strontium	1950	27-35	0,3 à 0,4	250	250	6
Ferrites barium		8 à 30	0,2 à 0,4	170		4

B = induction magnétique (en T)

H = champ magnétique (en kA/m)

$BH_{\max}$ correspond à l'énergie maximale utilisable (en kJ/m³)

B_r = induction magnétique rémanente (en T)

H_{cJ} = champ magnétique coercitif équivalent à une désaimantation irréversible (en kA/m)

$T_{\max_op}$ = température limite d'utilisation (en °C)

