

## L'expérience « The jumping ring »

Projet d'année d'élèves de 2<sup>ème</sup> polytechnique

Groupe 19 : Declercq Florent, Herregods Baptiste, Slinger Benjamin, Thomas Maxime.

Tuteur: Gorza Simon-Pierre

### Introduction

La théorie de l'électromagnétisme est d'une grande importance dans le domaine de l'ingénierie. Elle permet d'expliquer de nombreux phénomènes physiques et ses applications pratiques sont innombrables. Il est donc d'une importance primordiale pour de futur ingénieurs de s'approprier ses principes fondamentaux.

L'expérience du «*jumping ring*», inventée par Elihu Thomson en 1877 a pour but d'illustrer deux principes fondamentaux de l'électromagnétisme :

- A. la loi de Lenz-Faraday
- B. la force de Lorentz.



Elihu Thomson  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Elihu\\_Thomson](http://fr.wikipedia.org/wiki/Elihu_Thomson)

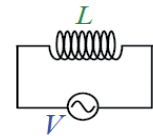
#### Explication :

Une bobine parcourue par un courant alternatif génère un champ magnétique variable. L'anneau capte ainsi un flux variable qui induit un courant opposé à la variation du flux, au sein de l'anneau conducteur (loi de Lenz-Faraday). Or ce courant induit subit un champ magnétique radial émanant du noyau ferromagnétique ce qui génère une force ascensionnelle appliquée sur l'anneau (force de Lorentz).

#### Modélisation des circuits

Circuit primaire (solénoïde)

$V_{\text{solénoïde}} =$  source de tension murale



Circuit secondaire (anneau)

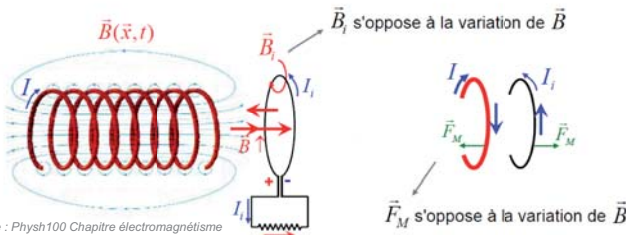
$V_{\text{anneau}} =$  source induite par le circuit primaire par la loi de Lenz-Faraday

Le principe de l'expérience est simple. Un solénoïde (circuit primaire), dans lequel un noyau ferromagnétique a été inséré, est placé verticalement. Un anneau (circuit secondaire) en matériau conducteur est déposé sur le haut du solénoïde. Lorsque une différence de tension alternative est appliquée aux bornes du solénoïde, l'anneau est propulsé vers le haut. Par quel Prodiges ?!

### A. La loi de Lenz-Faraday

Toute boucle conductrice se trouvant dans champ magnétique tend à rester dans son état d'origine.

Si le champ magnétique varie, la boucle conductrice créera son propre champ d'induction magnétique  $B_i$  afin qu'il annule la variation. Pour que le champ d'induction  $B_i$  existe il faut que la boucle soit parcourue par un courant  $I_i$  s'opposant à la variation.  $F_m$  est la force de Lorentz qu'exerce la bobine sur la boucle conductrice parcourue par un courant.

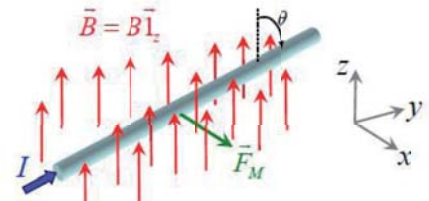


Source image : Physh100 Chapitre électromagnétisme

### B. La force de Lorentz

Tout conducteur parcouru par un courant et se trouvant dans un champ magnétique extérieur subit la force dite de Lorentz :

$$\vec{F}_m = \vec{I} \cdot l \times \vec{B}$$



$$\begin{cases} \vec{F}_m \parallel \vec{I}_x \\ |\vec{F}_m| = I l B \sin \theta \end{cases}$$

Source image : Physh100 Chapitre électromagnétisme

### C. Le calcul de la force

Nous allons étudier un peu plus en profondeur la force qui agit sur notre anneau: Nous savons que son expression mathématique est donnée par la relation suivante  $\vec{F}_m(t) = I_A(t) \cdot l \cdot B_R(t) \cdot \vec{I}_y$ . Il est important de comprendre que le courant de l'anneau est déphasé par rapport à sa tension et donc par rapport au champ d'induction magnétique radiale généré par le solénoïde. Ce déphasage entre courant-tension est dû à l'inductance de l'anneau.

Si celle-ci n'était pas tenue en compte l'intégrale de la force magnétique sur une période serait de la forme :

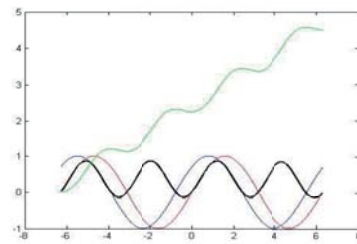
$$\int_{\text{Période}} (\sin \theta \cdot \cos \theta) dt = 0$$

Or en réalité, l'anneau subit une force nette positive !

C'est pour cela que notre anneau est modélisé comme un circuit RL. En tenant compte de l'inductance de l'anneau et du déphasage courant-tension de l'anneau l'intégrale devient de la forme:

$$\int_{\text{Période}} (\sin^2 \theta \cdot \sin \psi_S) dt \neq 0$$

$$\text{Force nette} = \int F_m(t) dt \propto \int \sin^2(\omega \cdot t) \cdot \sin \psi_S dt$$



### Faire sauter l'anneau encore plus haut, c'est possible ?

Oui ! Pour réaliser un saut optimal nous refroidissons l'anneau à l'azote liquide : Cela diminue la température et augmente la conductivité de l'aluminium.

#### Définition de la conductivité :

C'est l'aptitude d'un matériau à laisser les électrons se déplacer librement, elle est fonction de la température

En courant continu la conductivité d'un matériau est proportionnel au courant, on peut écrire l'équation suivante:

$$\frac{I_{\text{fil}}}{\text{Section}_{\text{fil}}} = \sigma_e(T^{\circ}) \cdot V \quad \sigma_e = \text{Conductivité de l'anneau} \quad \sigma_e(T^{\circ}) \propto \frac{1}{T^{\circ}}$$

$V =$  Tension continue

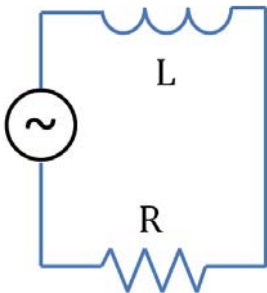
Pour une même tension, le courant sera maximum pour une conductivité maximum. Dans le cas du courant alternatif c'est un peu différent mais le principe reste le même : Le courant circulant dans l'anneau augmente avec la conductivité. Or la force de Lorentz est donné par  $\vec{F}_m(t) = I_A(t) \cdot l \cdot B_R(t) \cdot \vec{I}_y$ . Donc plus la conductivité augmente plus notre anneau sautera haut. En refroidissant notre anneau la conductivité est multiplié par 7.

## L'anneau sauteur

Yannick Fomena, Christophe Labar, Elias L'Mourabiti, Ariston Milhomem, Guillaume Valette et Mathieu Van Dyck  
Service OPERA

**Problème posé :** Construire un dispositif démontrant la loi d'induction électromagnétique de Faraday.

### Représentation physique du dispositif



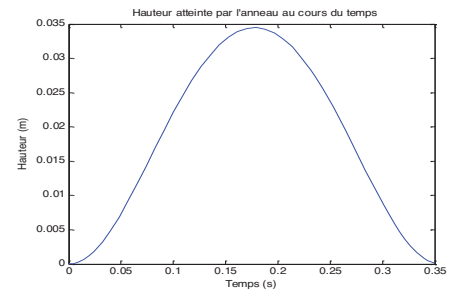
Il est nécessaire de pouvoir établir une représentation physique du dispositif, aussi bien pour l'anneau que pour l'inducteur. Cette représentation permet entre autres d'obtenir une relation entre les différents paramètres du dispositif et constitue une base pour son dimensionnement.

Dans notre cas, nous pouvons représenter l'anneau et le solénoïde par un circuit équivalent R-L (résistance et inducteur en série). La présence de la résistance provient du fait que tout matériau, non idéal, possède une certaine résistivité.

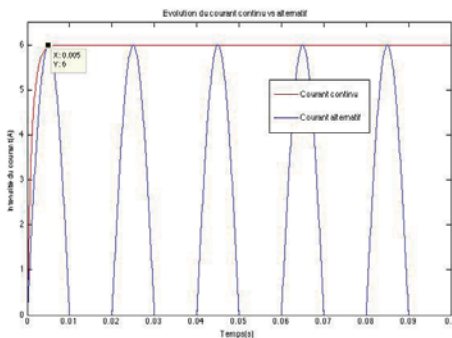
La loi courant-tension de ce circuit donne  $|I| = |U| / \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$  où  $\omega$  représente la pulsation du courant.

### Nécessité de recourir aux méthodes numériques

Le champ magnétique généré par un solénoïde en un point n'étant pas connu analytiquement, il était impossible de connaître le flux capté par l'anneau et donc de trouver la force subie par l'anneau au cours du temps. C'est pourquoi des méthodes numériques de calcul ont dû être développées. Sur cette base, des profils de la force magnétique subie par l'anneau ont pu être établis. En résolvant la seconde loi de Newton, la hauteur de l'anneau en fonction du temps a alors pu être obtenue. La figure ci-contre représente le graphique position-temps théorique de notre dispositif dans le cas où le noyau s'arrête à l'extrémité de l'inducteur.



### Pourquoi le choix du courant alternatif ?



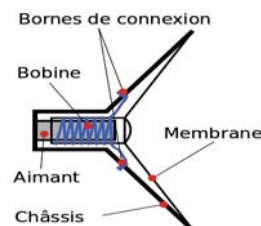
Courant continu	Courant alternatif
Varie durant une très courte période → Force répulsive cesse vite	Varie continuellement → Force de répulsion incessante
✘	✔
Variation légèrement plus forte en courant continu qu'en alternatif	

Bien que les variations soient légèrement plus fortes en courant continu, celles-ci ne se produisent que pendant un très court laps de temps. Le courant alternatif est donc préférable pour garantir une force de répulsion plus longue.

### Applications pratiques de la loi d'induction

Un mécanisme semblable est utilisé dans les **haut-parleurs**

1. Une bobine de fil est disposée dans le sens axial
2. La bobine est reliée à membrane
3. Un aimant crée un champ magnétique constant
4. Lorsqu'un courant parcourt la bobine, une force tend à la repousser
5. La membrane fait vibrer l'air, d'où l'apparition de son

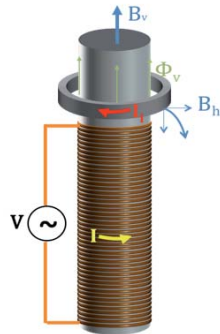


<http://fr.wikipedia.org/wiki/Haut-parleur>

## L'anneau sauteur

Yannick Fomena, Christophe Labar, Elias L'Mourabiti, Ariston Milhomem, Guillaume Valette et Mathieu Van Dyck  
Service OPERA

**Problème posé :** Construire un dispositif démontrant la loi d'induction électromagnétique de Faraday.



Le dispositif doit être composé de deux parties : un anneau métallique, et donc conducteur électrique, et un inducteur qui est dans notre cas un solénoïde.

Le principe de la démonstration est le suivant: après avoir posé l'anneau sur l'inducteur, si l'on branche l'inducteur à une source de tension, l'anneau est propulsé dans les airs. Ce saut s'explique par la loi de Faraday.

### Prérequis

Tout circuit fermé captant un flux magnétique variable subit une force électromotrice induite opposée à cette variation. Celle-ci donnera lieu à un courant électrique.



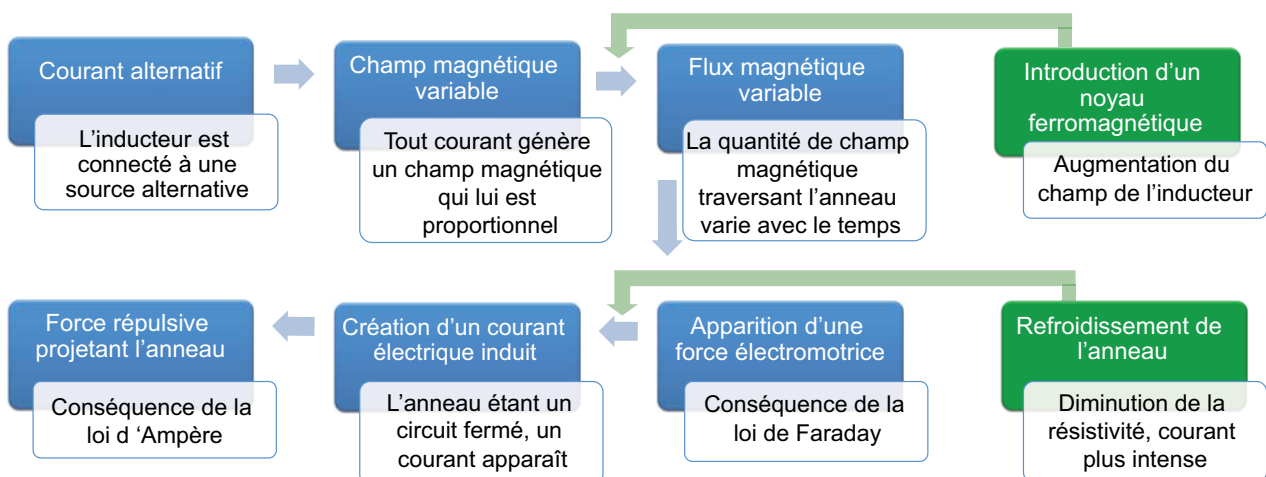
Michael Faraday [1]



Lorsque deux conducteurs véhiculent des courants de sens identiques, ils s'attirent, S'ils véhiculent des courants de sens opposés, ils subissent une force répulsive

André-Marie Ampère [2]

### Description des phénomènes physiques



[1] © copyright-free-pictures.org.uk, <http://www.copyright-free-pictures.org.uk/famous-people/20-michael-faraday.htm>

[2] <http://www.fdesouche.com/167047-20-janvier-1775-naissance-de-andre-marie-ampere>