

[2012, 2011] "La notion d'inductance mutuelle est souvent oubliée ou mal dégagée, par suite de mauvais choix dans les protocoles expérimentaux."

[2010] "La notion d'inductance mutuelle est souvent mal dégagée, par suite en particulier de mauvais choix dans les composants utilisés et dans la fréquence d'excitation."

[2009] "L'observation subjective d'un retard à l'allumage d'une lampe ne peut être qu'une introduction qualitative du phénomène d'auto-induction qui doit être illustré par des mesures précises et une confrontation entre la mesure et le modèle décrivant le phénomène. L'étude du rendement du transformateur n'a pas sa place dans ce montage."

[2007] "Ces notions sont fondamentales. Le montage est pourtant souvent décevant, traité à un niveau trop élémentaire."

#### Bibliographie :

- [1] Quaranta IV, Électricité et applications
- [2] Duffait, CAPES de Sciences Physiques
- [3] Duffait, Electronique
- [4] Garing, Magnétisme

#### Plan du montage :

#### Introduction

*Vérification qualitative de la loi de Lenz avec un aimant et une bobine.*

#### I. Vérification de la loi de Faraday

*Mesure du champ uniforme dans l'entrefer d'un électroaimant via un fluxmètre associé à un montage comparateur, et à un teslamètre.*

#### II. Mesure de caractéristiques d'une bobine dans les cas d'auto-induction et d'induction

##### A. Mesure d'inductance propre par résonance

*Mesure d'une fréquence de résonance d'un filtre RLC, et déduction de L. Vérification via un LC-mètre.*

##### B. Mesure d'une inductance mutuelle

*Mesure de la tension dans le secondaire en alimentant la primaire par un signal alternatif triangulaire. Vérification avec un LC-mètre.*

#### III. Applications

##### A. Chute libre dans un tube : freinage par courants de Foucault

*Chute d'un aimant dans des tubes de matériaux différents (conducteurs ou non). Mesures de vitesses limites.*

##### B. Lissage du courant redressé pour obtenir du continu

*Mise en évidence du phénomène de lissage du courant par la bobine avec un redresseur de courant.*

#### Conclusion

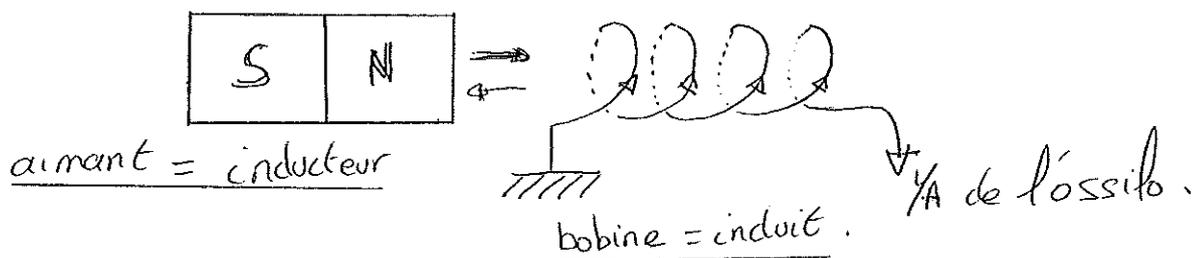
## Introduction

L'induction est le phénomène se produisant au sein d'une bobine lorsqu'elle est plongée dans un champ magnétique temporellement variable (Neumann), ou qu'elle est en mouvement dans un champ magnétique permanent (Lorentz). Elle est régie par la loi de Faraday, que nous nous efforcerons de valider dans un premier temps. Ensuite, nous étudierons deux caractéristiques importantes des bobines : l'inductance propre et l'inductance mutuelle. Enfin, nous aborderons deux applications parmi les nombreuses qui existent.

En première approche, l'induction obéit à la loi phénoménologique de Lenz :

« Le courant induit est d'un sens tel que le flux magnétique qu'il crée s'oppose à la variation de flux qui lui a donné naissance. »

Expérience introductive : vérification de la loi de Lenz.



=> Visualiser la variation de  $e$  et son sens quand on approche un aimant. Bien différencier chaque mouvement de l'aimant, et ne pas faire de va-et-vient.

=> Le sens s'inverse quand on approche un pôle et quand on le recule. De même il s'inverse quand on retourne l'aimant (changement du pôle).

=> Trouver chaque pôle de l'aimant grâce à une plaquette d'aiguilles.

=> L'intensité de la f.e.m. générée est dépendante de la vitesse d'approche de l'aimant.

A partir de ces constatations expérimentales, nous pouvons déduire la forme de la loi de Faraday,  $e = \frac{-d\Phi}{dt}$ , que nous allons nous efforcer de vérifier expérimentalement.

l'autre à l'intensité dans le circuit), et en utilisant un GBF dont on fait varier la fréquence.

### B/ Mesure de l'inductance mutuelle

Si l'on met maintenant deux bobines face à face, on sait que si l'une des bobines produit un champ magnétique variable, alors il va induire une f.e.m. dans l'autre, qui va générer un champ magnétique s'opposant à celui qui lui a donné naissance. Ainsi, si l'on alimente que la bobine 1, le flux dans les bobines s'écrit :

$$\Phi_1 = L_1 i_1 + M i_2 \quad \text{et} \quad \Phi_2 = M i_1 .$$

En imposant un signal triangulaire à la bobine 1 via un GBF, comme montré sur le schéma ci-dessous, la f.e.m. induite dans la bobine 2 est linéaire et s'écrit :

$$e = -M \frac{di_1}{dt} = \frac{-M}{R} \frac{\Delta U}{\Delta t} , \quad \text{on en déduit} \quad |M_{\text{montage}}| = \frac{R e \Delta t}{\Delta U} .$$

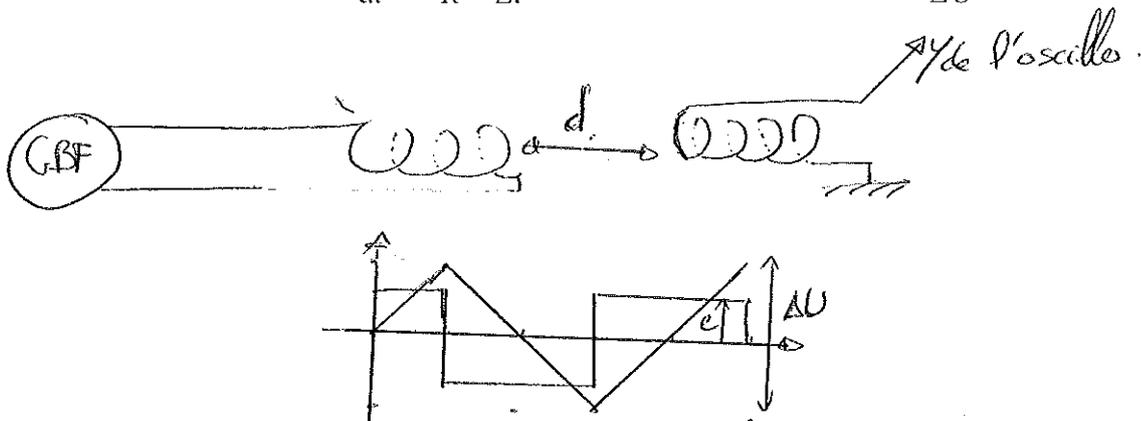


Schéma du montage

Pour vérifier ces mesures on utilise un LC-mètre aux bornes des deux bobines précédentes placées en série. On prend une mesure, puis on retourne la bobine, et on prend une seconde mesure. L'inductance mutuelle se déduit de la différence entre les deux mesures :

$$\begin{aligned} L_T &= L_1 + M + L_2 + M \\ L_T' &= L_1 - M + L_2 - M \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad M_{\text{LC-mètre}} = \frac{L_T - L_T'}{4}$$

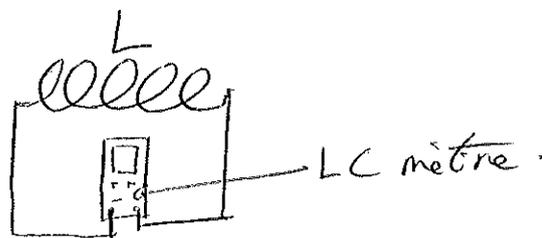


Schéma de la mesure par LC-mètre

On obtient  $M_{\text{LC-mètre}} = (19,0 \pm 0,1) \text{ mH}$  . Ceci valide bien le principe de la mesure de l'inductance mutuelle.

Ainsi, les inductances propres et mutuelles sont accessibles par des expériences pas très

compliquées à mettre en place.

Nous allons maintenant nous intéresser à deux applications majeures parmi les nombreuses applications qui mettent en jeu le phénomène d'induction : le freinage par courants de Foucault, et le lissage d'un courant redressé, utilisé pour faire du courant continu.

### III. Applications

#### A/ Chute libre dans un tube : freinage par courants de Foucault

Les courants de Foucault sont des courants volumiques des charges d'un matériaux conducteur, qui sont générés par la présence d'un champ magnétique temporellement variable. Ainsi, un aimant en mouvement dans le tube va générer de tels courants qui vont s'opposer au mouvement en induisant un champ magnétique B opposé à celui de l'aimant.

Cette force s'exprime en :  $dF = \vec{M} \cdot \frac{d\vec{B}}{dz}$ .

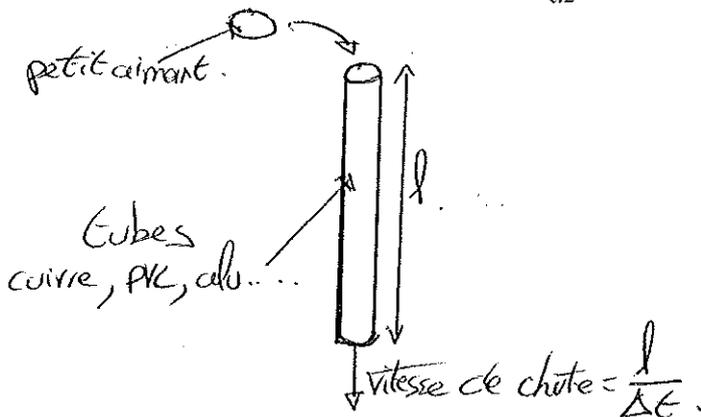


Schéma du montage

En considérant les vitesses limites comme rapidement atteintes (quelques dizaines de ms), le rapport des vitesses limites entre deux métaux conducteurs permet d'obtenir le rapport des conductivités, puisque  $v_l \propto \frac{1}{\sigma}$ .

On mesure :  $\frac{v_{Cu}}{v_{Al}} = 0$ , et on en déduit :  $\frac{v_{Cu}}{v_{Al}} = \frac{\sigma_{Al}}{\sigma_{Cu}} = \dots$ . Les valeurs tabulées donnent :

$$\left( \frac{\sigma_{Al}}{\sigma_{Cu}} \right) = 0.63$$

Notons que nous utilisons ici des alliages, et non les métaux purs, ce qui modifie les conductivités des matériaux.

## I. Vérification de la loi de Faraday par fluxmètre et teslamètre.

Dans l'entrefer d'un électroaimant, le champ est à peu près uniforme et temporellement constant. Il est toutefois possible de mesurer un tel champ à travers une bobine en utilisant un montage intégrateur après la bobine.

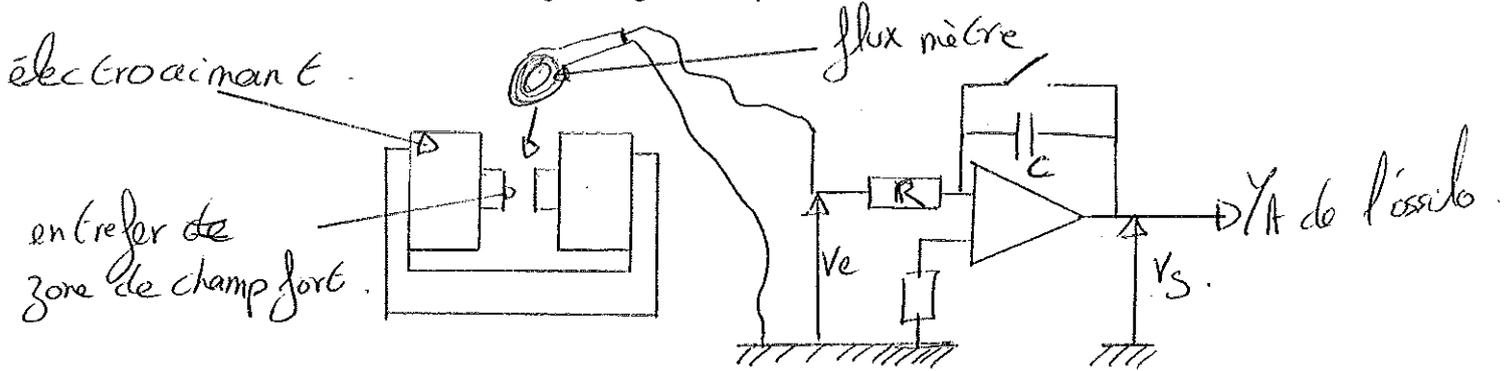


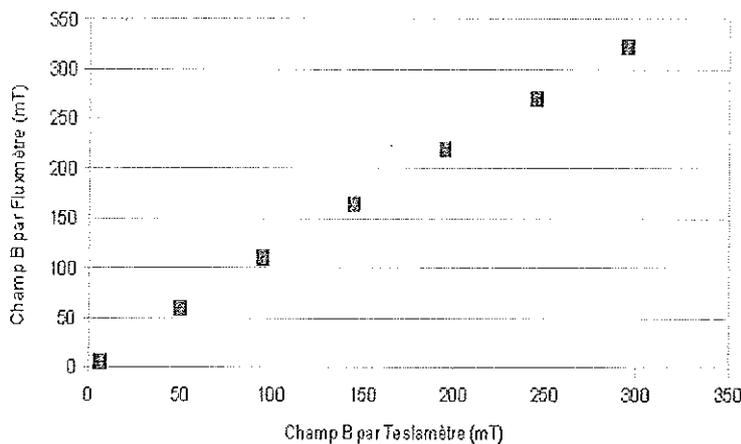
Schéma du montage.

En sortie de l'intégrateur, on a :  $V_s = \frac{-1}{RC} \int_0^t V_e dt = \frac{-1}{RC} \int_0^t d\Phi = \frac{-\Delta\Phi}{RC}$ .

Ainsi, en prenant la référence de flux hors de l'électroaimant, on a  $\Phi_{fluxmètre} = NSB$ . On

déduit alors le champ magnétique de la tension mesurée :  $V_s = \frac{NSB}{RC}$ .

On compare alors les résultats obtenus au champ B mesuré par le fluxmètre à ceux mesurés par un teslamètre, fonctionnant sur le principe de la sonde à effet Hall.



L'intégrateur est disponible sous forme d'un petit boîtier pré-réglé, ce qui est très pratique, car le réglage du zéro se fait alors en appuyant sur un bouton simplement.

$$NS = 2000 \text{ cm}^2$$

$$RC = 10^{-2} \text{ s}$$

Les mesures concordent bien à une petite différence près, et l'on montre ainsi qu'il est possible de mesurer un champ magnétique via l'utilisation d'un fluxmètre. Notons cependant que le teslamètre mesure un champ local, alors que le fluxmètre intègre le champ B sur toute la surface de mesure, ce qui peut poser problème s'il n'est pas uniforme.

Maintenant que le principe de fonctionnement de l'induction est compris et vérifié, nous allons nous intéresser à la mesure des caractéristiques des bobines : l'inductance propre et l'inductance mutuelle.

## II. Mesures de caractéristiques d'une bobine dans les cas d'auto-induction et d'induction

### A/ Mesure de l'inductance propre par résonance

Pour mesurer l'inductance propre d'une bobine, il existe plusieurs façons, dont simplement la mesure par un LC-mètre. Nous nous intéressons ici à la mesure par résonance de l'inductance d'une bobine placée dans le montage RLC suivant.

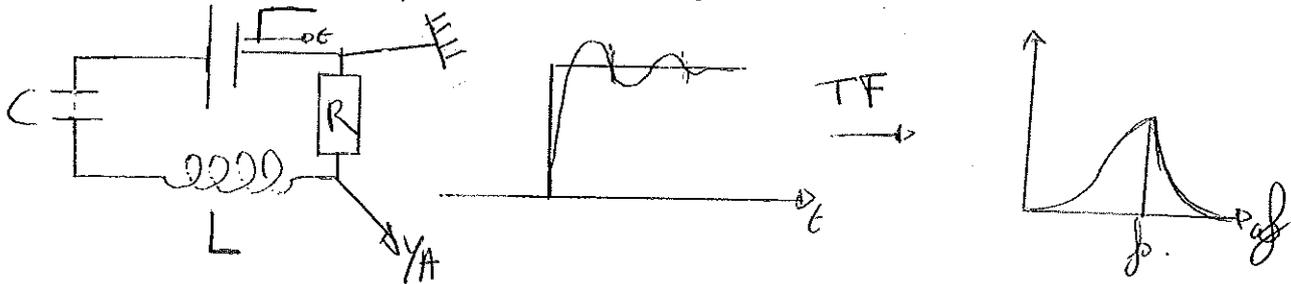


Schéma du montage.

Pour étudier cette résonance, nous utilisons le principe de la réponse indicielle, qui revient à exciter toutes les fréquences, et à étudier la réponse du système. Pour ce faire, on peut exciter le système par un pulse, ou alors par une fonction de Heavyside si l'on dérive le signal reçu par la suite (la dérivée de la fonction de Heavyside est un Dirac). On propose de prendre 8192 points (  $2^{13}$  ) et d'acquérir pendant 50ms.

Le signal observé ne ressemble pas à grand chose, mais faites les opérations suivantes et vous aurez une jolie réponse indicielle : lissage => dérivée => lissage => FFT. Les lissages permettent de ne pas avoir une dérivée complètement folle. Préférez la commande de lissage « réjection HF », si vous voulez que ça marche bien (l'autre ne m'a pas donné de résultats concluants, mais je ne sais pas trop pourquoi...).

On en déduit la valeur de L, via la relation :  $2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$   $\Leftrightarrow L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C}$ , et

$$\frac{\Delta L}{L} = \sqrt{\left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta f_0}{f_0}\right)^2}$$

On calcule alors l'inductance à  $L_{mesure} = (45,1 \pm 1,4) mH$ , alors qu'on a mesuré au LC-mètre  $L_{LC-metre} = (44,4 \pm 0,9) mH$ . Cette méthode permet donc d'obtenir une bonne mesure de l'inductance propre, si l'on connaît la conductance. Notons qu'il est possible ainsi de déduire C si l'on connaît L.

Enfin, le facteur de qualité de ce filtre du deuxième ordre ( $H = \frac{jRC\omega}{1 - LC\omega^2 + jR_{tot}C\omega}$  et

$Q = \frac{L\omega_0}{R_{tot}}$ ) peut être amélioré en agissant sur la résistance. En la prenant la plus petite possible, la réponse indicielle devient très piquée.

Il est aussi possible de trouver la résonance en mettant en phase la tension et l'intensité (droite dans le diagramme XY de l'oscillo avec une voie correspondant à la tension, et

## B/ Lissage de courant redressé pour obtenir du continu

Les bobines sont utilisées largement en électrotechnique, et notamment à côté de chaque machine à courant continu à courant fort, il y a une bobine importante. En effet, pour générer du courant continu à partir de courant alternatif, il faut redresser le courant, ce qui peut se faire avec un pont de diodes, et il faut ensuite travailler ce signal redressé pour qu'il soit continu ou presque. La bobine permet de faire cela, comme nous allons le montrer ici.

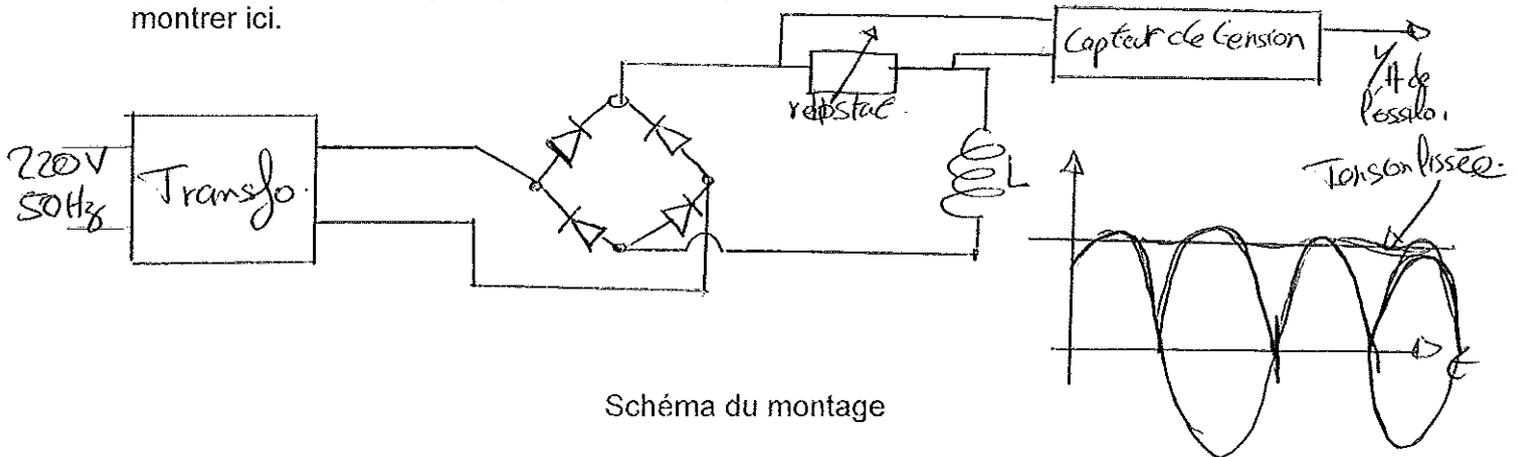


Schéma du montage

Comme la bobine tend à s'opposer aux variations de courants, si son inductance est suffisamment grande (ici 1H), alors elle a un effet de lissage sur le courant alternatif. Comme le courant a été redressé auparavant, elle tend à imposer le courant moyen comme courant presque continu.

## Conclusion

L'induction est un phénomène très intéressant qui décrit le couplage entre des déplacements de porteurs de charge et les variations du champ magnétique, couplage qui est régi par la loi de Faraday.

Les nombreuses applications en font un sujet très intéressant à traiter. On peut introduire le chauffage par conduction, le freinage des poids-lourds par courants de Foucault, le lissage de courant lors de la conversion alternatif/continu, les allumages par étincelles,....