

MP20 – INDUCTION, AUTO-INDUCTION

15 avril 2020

Aurélien Goerlinger & Yohann Faure

Commentaires du jury

- **2017** : Les notions d'induction, auto-induction, induction mutuelle sont souvent mal comprises rendant l'interprétation délicate de certains résultats.
- **2014-2016** : Lors de ce montage, trop de candidats abusent des expériences qualitatives et transforment la séance en une série d'expériences de cours sur l'induction et obtiennent de ce fait une note médiocre.
- **2009-2016** : La notion d'inductance mutuelle est souvent mal dégagée, en particulier à cause 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.

Bibliographie

✎ *Dictionnaire de physique expérimentale tome 4, Quaranta*

Table des matières

1	Présentation de l'induction	2
1.1	Loi de Lenz	2
1.2	Loi de Faraday, version simple	2
1.2.1	Proportionnalité entre flux et intensité	2
1.2.2	Vérification de la loi de Faraday	3
1.3	Loi de Faraday, version chiadée	3
2	Mesure de coefficients d'inductance	4
2.1	Inductance propre d'une bobine	4
2.2	Écart au comportement idéal	5
2.3	Mesure d'inductance mutuelle	5
3	Applications	6
3.1	Freinage par courants de Foucault	6
3.2	Le transformateur	7
3.3	Chauffage par induction	8

Introduction

Les phénomènes d'induction, bien que très présents dans nos vie (chargeurs sans fil, plaques à induction, micro/hautparleur, freinage des poids lourds, redressage de courant, bougies de voiture, allumage des néons...), les phénomènes inductifs sont souvent subtils et un peu à part dans le cursus du physicien.

1 Présentation de l'induction

1.1 Loi de Lenz

Ces phénomènes reposent sur l'équation de Maxwell-Faraday

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Cette équation montre un couplage entre les champs magnétique et électrique. Le signe *moins* dans cette expression est la signature de la loi de modération de Lenz, qui stipule :

Le courant induit a un sens tel que les variations de flux induit qu'il crée s'opposent aux variations du flux inducteur.

On distingue alors deux types d'induction : **Neumann** (aimant en mouvement, bobine fixe) et **Lorentz** (Bobine en mouvement ou déformation, aimant qui bouge).

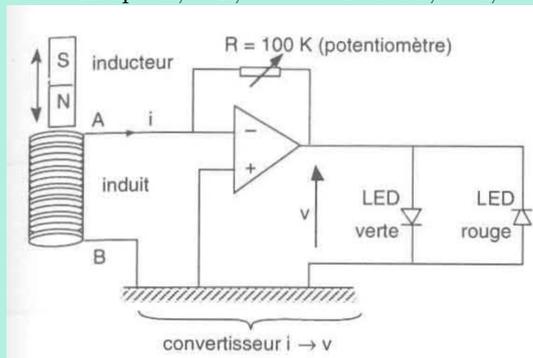
Dans les deux cas, il est important de rappeler que dans le cadre de l'induction, on se place en ARQS magnétique, c'est-à-dire dans un régime où l'effet des courants domine celui des charges.



Illustration de la loi de Lenz



Matériel : Bobine 100 spires, AO, boîte à decades, leds, aimant plat.



Procédé :

On fait aller et venir l'aimant, on règle l'ampli avec la boîte à décades (100KΩ), et on met deux leds de couleurs différentes.

1.2 Loi de Faraday, version simple

1.2.1 Proportionnalité entre flux et intensité

En faisant passer un courant dans une bobine, on peut voir, avec une sonde à effet Hall, qu'un champ magnétique B apparait. C'est l'effet d'induction propre. Nous nous plaçons ici en induction de Neumann.

Intéressons nous tout d'abord à la relation entre le flux ϕ_B du champ magnétique à travers une bobine et l'intensité i parcourant cette dernière. On cherche à vérifier la relation de proportionnalité

$$\phi_B = Li$$

L est le coefficient d'inductance propre de la bobine, dont nous reparlerons par la suite et que nous chercherons à déterminer précisément.

Pour vérifier cette relation, on admet que la sonde à effet Hall nous donne effectivement le champ B .

Hypothèses :

- Solénoïde infini (proche du centre)
- ARQS magnétique



Proportionnalité entre le flux et l'intensité dans une bobine



⊖ 10mn en prépa

Matériel : une bobine alimentée en continu, une sonde à effet Hall, un ampèremètre

Expérience : On impose un courant i dans la bobine et on mesure le champ B induit avec la sonde à effet Hall. On trace $B = f(i)$, et le coefficient directeur est $L/(nS)$, avec n le nombre de spires dans la bobine, et S la surface à l'intérieur.

Les incertitudes sur B et i sont prises sur les notices des appareils. On obtient une droite. On vérifie bien la proportionnalité entre B et i , et donc entre ϕ_B et i . On peut remonter à L , mais déterminer L avec cette méthode ne serait pas très précis, car nous ne connaissons pas bien S , et donc pas bien le flux magnétique. Nous reviendrons sur des mesures d'inductance.

1.2.2 Vérification de la loi de Faraday

La loi importante de l'induction est la loi de Faraday. Toute variation de flux de champs magnétique à travers un circuit se traduit par l'apparition d'un champs électrique vérifiant, avec e la force électromotrice, ϕ le flux au travers le circuit vu dans le référentiel du laboratoire :

$$e = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} = - \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

Pour la vérifier nous allons nous palcer en induction de Lorentz, avec un champs fixe et un circuit mobile.



Loi de Faraday



⊖ 20mn en prépa

Matériel : électroaimant alimenté en continu, sonde à effet Hall, sonde du fluxmètre.

Expérience :

- On alimente l'électroaimant en continu ; un champ B est créé dans l'entrefer.
- On mesure la tension e aux bornes des spires. On place d'abord les spires dans le champ (dans l'entrefer, puis on les retire tout en lançant une acquisition sur ordinateur pendant à peu près 3s.
- On intègre la tension obtenue.
- On mesure le champ avec la sonde à effet Hall, et on en déduit le flux magnétique ϕ_B qui passait à travers les spires (connaissant par ailleurs la surface des spires).
- On trace $\phi_B = f(\int e)$, ça fait une droite de pente -1.

1.3 Loi de Faraday, version chiadée

L'autre loi importante de l'induction est la loi de Faraday. Toute variation de flux de champs magnétique à travers un circuit se traduit par l'apparition d'un champs électrique vérifiant, avec e la force électromotrice, ϕ le flux au travers le circuit vu dans le référentiel du laboratoire :

$$e = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} = - \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2)$$

Dans cette expérience on se place dans le cadre de l'induction de **Neumann**. L'objectif est de mesurer la fem induite aux bornes d'une bobine, par deux autres bobines placées en configuration Helmholtz (p77.4). Le champ \vec{B} est constant et vaut, avec R le rayon des bobines (et la distance entre elles) et N leur nombre de spires :

$$B(I) = \frac{8}{5\sqrt{5}} \frac{\mu_0 N I}{R} = 1.356 \times 10^{-3} I = \alpha I$$

On applique $I = I_0 \cos(\omega t)$, on met une petite bobine au milieu, et alors on a, avec θ l'angle entre B et dS , n le nombre de spires de la bobine du milieu, et S sa surface :

$$e = - \frac{\partial}{\partial t} (\alpha I_0 n S \cos(\omega t) \cos \theta) = 1.356 \times 10^{-3} I_0 n S \omega \sin(\omega t) \cos \theta \quad (3)$$



Vérification de la loi de Faraday

⚡ ⊕

Pour avoir un courant assez fort dans les bobines, on utilise un ampli de puissance (on peut se le permettre - limitation à 5A). On envoie une intensité sinusoïdale dans les bobines (en confi Helmholtz), on vérifie plusieurs dépendances :

- Qualitativement, le signe de la fem, et la quadrature de phase. Attention, la quadrature de phase est entre I dans les bobines de Helmholtz et U dans la bobine au centre, donc il faut bien prendre la tension au bornes d'un rhéostat pour avoir I. On montre alors qu'on a qq chose en $\sin(\omega t)$. Pour le signe - on est marron pcq il faudrait avoir le sens de l'enroulement de la bobine centrale. Pour le déterminer, on peut le faire en préparation en utilisant... la loi de Faraday.

- Qualitativement OU Quantitativement : en fréquence/pulsation (attention, **il faut être dans l'ARQS**). De plus, aux bornes de la résistance, on a l'intensité dans un circuit RL -> passe-bas (en intensité), donc bien mesurer l'intensité pour avoir la dépendance en fréquence.

- Qualitativement OU quantitativement : en I et donc en B_0 . On prend pour ça une sonde à effet Hall pour mesurer B_0 .

- en θ

Pour faire ça on fait varier les paramètres un par un, on trace des droites. Tout cela nous permet de remonter à NS.

remarque : Reprendre le même montage, en intensité CONTINUE, et faire tourner la bobine induite. On observe une intensité variable à ses bornes. C'est du Lorentz !

2 Mesure de coefficients d'inductance

2.1 Inductance propre d'une bobine

Lorsqu'une bobine est parcourue par une intensité I , elle crée un champ magnétique par induction. Cette bobine est donc soumise à deux champs magnétiques : le champ magnétique extérieur \vec{B}_{ext} et le champ magnétique que la bobine elle-même crée, appelé *champ magnétique propre* \vec{B}_{propre} . La loi de Faraday pour cette bobine s'écrit donc

$$e = -\frac{\partial}{\partial t}(\Phi_{\text{ext}} - \Phi_{\text{propre}}) \quad (4)$$

Le flux propre Φ_{propre} est proportionnel au courant I :

$$\Phi_{\text{propre}} = L \times I \quad (5)$$

avec L l'inductance de la bobine. On parle également d'inductance propre ou d'auto-inductance.

Pour mesurer L , on se propose d'utiliser un circuit RLC série. Si on s'intéresse à la tension aux bornes de la résistance, la fonction de transfert du circuit s'écrit

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \quad \text{avec} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{et} \quad Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

⚡

Mesure de l'inductance propre d'une bobine

⚡ ⊕

Matériel : une résistance $R = 100 \Omega$, bobine, boîte à décades de capacité (de 100 nF à 1 μF), GBF, oscilloscope, RLC mètre

Réaliser un circuit RLC série. Envoyer sur la voie 1 de l'oscillo le signal d'entrée et sur la voie 2 la tension aux bornes de la résistance. On a donc affaire à un passe-bande. Passer en mode XY pour voir l'ellipse et trouver la fréquence du GBF pour laquelle l'ellipse est une droite (Lissajous rpz) : c'est la fréquence de résonance.

Répéter l'opération pour plusieurs capacités C puis tracer $\frac{1}{\omega_0^2} = f(C)$. La pente est exactement L . On peut comparer cette valeur à la valeur mesurée au RLC mètre.

Remarque : On choisit R faible pour avoir Q grand : le pic de résonance est alors plus haut et plus fin.

2.2 Écart au comportement idéal

CASSE GUEULE mais à savoir

Une bobine idéale est caractérisée par une impédance $Z = j\omega L$. En pratique, puisqu'une bobine est un long fil enroulé sur lui-même, elle présente aussi un comportement résistif surtout visible aux basses fréquences. En hautes fréquences on peut voir apparaître des effets capacitifs entre les spires formant la bobine.



Diagramme de Bode en amplitude d'une bobine

On réalise un circuit RL. La pulsation de coupure de ce passe-bas est $\omega_c = \frac{R}{L}$. On peut tracer le Bode en amplitude de ce circuit en prenant la tension aux bornes de la résistance.

On distingue alors 3 zones :

- à basses fréquences, l'impédance du système est constante
- entre 50 Hz et 100 kHz environ, on observe le comportement passe-bas d'une bobine idéale
- en très hautes fréquences, on voit un comportement passe-haut dû à l'apparition d'effets capacitifs.

La pulsation de coupure en BF vaut $\omega_c = \frac{R+R_L}{L}$, donc on peut en déduire la résistance interne de la bobine. On peut comparer cette valeur à celle obtenue directement avec un ohmmètre aux bornes de la bobine. On devrait constater une faible différence due à la dépendance fréquentielle de R_L .

2.3 Mesure d'inductance mutuelle

On considère deux bobines l'une à côté de l'autre. Chacune d'entre elles va créer un champ propre auquel l'autre sera soumise, et donc produire un flux non-nul à travers l'autre (en plus du flux propre et du flux extérieur) :

$$\begin{aligned}\Phi_{1 \rightarrow 2} &= M i_1 \\ \Phi_{2 \rightarrow 1} &= M i_2\end{aligned}\quad (7)$$

Ces flux entraîneront alors l'apparition des fem :

$$\begin{aligned}e_{1 \rightarrow 2} &= -M \frac{\partial i_1}{\partial t} \\ e_{2 \rightarrow 1} &= -M \frac{\partial i_2}{\partial t}\end{aligned}\quad (8)$$

Le coefficient M est l'inductance mutuelle. On peut exprimer $\frac{\partial i}{\partial t}$ en envoyant une tension triangle avec un GBF : $\frac{\partial i}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\Delta U}{\Delta t}$.

Remarque

Le fait que l'inductance mutuelle soit la même constitue le théorème de Neumann (démonstration dans le Perez d'électromagnétisme p.275).



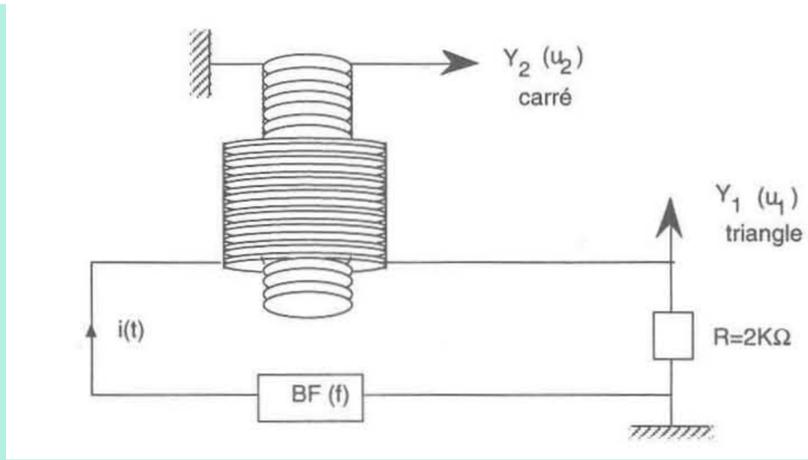
Mesure d'inductance mutuelle

Quaranta p277

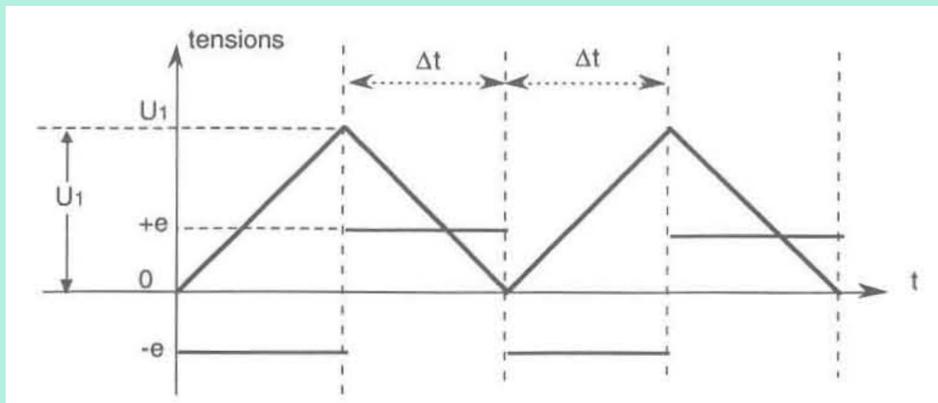
5 min

Matériel :

- bobines intriquées P59.4
- boîte à décades de résistance
- GBF
- oscilloscope



Réaliser le montage ci-dessus. Envoyer un signal triangulaire avec le GBF et observer en voie 2 la tension aux bornes de la bobine intérieure : on doit voir un signal créneau d'amplitude crête à crête $2e$. Une résistance autour de $2\text{ k}\Omega$
 En voie 1, on observe la tension aux bornes de la résistance pour connaître le courant.
 Pour différentes fréquences, mesurer la pente du signal triangulaire en mesurant ΔT et U_1 (cf forme du signal ci-dessous).



On en déduit $\frac{\partial i}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\Delta U}{\Delta t}$. On trace alors $e = f(\frac{\partial i}{\partial t})$. On doit avoir une droite de pente M .

Inductance mutuelle mesurée autrement

- On couple 2 RLC. On a apparition de 2 modes propres symétrique et antisymétrique à $\omega_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{C(L \pm M)}}$. Il est possible de remonter à M mais c'est compliqué.
- On peut aussi utiliser un pont de Maxwell

3 Applications

3.1 Freinage par courants de Foucault



Freinage par courant de Foucault



⊙ 2mn

Faire tomber un petit aimant dans les tubes de cuivre et d'aluminium. Souligner le temps de chute relativement long. Pour montrer qu'il n'y a aucune force de type frottement dans le tube qui serait à l'origine de cet effet, on peut faire chuter l'aimant dans un tube en plastique. Cela met en évidence l'existence d'une force de freinage dans les tubes en cuivre et aluminium.

La force supplémentaire de freinage est une force de type visqueux, proportionnelle à la vitesse. L'aimant possède un moment magnétique \vec{M} ; il en résulte un champ magnétique \vec{B} et un potentiel vecteur \vec{A} en chaque point P du tube. Puisque l'aimant est en mouvement, $\vec{A}(P)$ dépend du temps. Un champ électromoteur de type Neumann apparaît :

$$E_m(t) = -\frac{\partial \vec{A}(P)}{\partial t} \quad (9)$$

Vient alors un courant i dans le tube. La force de Laplace qui en résulte est dirigée selon l'axe du tube, et dans le sens opposé à la chute. C'est une force du type frottement fluide : $\vec{F} = -\alpha \vec{v}$, avec α un coefficient indépendant de l'altitude de l'aimant, ne dépendant que de la géométrie du tube, de sa conductivité et du moment magnétique de l'aimant.

3.2 Le transformateur

Une des applications les plus communes de l'induction est le transformateur. Un transformateur est constitué de 2 bobines accolées. Il existe dans la collection tout un tas de transformateurs industriels, que nous n'étudierons pas puisque leurs caractéristiques ne sont pas indiquées. Nous travaillerons donc avec un transformateur maison, constitué de 2 bobines d'inductance propre proches, l'une ayant 500 spires et l'autre... MILLE ! Ces deux bobines sont encastrées dans le support (en fer doux) en U, et l'on referme le carré par le haut. L'intérêt de ce fer est de guider les lignes de champ pour limiter au maximum les fuites. Pour un transformateur idéal, indiquons 1 et 2 les grandeurs associées à chacune des bobines. Ce que nous allons vérifier est que, à vide (absence de charge) :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (10)$$

Transformateur maison



Matériel : 2 bobines, une 500 une 1000, un gros transfo bleu pour envoyer de la patate ^a, 3 multimètres, Support en fer doux (feuilleté?).

Mettre le transformateur 220V aux bornes d'une des bobines (N1 spires). Intercaler un ampèremètre pour vérifier qu'on détruit pas tout. Mettre un voltmètre aux bornes de cette même bobine pour le bien de la mesure. On y lit U1. Mettre un voltmètre aux bornes de la deuxième bobine (N2 spires). On y lit U2. Pour différentes valeurs de U1 appliquées à l'aide du transfo, on relève U1 et U2. On vérifie ensuite qu'on a la bonne relation.

^a. https://youtu.be/QiqqC_fbP1c

En pratique

En pratique, on obtient légèrement moins qu'attendu : on a tout de même quelques fuites magnétiques. On remarque aussi que pour des tensions en dessous de 60V le rapport est moins bon. Cela s'explique par le fait que plus des lignes de courant sont présentes et plus le noyau de fer se retrouve collé au support en U : il y a donc moins de fuites quand il y a beaucoup de lignes de courant.

Incertitudes : Les valeurs lues au multimètre fluctuent pas mal, c'est l'amplitude de ces oscillations qu'on garde (plus importantes que celles intrinsèques au multimètre)

Précautions : On évite de mettre les doigts sur les bobines quand on envoie du 220.

Intérêt : Les transfos peuvent être utilisés pour obtenir de forts courants/faibles tensions (choisir N2 » N1) ou de fortes tensions/faibles courants (l'inverse). C'est notamment le cas des lignes hautes tensions, dans lesquelles on veut de faibles courants pour minimiser les pertes par effet Joule. Dans la collection existe un dispositif destiné à montrer la fusion de l'étain, qui se base là dessus.

3.3 Chauffage par induction



Chauffage par induction

On construit un transformateur très élévateur de courant avec 1000 spires au primaire et une seule spire au secondaire. On peut alors faire fondre de l'étain placé dans la spire à goulotte!

On utilise le chauffage à induction en cuisine, mais on peut aussi l'utiliser pour de la soudure à l'arc, ou bien dans des fours à arc en métallurgie.

Conclusion

L'induction est un des domaines qui a mené la recherche vers l'uniformisation des équations de l'électromagnétisme. C'est en voyant la grande diversité de phénomènes présentés que l'on se rend compte de la puissance et de la beauté du formalisme de Maxwell, qui unifie toutes ces lois.

L'induction est aujourd'hui encore un domaine d'avenir, tant du fait de ce qu'elle permet en technologie qu'en recherche.