

MP20 - INDUCTION — AUTO-INDUCTION

25 Mars 2016

Guillaume BLOT & Flora AUBREE

Je m'oppose à la violence parce que lorsqu'elle semble engendrer le bien, le bien qui en résulte n'est que transition, tandis que le mal produit est permanent.

MAHATMA GHANDI

Commentaires du jury

Le Jury précise que 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 ». 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.

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.

Le Jury rappelle que pour les montages en pont (Maxwell, Sauter, ...), la sensibilité obtenue n'est optimale que si une réflexion préalable a été menée.

Le flux magnétique créé par un courant à travers une bobine n'est proportionnel à l'intensité de ce courant ($\phi = Li$) qu'en l'absence de noyau ferromagnétique. La différence entre le modèle théorique que constitue une inductance pure (à laquelle on peut ajouter une résistance série) et une bobine concrète n'apparaît pas toujours clairement.

Jusqu'en 1998, le titre était : Auto-induction : tension, énergie. Caractérisations et mesures. Applications.

Bibliographie

- *Dico de physique expérimentale*, tome III, Daniel Aubert (souvent appelé Quaranta III) → Mesure de L ou M par circuit intégrateur
- *Dico de physique expérimentale*, tome IV, Donnini et Quaranta → fluxmètre et transformateur
- Duffait élec → RLC
- Garing Magnétisme → freinage par courant de Foucault

Expériences

- ☛ Vérification de la proportionnalité entre le flux et l'intensité dans une bobine
- ☛ Vérification de la loi de Faraday
- ☛ Mesure de L par résonance d'un RLC
- ☛ Mesure de M par coulage inductif de deux oscillateurs
- ☛ Mesure du rapport de transformation d'un transformateur

Table des matières

1	Loi de Faraday	2
1.1	Vérification de la proportionnalité entre le flux et l'intensité dans une bobine	2
1.2	Vérification de la loi de Faraday	3
2	Inductance propre et mutuelle inductance	3
2.1	Mesure de l'inductance propre via la résonance d'un circuit RLC	3
2.2	Pas présenté : Mesure de l'inductance mutuelle par un circuit intégrateur	4
2.3	Mesure de l'inductance mutuelle par coulage de deux oscillateurs	4
3	Application de l'induction	6
3.1	Transformateur	6
3.2	Freinage par courants de Foucault	6

Introduction

La loi de Lenz régit les phénomènes d'induction : les effets produits tendent à s'opposer aux causes qui les ont provoqués. On peut distinguer deux types d'induction.

- L'induction de Neumann, ou induction dans un circuit fixe plongé dans un champ variable ,
- et l'induction de Lorentz, ou induction dans un circuit mobile plongé dans un champ fixe.

Regardons cette petite manip, qui illustre un effet d'induction de Lorentz.

Manip d'intro qualitative :

Petite balançoire de la collection : aimant en U avec une barre métallique qui peut se balancer dedans, et dans laquelle un courant peut passer. Illustration de la force de Laplace.

Brancher un oscillo aux bornes de la barre, faire bouger la barre à la main, et observer l'établissement d'une petite tension.

On peut passer de l'un à l'autre de ces types d'induction par changement de référentiel d'étude. Nous allons dans la suite nous intéresser à ces deux configurations, pour tirer des informations sur les éléments inducteurs.

On va chercher à déterminer les coefficients d'inductance propre et de mutuelle inductance de bobines, et regarder quelques applications de l'induction.

1 Loi de Faraday

1.1 Vérification de la proportionnalité entre le flux et l'intensité dans une bobine

En faisant passer un courant dans une bobine, on peut voir, avec une sonde à effet Hall, qu'un champ magnétique B apparaît. 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 .

Proportionnalité entre le flux et l'intensité dans une bobine



⊖ 10 min en préparation

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 la courbe figure 1. On vérifie bien la proportionnalité entre B et i , et donc entre ϕ_B et i .

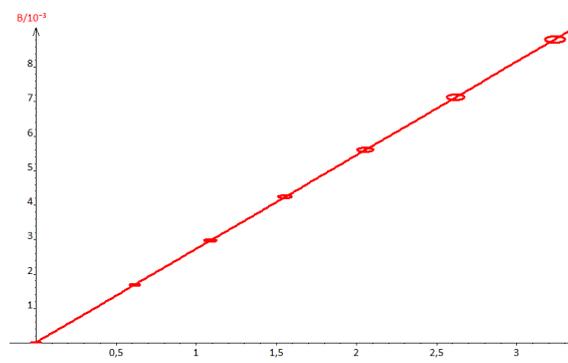


FIGURE 1 – Champ B à travers la bobine (en T) en fonction de l'intensité parcourant la bobine (en A).

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 Vérification de la loi de Faraday

Un circuit fermé et indéformable, parcouru par un courant i , aura une *fem* d'auto-induction $e_P(t) = -\frac{d\phi_B}{dt}$, avec ϕ_B le flux magnétique dans le circuit.

Pour vérifier cette loi, appelée loi de Faraday, on se place en induction de Lorentz, avec un champ magnétique fixe et un circuit mobile. C'est un choix, l'induction de Neumann donnerait le même résultat.

Le circuit sera un ensemble de petites spires, que nous plongerons dans un champ magnétique.

Loi de Faraday

⚡ Quaranta IV

⊖ 20 min en préparation

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

Expérience :

- On alimente l'électroaimant en continu ; un champ B est créé dans l'entrefer.
- On mesure la tension e aux bornes des spires avec synchronie. On place d'abord les spires dans le champ (dans l'entrefer, puis on les retire tout en lançant une acquisition 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 $\phi_B = f(\int e)$.

Les incertitudes sur B sont prises sur la notice. Pour e , on prend la plage sur laquelle on considère que e peut se trouver, avec une densité de probabilité triangle.

On obtient une droite de pente 1 en valeur absolue (figure 2).

Remarque : Nous avons mesuré ici les grandeurs en valeur absolue, car connaître les sens dans lesquels l'intensité parcourt les spires n'est pas facile.

On retrouve bien la loi de Faraday en valeur absolue.

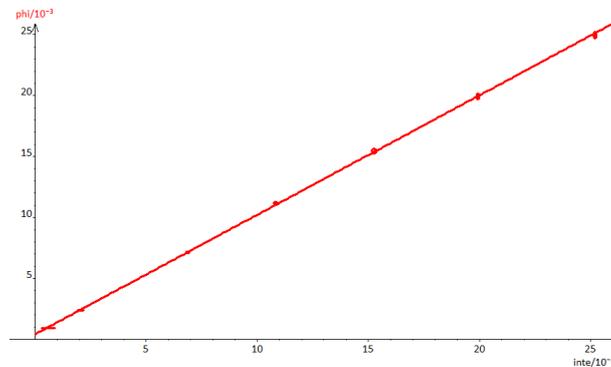


FIGURE 2 – Flux parcourant les spires du circuit mobile (en T/m²) en fonction de l'intégrale de la tension aux bornes des spires (en V · s).

↓ *Maintenant, penchons nous sur la détermination de coefficients d'inductance propre et d'inductance mutuelle.*

2 Inductance propre et mutuelle inductance

2.1 Mesure de l'inductance propre via la résonance d'un circuit RLC

⚡ Duffait elec

Commençons par une méthode de détermination de L se basant sur un effet de résonance : celle d'un circuit RLC. Nous sommes ici en induction de Neumann.

Détermination de L via la résonance d'un RLC



⊖ 20 min en préparation

Matériel : bobine dont on souhaite vérifier l'inductance, résistance de $100\ \Omega$, capacité variable, AO pour un suiveur, oscilloscope

Expérience :

- On choisit une faible résistance afin d'augmenter le facteur de qualité, et donc le phénomène de résonance. En revanche, ce faisant, la résistance se trouve être proche de l'impédance du GBF ($50\ \Omega$). Pour palier à ce problème, on place un suiveur à l'entrée du circuit.
- On mesure la tension aux bornes de la résistance pour avoir un passe-bande.
- On repère la résonance simplement à l'oscilloscope : on repère la fréquence pour laquelle la tension en sortie est maximale. Pour augmenter la précision (d'un facteur 4!), on peut aussi regarder la fréquence pour laquelle le déphasage entre la tension envoyée et la tension de sortie est nul.
- On fait cela pour différentes valeurs de capacité, et on trace $1/\omega_0^2$ en fonction de C . Cela nous donne une droite de pente L .

Les incertitudes sont estimées en regardant la plage dans laquelle on estime que la valeur peut se trouver. On y applique une densité de probabilité triangulaire.

On obtient la courbe figure 3. La pente donne la valeur de $L = 11,4 \pm 0,6\text{mH}$ à 63%. C'est cohérent avec la valeur indiquée par un inductance-mètre.

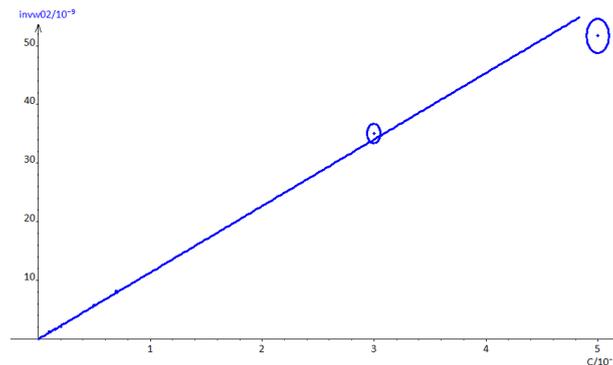


FIGURE 3 – Inverse de la pulsation de résonance au carré en fonction de la capacité C du circuit.

2.2 Pas présenté : Mesure de l'inductance mutuelle par un circuit intégrateur

⚡ Quaranta III p.227

C'est bien décrit dans le Quaranta (qui est en fait un Daniel Aubert...). On fait un circuit intégrateur, on envoie un signal triangle et on mesure la tension aux bornes de la bobine (en carré du coup). Le rapport entre la tension d'entrée et la tension de sortie est liée au coef d'inductance mutuelle et à la période du signal d'entrée.

On peut aussi très bien le faire juste pour une inductance propre.

2.3 Mesure de l'inductance mutuelle par couplage de deux oscillateurs

⚡ Quaranta IV p.155

Pour déterminer un coefficient d'inductance mutuelle entre deux bobines, nous allons étudier le couplage par induction de deux oscillateurs RLC. Nous sommes en induction de Neumann.

Le couplage par induction de deux oscillateurs RLC est caractérisé par un coefficient de couplage K tel que

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

avec L_1 et L_2 les inductances des deux bobines. $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ et $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ sont les pulsations propres des deux RLC indépendants.

Détermination de M par couplage de deux oscillateurs

↻ Quanranta IV p.155

⊖ 30-40 min en préparation

Matériel :

- Pour les oscillateurs couplés : 2 bobines identiques $L = 11.42 \pm 0.15\text{mH}$, 2 condensateurs $C = 0.100 \pm 0.001\mu\text{F}$, 2 résistances $R = 10.0 \pm 0.1\Omega$, un amplificateur qui joue le rôle d'un suiveur, un GBF.
- Pour le détecteur de crête : diode (ici, j'ai pris une 1N4007), une résistance $R = 10\text{k}\Omega$, un condensateur $C = 4.7\mu\text{F}$.
- Pour la modulation du signal : un modulateur FM.
- Et enfin, un oscilloscope.

Expérience :

- On couple deux oscillateurs RLC via leurs inductances.
- On utilise un amplificateur à la place du suiveur tout simple, car il y a trop de courant débité pour le suiveur simple.
- On place un détecteur de crête à la sortie pour récupérer l'enveloppe de la tension, et on récupère cette enveloppe sur la **voie 2** de l'oscilloscope.
- On envoie au circuit un sinus modulé en fréquence. Pour cela, on envoie une rampe au modulateur de fréquence, qui convertit tension en fréquence. Il faut étalonner cette conversion tension-fréquence. Pour cela, on mesure au fréquence-mètre la fréquence de quelques sinus de sortie (qui sont envoyés au circuit) en fonction de la tension délivrée par le GBF. Cela nous donne une droite d'étalonnage.
- Sur la **voie 1** de l'oscilloscope, on visualise la rampe envoyée au modulateur de fréquence, qui se trouve être donc l'image de la fréquence du sinus reçu par le circuit.
- On passe l'oscilloscope en mode XY : on a le maximum de la tension de sortie en fonction d'une tension image de la fréquence ; c'est une sorte de diagramme de Bode.
- En fonction de la valeur de la constante de couplage, on observe soit un seul pic, soit deux pics, qui sont de part et d'autre de la position de ce premier pic. L'écartement entre ces deux pics donne $\Delta\omega$, qui va permettre de remonter à la valeur de la constante de couplage.

Ici, les RLC sont les mêmes, donc $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$.

La relation entre $\Delta\omega$, ω_0 et la constante de couplage K est la suivante :

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{\sqrt{1-K}} - \frac{1}{\sqrt{1+K}}$$

Comme le couplage est faible, on a :

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \simeq \left(1 + \frac{K}{2}\right) - \left(1 - \frac{K}{2}\right) \simeq K \simeq \frac{M}{L}$$

On peut donc remonter à $M = LK = L \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$.

On détaille ici un calcul de propagation d'incertitude :

- $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ donc $u(\omega_0) = \frac{\omega_0}{2} \sqrt{\Delta L^2/L^2 + \Delta C^2/C^2}$. On trouve $\omega_0 = (29.6 \pm 0.2) \cdot 10^3 \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

- $u(\Delta\omega)$ est déterminé en estimant l'erreur de lecture de l'oscilloscope sur la tension, puis en propageant l'incertitude sur la conversion via la courbe d'étalonnage. On trouve $\Delta\omega = 3305 \pm 4 \text{ s}^{-1}$.
- Enfin, $M = LK = L \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$ donc $u(M) = \sqrt{\left(\frac{L}{\omega_0} u(\Delta\omega)\right)^2 + \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} u(L)\right)^2 + \left(\frac{L\Delta\omega}{\omega_0^2} u(\omega_0)\right)^2}$. On trouve $M = (1,27 \pm 0,02)\text{mH}$. On vérifie à posteriori que le couplage était bien faible.

Nous avons pu déterminer le coefficient dit de mutuelle inductance, qui caractérise le flux dans une bobine provoqué par le champ magnétique créé par l'autre bobine.

↓ *Regardons maintenant quelques applications de l'induction.*

3 Application de l'induction

Le phénomène d'induction se trouve dans de nombreuses applications. Voici deux d'entre elles.

3.1 Transformateur

Le transformateur, très utilisé en électrotechnique, base son fonctionnement sur l'induction. Un noyau de fer canalise les lignes de champs de deux bobines. Il existe une relation entre les intensités circulant dans ces deux bobines, ainsi qu'entre les tensions à leurs bornes :

Vérification du rapport de transformation pour un transformateur



⊖ 10 min en préparation

Matériel : transformateur du commerce, 2 voltmètres

Expérience : On mesure la tension au secondaire pour différentes tensions envoyées au primaire. On trace l'une en fonction de l'autre : on obtient une droite de pente le rapport de transformation indiqué sur le transformateur.

On obtient la courbe figure 4, de pente $(110,75 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$. C'est le rapport que nous nous attendions à avoir (en regardant sur le transfo).

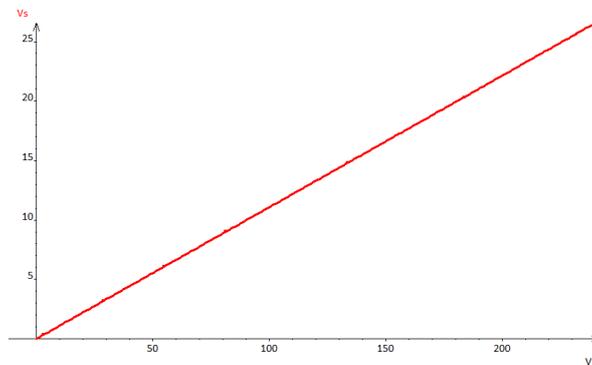


FIGURE 4 – Tension aux bornes du secondaire en fonction de la tension aux bornes du primaire.

3.2 Freinage par courants de Foucault

🔧 Garing Magnétisme pour la théorie

Manip d'ouverture, car pas très quantitative. On pourrait la rendre qualitative en connaissant la conductivité du cuivre et de l'aluminium utilisés ici.

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 :

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

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.

Conclusion

Dans ce montage nous nous sommes penchés sur la vérification de lois de l'induction, ainsi que sur la détermination de coefficients d'inductance. Nous avons pour cela exploité différents phénomènes : résonance d'un circuit, couplage inductif.

Questions et commentaires