

MP20 INDUCTION, AUTO-INDUCTION

19 janvier 2021

Clément Richard, Charlie Bouden & Pauline Thibault

Rapport de jury

- **2014 à 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. Par ailleurs, 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.
- **2010 à 2013** : La notion d'inductance mutuelle est souvent mal dégagée, par suite en particulier de mauvais choix dans les protocoles expérimentaux (composants utilisés, 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.
- **1999** : Il est préférable de ne pas s'attarder trop longtemps sur les expériences qualitatives préliminaires de mise en évidence du phénomène. En revanche, du temps peut être utilement consacré à effectuer des mesures soignées de l'impédance associée aux bobines. Il convient de rappeler que, pour les montages en pont (Maxwell, Sauter, ...), la sensibilité obtenue n'est optimale que si une réflexion préalable a été menée. N'importe quelle combinaison d'impédances ne répond évidemment pas de façon correcte au problème posé.
Jusqu'en 1998, le titre était : Auto-induction : tension, énergie. Caractérisations et mesures. Applications.
- **1998** : 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. Cette dernière peut révéler des surprises dès que la fréquence augmente quelque peu, alors qu'il n'en est évidemment pas de même du modèle. Les bobines sont évidemment utilisées dans des circuits électriques, RLC série, notamment. Il ne faut pas perdre de vue le titre du montage : toutes les propriétés des circuits utilisés n'ont pas forcément de rapport direct avec le sujet (largeur de la bande passante, notamment)

Bibliographie

Où ça parle d'induction (non exhaustif) :

⚡ Annales de cette MP :

- 2018 R dépend en ω^2
- 2017, rapport du jury

⚡ Quaranta III :

- *inductance* p226 : présente plusieurs modèles d'inductance pour des bobines cylindriques pas infiniment longues. Propose des montages pour mesurer les pertes (modèle BF : résistance en série avec une inductance) : RL série (dérivateur si on regarde u_L et $R \gg jL\omega$) ; circuit bouchon (mesure par résonance, plus précis que le précédent).

⚡ Quaranta IV :

- *auto-induction* p37 : Des manip qualitatives. Etude du régime transitoire (donne τ) ; vérification $u_L = L di/dt$; d'autres trucs...
- *bobines magnétiques* p52 : Mesure de L, r_L par mesure directe d'une impédance : $(\frac{U}{I})^2 = L^2\omega^2 + r_L^2$, faire à BF si on veut $r_L \simeq \text{cst}$; par résonance avec un RLC série.
- *fluxmètre* p189 : car fonctionne sur la loi de Faraday.
- *haut-parleur* p205 : fonctionne avec l'induction.
- *induction* p224 : Pas mal de manip qualitatives. Vérification de la loi de Faraday avec une dynamo. Freinage. Mesure d'un coeff d'inductance mutuelle (fait ici)...
- *laplace* p245 ...
- *galvanomètre, transducteur*...

⚡ BUP :

- 823 p725 : étude de la chute d'un aimant dans un tube en cuivre. Voir aussi le TP7 du poly électromagnétisme.
Duffait p16 bobines
Manip énergie duffait capes p 106
BUP : aimant x2 ...

Table des matières

1	Loi de Faraday	3
2	Mesure d'une auto-inductance L par résonance en courant d'un circuit RLC	6
3	Mesure d'un coefficient d'inductance mutuelle M	9

Introduction

Induction : création d'une fem dans un circuit en présence d'un champ magnétique lorsque le flux de celui-ci à travers le circuit est variable.

Il y a deux points de vue en fonction de ce qui varie : l'induction de Neumann (B variable, circuit fixe) et l'induction de Lorentz (B permanent, circuit mobile). Les deux sont résumés par la loi de Faraday $e = -\frac{d\phi}{dt}$.

☞ Manip qualitative : une bobine reliée à un oscillo et un aimant.

- Neumann : bouger l'aimant vers la bobine puis le ressortir. La fem change de signe car le flux augmente ou diminue.
- Lorentz : bouger la bobine vers l'aimant. Idem.

En fait les deux sont équivalents : ça revient simplement à changer de référentiel. On peut aussi ajouter :

- Faire bouger l'aimant plus vite et plus lentement : la fem est plus grande puis plus petite car liée à la variation du flux.
- Changer l'aimant de sens, la fem change de signe.

Dans ce montage, je vais garder le point de vue de Neumann. D'abord, je vais montrer que la loi de Faraday est vérifiée pour une bobine dans un champ magnétique variable. Puis je parlerais de l'auto-induction avec la mesure du coefficient d'auto-inductance d'une bobine. Enfin je parlerais de l'induction mutuelle entre deux circuits, lorsque l'un est parcouru par un courant et l'autre non.

1 Loi de Faraday

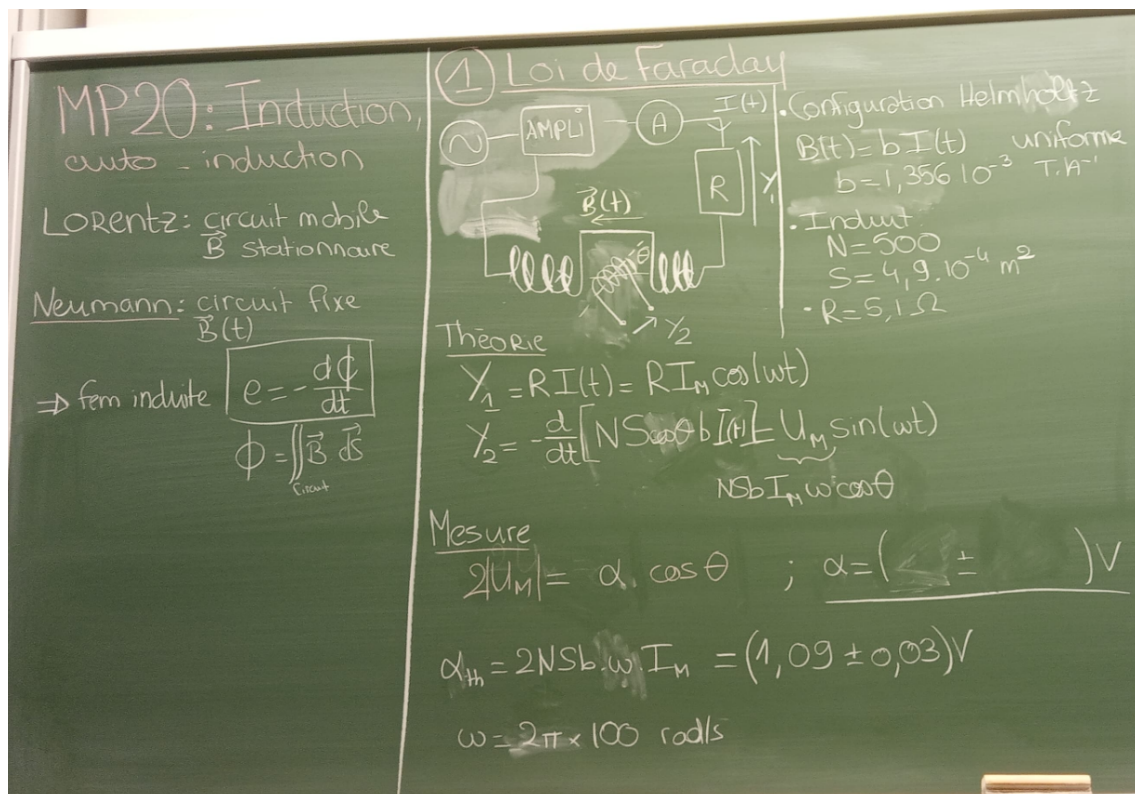


FIGURE 1

☛ Vérification de la loi de Faraday : variation de $B \cdot dS$ pour une bobine dans un champ B variable.

☞ Annales 2018, 2020, Notice du dispositif

☹ Si tout va bien, 15-20mn en préparation.

Matériel : Appareil P77.4 : deux bobines en configuration Helmholtz fixées (i.e. $d \simeq R$), une petite bobine entre les 2 dont on peut changer l'orientation.

- GBF
- Amplificateur de puissance P47.10 pour avoir suffisamment de courant dans les bobines et mesurer quelque chose ^a
- Rhéostat, on a mis $R \simeq 5,1 \Omega$ (à choisir pour pouvoir afficher la tension à ses bornes sur l'oscillo, $U = Ri$:)
- Ampèremètre, pour vérifier qu'il n'y ait pas trop de courant ni dans le rhéostat ni dans les bobines.
- Oscilloscope évidemment.

Principe : La bobine centrale est dans un champ magnétique (quasi) uniforme créé par les bobines en configuration Helmholtz. On va faire varier l'angle θ entre la normale à la surface de la bobine $d\vec{S}$ et $\vec{B}$: on fait donc varier le flux. Mais on va faire des mesures pour différents angles, donc il faut que le flux varie aussi temporellement à angle fixé : on crée un champ $\vec{B}$ variable en alimentant les bobines de Helmholtz en courant alternatif. On a donc une fem induite aux bornes de la bobine centrale.

^a. Ça peut plus ou moins marcher sans ampli mais ça demande au GBF de délivrer 20V et vu son bruit il n'a pas l'air d'aimer. En outre avec l'ampli on a plus de flexibilité.

Le champ magnétique est proportionnel au courant (voir notice. Cependant il peut être judicieux de **vérifier cette proportionnalité rapidement avec une sonde à effet Hall en préparation**, voir discussion sur les résultats en fin de partie).

$$B(t) = b \cdot I(t) \quad \text{avec} \quad b = 1,356 \cdot 10^{-3} \text{ T/A}$$

Le courant I est donné par la tension aux bornes de la résistance R en série des bobines, $I(t) = I_M \cos(\omega t)$. On alimente le GBF à environ 10Vpp (ampli multiplie par 4), à adapter en live pour avoir le même courant qu'en préparation lu à l'ampèremètre.

Remarque 1

Au début j'avais pris la tension aux bornes des bobines directement, mais je n'arrivais pas à montrer la quadrature de phase entre cette tension et la fem car la tension aux bornes des bobines n'est pas proportionnelle au courant...

La tension mesurée aux bornes de la bobine centrale est donc

$$e = U(t) = - \frac{d}{dt} \left[N S B \cos \theta \right] = - \frac{d}{dt} \left[N S b I_M \cos(\omega t) \cos \theta \right]$$

avec N le nombre de spires de la bobine, S la surface des spires et θ l'angle entre l'axe de la bobine et la direction du champs B .

Donc la fém mesurée est $U(t) = U_M \sin(\omega t)$ où $U_M = N S b I_M \omega \cos \theta$.

C'est cela que l'on veut vérifier.

- On montre d'abord que la fém est en **quadrature de phase** par rapport au courant généré par le GBF : sur l'oscillo en mode XY on a une ellipse horizontale, ou bien en mode normal on montre que les max de l'un sont aux zéros de l'autre. ! Attention : ça marche jusqu'à 100Hz environ, au-delà l'ellipse tourne et je ne sais pas trop pourquoi...

- Je mesure ensuite l'amplitude crête-à-crête aux bornes de la bobine centrale, i.e. $2|U_M|$, et l'angle θ . Je souhaite vérifier la relation linéaire

$$U_{pp} = 2|U_M| = \alpha \cos \theta.$$

Je me place à 100Hz pour avoir une amplitude correcte à mesurer¹. Je règle d'abord mon **origine des angles** en cherchant le minimum de signal en sortie et en définissant cet angle par 90°. Ensuite je prends des mesures de part et d'autre de 90° et je fais la **moyenne** $U_{pp} = \frac{U_{pp}(+\theta) + U_{pp}(-\theta)}{2}$ (par ex $U(85^\circ) + U(95^\circ)/2$) pour minimiser l'erreur sur l'origine. Je trace ensuite $U_{pp} = f(\cos(\theta))$ ²

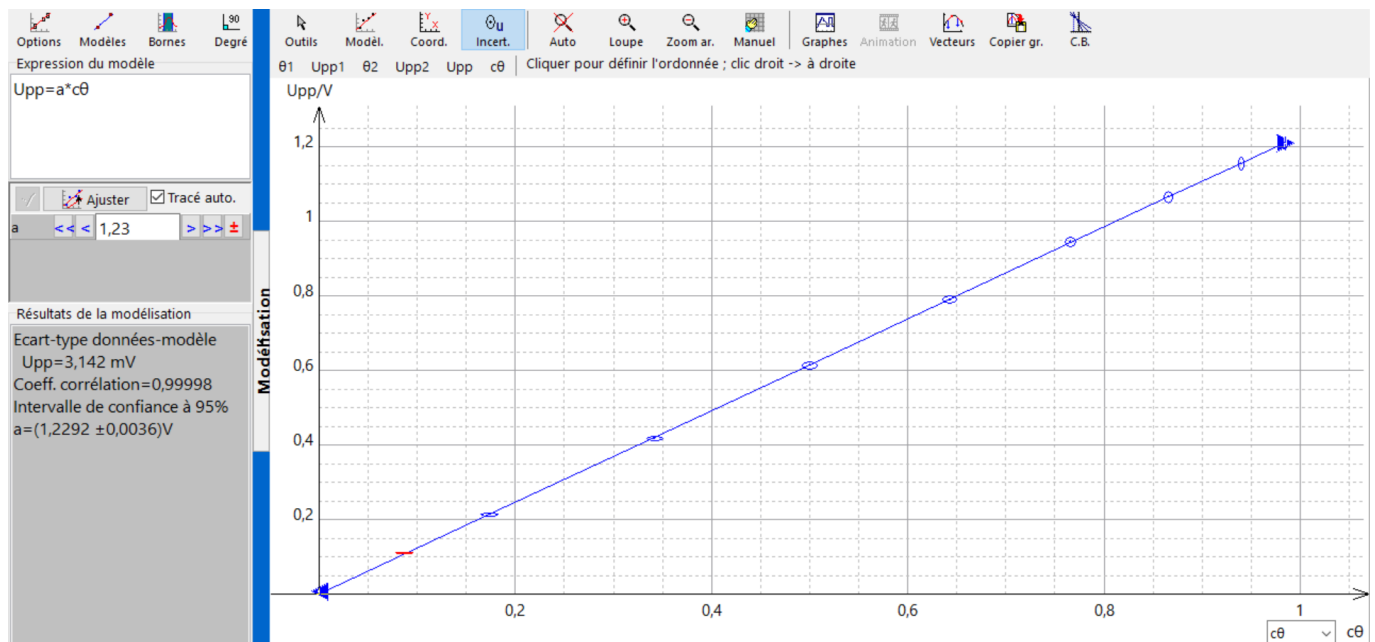


FIGURE 2 – $2|U_M| = \alpha \cos \theta$

La Figure 2 donne mes résultats, j'obtiens

$$\alpha = 1,229 \pm 0,004 \text{ V}$$

1. et au-delà j'ai des soucis en plus, cf remarque 1.
2. prendre les θ de 0 à 90!

La notice du dispositif et la mesure du courant avec l'ampèremètre³ me permettent d'avoir la valeur attendue du coefficient de proportionnalité $\alpha_{\text{att}} = 2NSb\sqrt{2}I_{\text{eff}}$.

$$N = 500 \quad (1)$$

$$S = \left(\frac{25\text{mm}}{2}\right)^2 = 4,9 \times 10^{-4} \text{m}^2 \quad (2)$$

$$b = 1,356 \times 10^{-3} \text{TA}^{-1} \quad (3)$$

$$\omega = 2\pi \cdot 100 \text{rad s}^{-1} \quad (4)$$

$$I_{\text{eff}} = 1,84 \pm 0,05 \text{A} \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{att}} = 1,09 \pm 0,03 \text{V} \quad (6)$$

Incertitudes : $\theta : \pm 0,5^\circ$; $U_{\text{pp}} : \pm 2\%$ (ordre de grandeur des incertitudes sur l'oscillo, car mes valeurs étaient stables).

Conclusion : La loi linéaire est validée et la quadrature de phase aussi donc la loi de Faraday est vérifiée. Cependant la pente expérimentale est plus élevée que la pente attendue. Cela peut être dû aux valeurs des paramètres donnés dans la notice, notamment le diamètre moyen de la bobine (donne S) et le coefficient b . On pourrait déjà vérifier avec une sonde à effet Hall la valeur de b . Peut-être que la bobine n'est pas vraiment au centre...

Remarque 2

– Ampli : pour input de $\pm 10\text{V}$, gain de $\times 4$. Pour les différents boutons regarder la notice. En SLOW mode, met un courant limite positif/négatif. C'est un ampli "quatre quadrans" et le mode sensing que l'on voit en sorti est l'équivalent du montage 4 fils pour les résistances. Les correcteurs ont dit de faire attention à ce qu'il n'y ait pas de tension d'offset pour ne pas fausser les mesures.

– Mesure du courant : avec l'ampèremètre ou la tension aux bornes de la résistance, ça donne à peu près pareil. Mais attention ça varie assez.

– Y a t'il du courant dans ma bobine centrale? On a une fem et la bobine est branchée à l'oscillo de résistance $R = 1\text{M}\Omega$. La notice indique de plus que la bobine a une résistance interne de $r = 4\Omega$. Une loi des mailles donne $e = ri + Ri$. Comme R est très grand, on peut approximer $i \simeq e/R$. Ce courant crée un flux propre dans la bobine donc la tension mesurée par l'oscillo aux bornes de la bobine est $e_{\text{tot}} = e - L \frac{di}{dt} = e - \frac{L}{R} \frac{de}{dt}$. Or $L \simeq 10\text{mH}$ (notice ou RLC mètre) et $e(t) \simeq \frac{dI}{dt}$, I le courant des bobines de Helmholtz. Donc finalement on mesure $e_{\text{tot}} \simeq j\omega I - \frac{L\omega^2}{R} I$. La composante en ω est bien celle de la loi de Faraday, déphasée de $\pi/2$ et proportionnelle à la pulsation. Mais avec un faible courant et par auto induction on a un terme qui est peut-être responsable du déphasage à haute fréquence et de la non proportionnalité de e et i avec la fréquence. Ceci dit pour que ce terme soit non négligeable il faut $\frac{L\omega}{R} \gg 1$ soit $\omega \gg 10^8 \text{rad/s}$ ce qui est bien au dessus des pulsations observées (vers 100Hz) ... Donc ce n'est qu'une piste.

↓ Application ?

3. voir remarque 2

2 Mesure d'une auto-inductance L par résonance en courant d'un circuit RLC

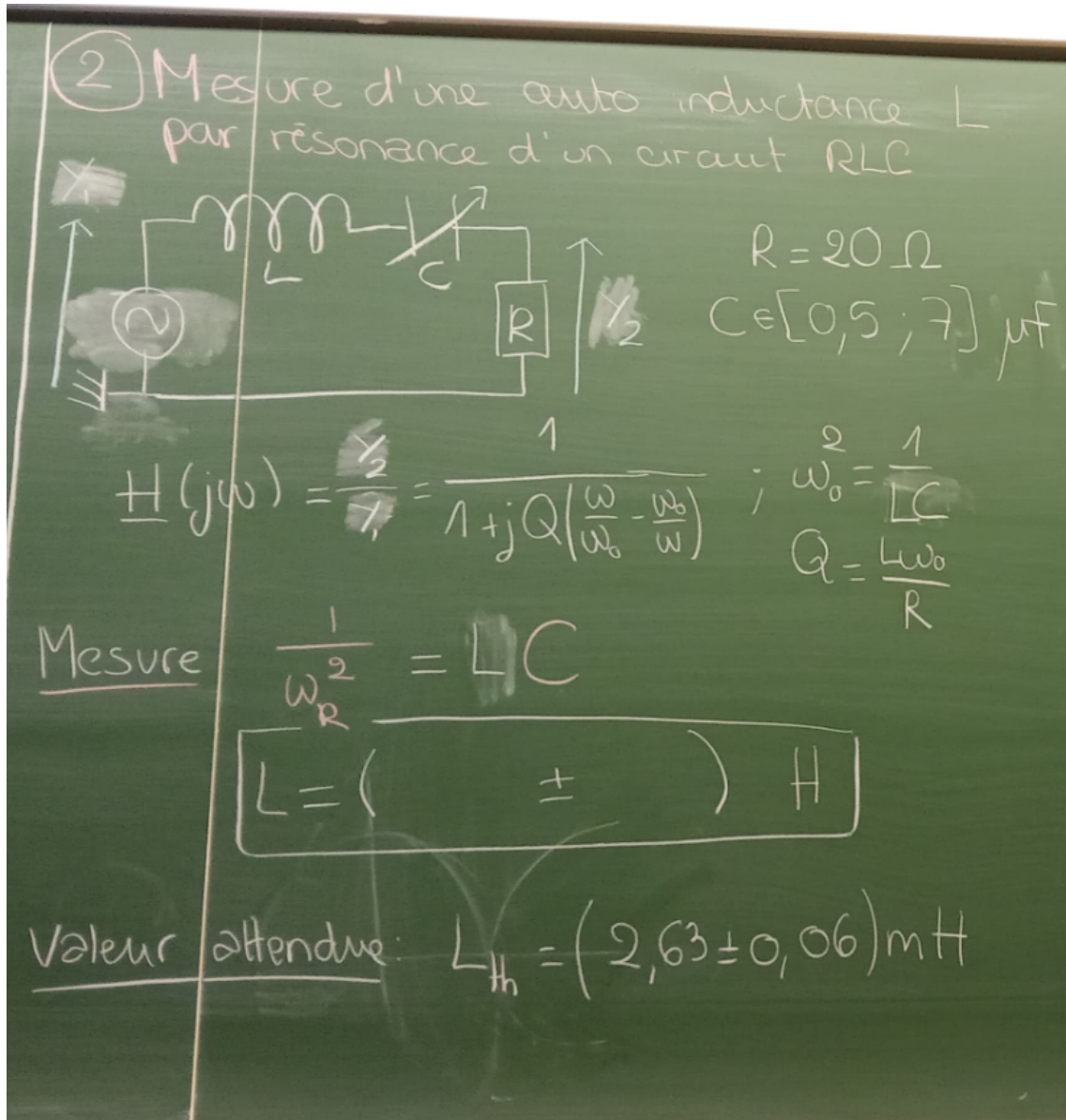


FIGURE 3 – Schéma du montage.

Auto-induction, késako ? Une bobine parcourue par un courant crée un champ magnétique donc un flux non nul à travers elle-même. Si le courant est variable, le champ l'est aussi ainsi que son flux. Qui dit flux variable dit fem par induction : c'est l'auto induction. Alors

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

pour une bobine, L est un paramètre géométrique.

☕ Circuit RLC série

📌 Annale 2020

☹ Un peu plus long... 45mn ?

Matériel :

- GBF et oscillo
- Bobine de l'ordre du mH
- Boite de capacité

- Résistance de 20Ω
- RLC-mètre

On fait un circuit RLC, on regarde la tension $Y1$ du GBF et la tension $Y2$ de la résistance, attention à la masse pour l'oscillo (on fait un "circuit LCR" en fait). On a la fonction de transfert :

$$\underline{H}(\omega) = \frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

avec $\omega_0 = \frac{1}{LC}$ la pulsation propre et $Q = \frac{L\omega_0}{R}$ le facteur de qualité.

Pour obtenir l'inductance propre de la bobine, je trace $\omega_0^{-2} = f(C)$ comme le montre la 4.

Je repère la résonance par la méthode de Lissajoux (avoir une droite au lieu d'une ellipse) et je fais varier la capacité, que je mesure à chaque fois au RLC mètre.

Remarque du jury : du coup écrire explicitement l'expression de la phase de la fonction de transfert :

$$\phi(\omega) = -\arctan Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$$

Donc à la résonance la phase est nulle.

La valeur attendue de l'inductance propre de la bobine est $L_{att} = 2,63 \pm 0,06$ mH, mesurée au RLC-mètre (valeur indiquée sur la bobine : $2,60$ mH. On mesure $2,68 \pm 0,02$ mH, nice.

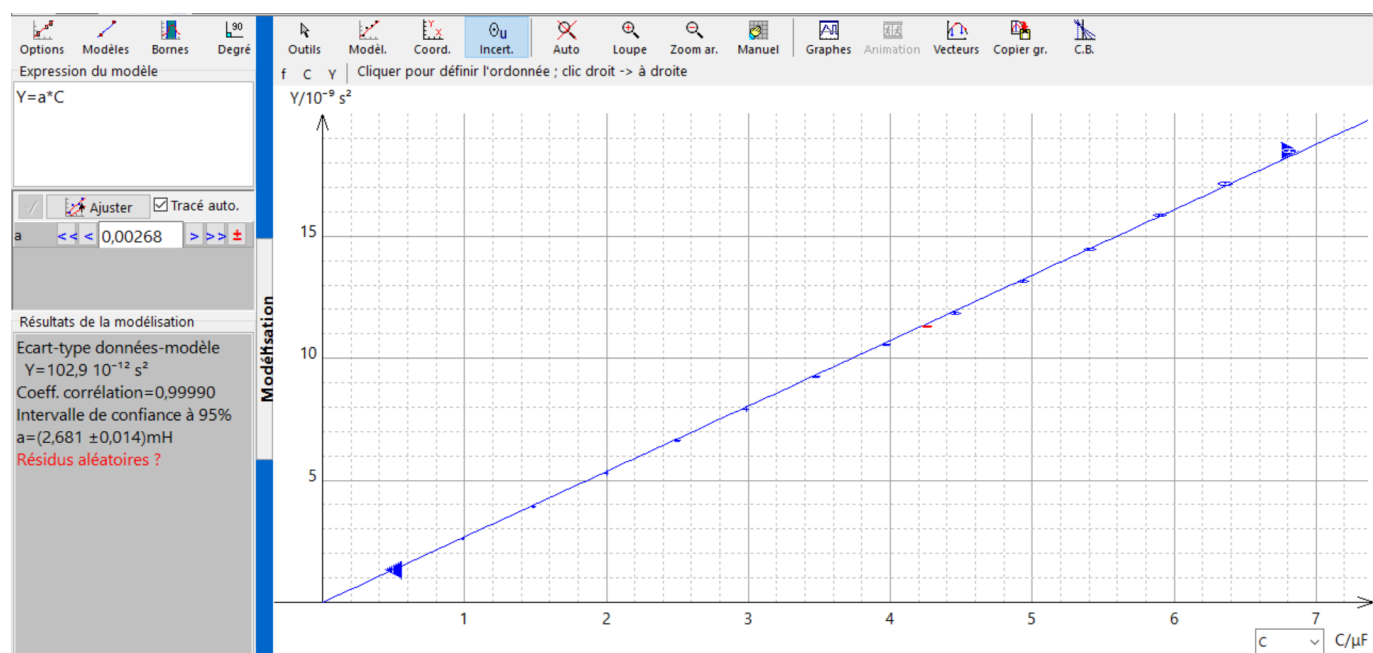
Commentaires sur le choix des composants :

- Bobine : si L est trop petit on va travailler avec des grandes fréquences, le mH c'est pas mal avec la boîte de capa qu'on a, on travaille jusqu'à $5kHz$.
- Résistance : n'intervient pas dans la pulsation de résonance mais on veut le facteur de qualité le plus grand possible, donc R le plus petit possible. On peut faire le test : à 100Ω on est moins précis d'un digit sur le repérage de la résonance qu'à 20Ω . Mais à 10Ω bouger un peu le circuit fait des trucs bizarres sur l'oscillo... Maintenant d'après les anciens rapports, il faut être conscient que dans la résistance totale du circuit il faut aussi prendre en compte celle du GBF, de 50Ω . Remarque : annale 2016 dit qu'on peut utiliser un AO en suiveur pour s'affranchir de l'impédance du GBF.
- Capacité : $C \in [0,5; 7] \mu F$ parce que ... pratique. Pour les grandes capacité (pas montré en live; donc à basses fréquences) on voyait que ce n'était plus linéaire, mais on ne sait pas trop pourquoi. A haute fréquence un écart au comportement linéaire pourrait s'expliquer par le comportement capacitif de la bobine, mais à BF... ? Après pour les hautes capacités le coefficient de qualité est plus petit donc peut-être que ça vient de ça... Un correcteur a dit d'essayer de regarder en mode Normale (pas XY), je sais pas si ça aiderait perso.

Incertitudes : Sur la pulsation, voir votre précision, on peut aller au Hertz. Pour la capacité, notice.

Remarque 3

fonctionnement RLC mètre

FIGURE 4 – $\omega_0^{-2} = L \cdot C$.

↓ Et donc quand on a deux bobines...

3 Mesure d'un coefficient d'inductance mutuelle M

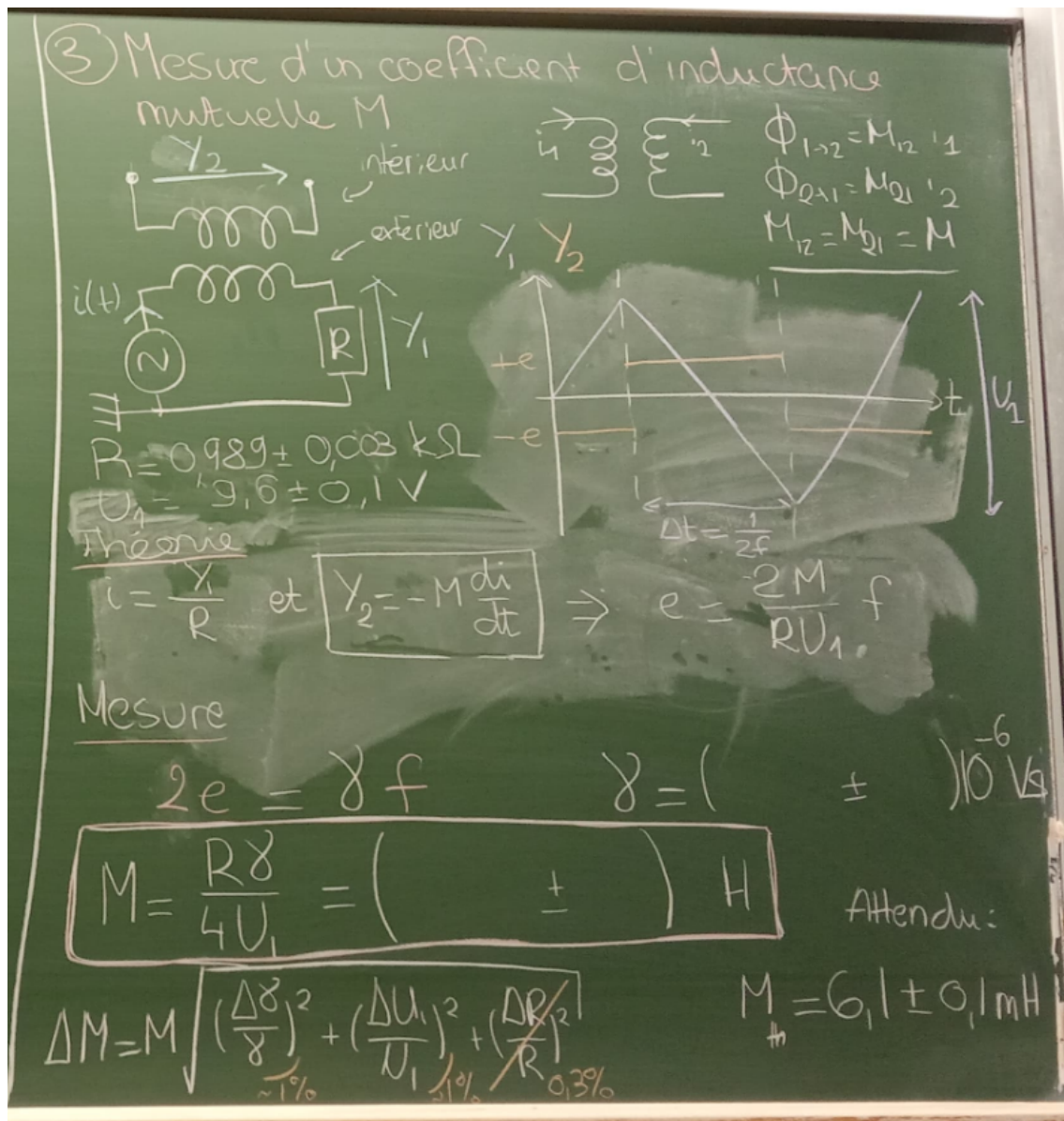


FIGURE 5 – Schéma du montage. Erreur : pas $e = \frac{2M}{RU_1} f$ mais $e = \frac{2MU_1}{R} f$.

C'est lorsque deux circuits sont proches. Ici, on a deux bobines imbriquées : l'une d'elle est parcourue par un courant variable $i(t)$ et donc crée un champ magnétique variable dont le flux dans la seconde bobine est nul et variable, cette seconde bobine est donc sujette à l'induction. Le flux magnétique qui passe dans la deuxième bobine s'écrit $\phi = Mi$ avec M l'inductance mutuelle des deux bobines et i le courant dans la première bobine. Je cherche donc à mesurer M . On mesure la fem à ses bornes, alors

$$e = -M \frac{di}{dt}$$

☛ M pour deux bobines imbriquées

📖 Annales 2017, 2020, Quaranta IV p277

⌚ 30mn ?

Matériel :

- Bobines P59.4
- GBF et oscillo
- plaquette

– résistance de $1k\Omega$

Principe : On veut envoyer un courant triangulaire dans la bobine extérieure (1), alors on aura e carrée aux bornes de la bobine intérieure (2). Alors $e = -M \frac{di}{dt} = -M \frac{du_R/R}{dt}$ et en amplitude $e = \frac{2MU_1}{R} f$ (voir schéma Figure 5).

Pour avoir un courant triangulaire, on place une résistance en série assez grande de façon à ce que le courant soit proportionnel à la tension u_{GBF} envoyée par le GBF $u_{GBF} = L_1 \frac{di}{dt} + Ri \simeq Ri$ si R assez grande. Faire des tests à l'oscillo en regardant la tension aux bornes de la résistance. Cela conditionne aussi la plage de fréquence sur laquelle on va pouvoir faire l'étude, nous on a fait varier de 50Hz à 200Hz environ.

On mesure en crête-crête donc on rajoute un facteur 2 ($2e$).

On trace $2e = \gamma \cdot f$.

Remarque 4

- Pour le signal carré, on peut utiliser la fonction Moyennage de l'oscillo. Et on mesure en Amplitude, pas en Crête à crête, car ce dernier prend le max et le min (donc si y'a du bruit...) tandis que le premier prend la valeur qui est 'répétée'.
- Vérifier que U_1 (tension aux bornes de la résistance) est constant sur la plage de fréquence étudiée :)

Incertitudes :

- sur e : avec le moyennage, prendre en compte le bruit ? ou bien les $\simeq 2\%$ de l'oscillo...
- incertitude sur la résistance négligeable, mais la mesurer à l'ohmmètre
- pour U_1 on peut faire à l'oscillo ou au voltmètre, on a à peu près le même résultat mais attention pour un signal triangle, le voltmètre donne la valeur efficace/RMS, donc pour avoir U_1 il faut multiplier par $2\sqrt{3}$ (facteur 2 car on regarde l'amplitude totale)
- L'inductance mutuelle se calcule par la formule suivante, on néglige l'incertitude sur R (voir valeurs sur le tableau Figure 5) :

$$M = \frac{R\gamma}{4U_1}, \quad (7)$$

$$\Delta M = M \sqrt{\left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_1}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}, \quad (8)$$

$$M = 6,07 \pm 0,07 \text{ mH}. \quad (9)$$

La mesure attendue, donnée par la "notice" des bobines, est $M_{att} = 6,1 \pm 0,1 \text{ mH}$, nice.

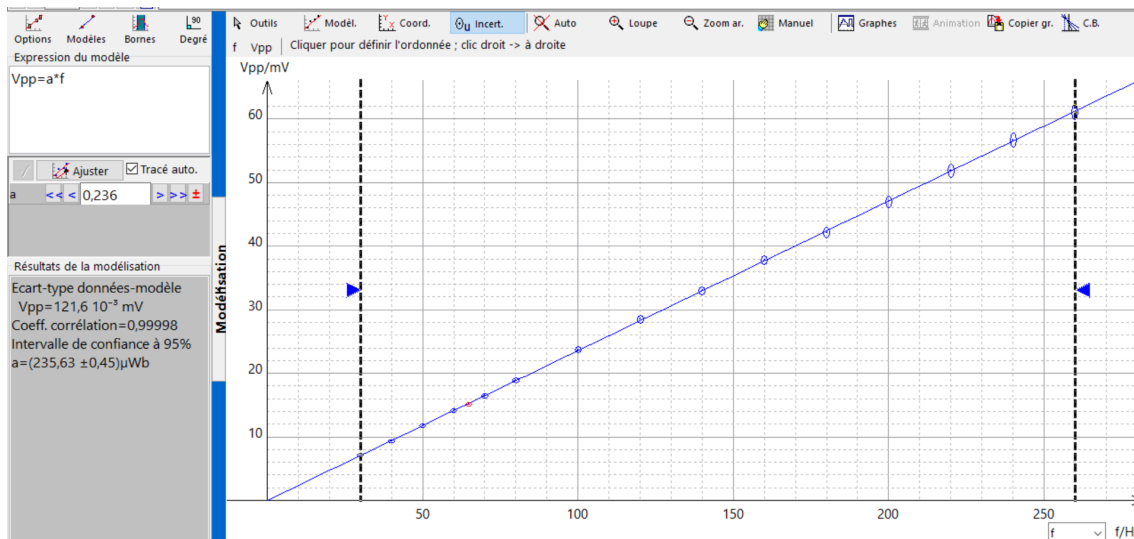


FIGURE 6 – $2e = \gamma \cdot f$.

Conclusion

Ces différentes expériences ont permis de mettre en évidence le phénomène d'induction, qui repose sur la loi de Faraday vérifiée en première partie. On a pu vérifier la valeur de l'autoinductance d'une bobine, qui est un paramètre

important puisque l'on est souvent amené à utiliser des bobines, dans les filtres passifs notamment. L'induction mutuelle est aussi importante puisqu'elle est à la base du principe des transformateurs par exemple. Enfin une autre manifestation de l'induction est le freinage par courants de Foucault, qui est utilisé pour freiner des trains par exemple, mais qui n'est pas exprimable analytiquement en général, donc dur dur de faire une manip quantitative dessus (de mon point de vue, dans le sens : vérifier une loi).

Questions

- **Pour la manip qualitative : qu'est-ce qui est mis en évidence pour le lien entre Neumann et Lorentz ?** Equivalents, juste un changement de référentiel.
- I.
- **Que veut dire en configuration Helmholtz ?** Distance entre les bobines égale au rayon. **Et tu as dit que B est uniforme, c'est vrai ? Comment le montrer ?** Pas rigoureusement, mais pour une zone proche du centre oui. On pourrait le vérifier avec une sonde à effet Hall **Oui, connaître son principe de fonctionnement.**
- **Pour les manips avec les électroaimants, on fait les mesures à courant croissant, est-ce nécessaire ici ?** On n'a pas d'hystérésis car pas de noyau ferro ou de carcasse ou quoi, juste de l'air entre les bobines donc pas besoin.
- **La résistance R est utile pour quoi ?** C'était pour avoir une tension proportionnelle au courant, mais la valeur osef.
- **Comment expliquer l'erreur sur α (14%) ?** - euh... ; S donnée en moyenne sur la notice ? champ B donné par la notice ? orientation des bobines, vient ptete d'une mauvaise hauteur de la bobine dans l'entrebobine...
- *Bonne idée cette manip on voit rarement le fait de modifier l'angle.*
- **Sur quels paramètres on peut jouer pour faire varier l'amplitude de la fem ?** Fréquence, courant... **ampli ?** Ah non gain constant pour celui-ci.
- *Pour les incert, dire qu'on préfère majorer l'incert constructeur (cf oscillo)*
- **Y a t'il un courant qui parcourt la bobine ?** Je ne pense pas à cause de l'impédance de l'oscillo. **Vérifier que la résistance interne de la bobine ne crée pas une tension suffisante dans le cas où un courant parcourerait (voir impédance de l'oscillo) sinon risque de mal régler le zéro de tension (pourrait s'opposer à la fem)**
- II :
- **Pourquoi le flux s'écrit $L.I$? Pourquoi le flux doit être proportionnel au courant ?** Equation Maxwell Ampere linéaire et l'intégrale pour le flux aussi. L donne les termes géométriques issus de l'intégration.
- **La résonance du RLC dont tu parles c'est la résonance en quoi ?** En courant. Aux bornes de C ou L ça serait plutôt en tension. Ici u_R est proportionnel au courant donc on utilise ce terme. Note supplémentaire : la résonance en courant ne dépend pas de Q, mais la résonance aux bornes de C oui. *c'est ça charlie ? c'est si on calcule la pulsation on voit que ça dépend de paramètres dont dépend aussi Q ? enfin en fait je trouve que ça n'a pas de sens de dire ça comme ça mdr*
- **C'est quoi le déphasage ?** Penser à l'écrire au tableau vu que tu fais en Lissajoux.
- **Pourquoi l'ellipse devient une droite ?** C'est comme la polarisation, X et Y sont proportionnels : droite.
- *Ne pas écrire $L_{théorique}$!!! Mais "attendu"*
- *Modèle affine vs linéaire : y'a les deux écoles... Là il préférerait qu'on fasse affine et qu'on vérifie bien que l'ordonnée à l'origine est nulle comme attendu. On peut ensuite faire une linéaire pour calculer la pente éventuellement.*
- **Pour la mesure de capacité au RLC-mètre, quelle différence selon la fréquence ?** Voir fonctionnement du RLC-metre... En général les boîtes à capa ont des bonnes mais problème à haute capacité, c'est l'inverse pour les boîtes à décade (apparemment les connectiques se dégradent, rouillent par ex, ce qui ajoute une résistance qui n'est plus négligeable à basse résistance. Typiquement pour une valeur affichée de 10Ω on mesure 15Ω). La fréquence skip a peu d'influence pour mesurer une capa, mais pour une L peut être plus chiant.
- III.

- **A quoi on pourrait comparer la valeur de M ?** Aux L de chaque bobine (11,5mH)
- **Il y a une relation entre M et L_1, L_2 ?** $M < L_{12} + L_{22}$? avec cons énergie $L I^2, M I_1 I_2 \dots$ polynome en $i_1/i_2 \dots$ a faire
- **Signe de M ?** Pas fixé, peut être positif ou négatif selon le sens de i .
- **Quelle est la diff entre I et III ?** Pour la III on regarde vraiment l'inductance mutuelle, pour la I en fait les bobines de Helmholtz ne sont là que pour créer le champ B , on aurait pu tout aussi bien faire autrement, ce n'est pas les bobines qui nous intéressent ici. Maintenant on a quand même l'inductance mutuelle, qui est inconnue mais que l'on calcule.
- En + :
- **Comment fonctionne une sonde à effet Hall ?**
- **Exemple où y'a freinage par courants de Foucault ?** Train, tram de Lyon. Sinon, la chute d'un aimant dans un tube en cuivre, machine vue en electrotech, pendule avec aimant et plaque d'aluminium (y'en a en réserve)...



Montage "surprise !" : On a un diapason, micro, oscillo. Quel est le facteur de qualité du diapason ?

– Régime pseudo-périodique -> Q environ nombre d'oscillations mais y'en a troooooop. Plutôt : $Q = \omega_0/2\sigma$ et σ (facteur d'amortissement) mesuré grâce à la décroissance exponentielle de l'enveloppe, décrétement logarithmique. Prendre deux valeur A_1 et A_2 séparée de Δt . On a l'enveloppe $A_i \propto \exp(-\lambda t_i)$ donc $\ln \frac{A_1}{A_2} = -\lambda \Delta t$ puis $\lambda = 1/\sigma$. C'est l'idée en tout cas.