LP00 – Titre

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

✍ *Electromagnétisme MP/PC/PSI*, **Brébec, Hpépa** ⟶
✍ *Physique tout-en-un MPSI/PTSI*, **Sanz, Dunod** ⟶
✍ *Electromagnétisme 2*, **BFR** ⟶
✍ *Cours de Jéremy Ferrand et cours de Jéremy Neveu(Montrouge)* ⟶

Prérequis

➢ ARQS

➢

Expériences

☕ Biréfringence du quartz

Table des matières

1 Le phénomène d'induction **3**
1.1 Cadre de l'étude . . . 3
1.2 Modélisation électrocinétique . . . 3
1.3 Loi de Faraday . . . 5

2 Couplage électromagnétique **5**
2.1 Auto-inductance . . . 5
2.2 Application : transformateur . . . 7

3 Courants de Foucault **9**
3.1 Principe . . . 9
3.2 Chauffage par induction . . . 10
3.3 Freinage par induction . . . 10

Jury

L'algébrisation rigoureuse des grandeurs électriques et mécaniques est nécessaire lors de la paramétrisation. Dans cette leçon, le plus grand soin s'impose dans la définition des orientations et des conventions de signe. Les applications doivent occuper une place significative dans la présentation. Il n'est pas admissible à ce niveau de confondre les forces de Lorentz et de Laplace. Dans cette leçon, le plus grand soin dans la définition des orientations et des conventions de signe s'impose. Les applications doivent occuper une place significative dans la présentation. Il n'est pas nécessaire de traiter en détail les deux types d'induction.

Choix

- L1 : admettre les lois de l'induction. L2 : les démontrer avec Maxwell en ARQS.
- Neumann ou Lorentz, ou les deux.
- Induction propre, mutuelle (bof ?)
- Applications : courant de foucault (freinage/chauffage), transformateurs, pince ampèremétrique
- Couplage électromécanique (il faut la force de Laplace) : rails de laplace, roue de Barlow, haut-parleur
- Calcul de courant de foucault ou pas calcul ?

Préparation

Préparation : bétonner les convention (transfo...)

Passage : Il faut être super clair sur les schémas, orientations (main droite).

Questions : démo loi de faraday pour induction de Lorentz (cf. ma fiche avec les démos), pince ampèremétrique, jauge, Réalité physique de A et V ? Et en MQ ? (Aharonov-Bohm, p est modifié en p-qA), épaisseur de peau, comment traiter un problème d'induction si on est hors des cas simples de Neumann et Lorentz (dérivée particulaire), lien force laplace-lorentz (cf. ma fiche), deux voltmètres branchés au mêmes points d'un circuit peuvent-ils mesurer des valeurs différentes ? Oui, en présence d'un champ magnétique variable, l'induction fait que la différence de potentiel, définie par l'intégrale de E sur un chemin, dépend du chemin (cf. cours Jérémy Neveu)

Introduction

Loi de l'induction Dans les quatre équations de Maxwell, on a vu à travers l'équation de Maxwell-Ampère qu'un courant crée un champ magnétique. Inversement, la loi de Maxwell-Faraday indique qu'une variation de champ magnétique conduit à l'apparition d'un champ électrique. Dans le cadre de l'électrocinétique, cela se traduit par l'apparition d'une différence de potentiel, ce qui peut alors permettre la circulation d'un courant.

Mise en évidence de l'induction
Matériel : une bobine, un aimant, un oscillo en mode single (ou une LED).

Présentation On montre la vidéo : https://youtu.be/zRmfNvTzIhk?t=104. On dispose d'une bobine, d'un ampèremètre à aiguille et d'un aimant au bout d'un bateau. Lorsqu'on approche l'aimant, on note l'apparition d'un courant traduit une fem aux bornes de la bobine. Le signe change lorsqu'on éloigne l'aimant. Si l'aimant est immboile, on n'observe pas de courant.

C'est donc la variation du flux magnétique qui compte.

Il se passe la même chose si l'aimant est immobile et que la bobine bouge.

Ce phénomène a été découvert par Michel Faraday en 1831. Il est à la base de nombreux objets de notre quotidien : production et conversion de l'électricité, chargeurs de téléphone, microphones, plaques à induction, freinage des trains...

Problématique Comment formaliser ce phénomène avec le cadre de l'électromagnétisme à notre disposition (équations de Maxwell, approximation des régimes quasi-stationnaires) ? Applications : transformateurs, chauffage par induction, freinage par induction. On va se restreindre à l'induction de Neumann.

1 Le phénomène d'induction

1.1 Cadre de l'étude

ARQS Dans cette leçon, on va se placer dans le cadre du régime de l'ARQS magnétique : les temps de propagation τ sont négligés devant les temps caractéristiques de variations des champs $T = 1/f$. Pour des systèmes de taille $L \sim 1\text{m}$, on considère donc des fréquences $f \ll 1/\tau = c/L \sim 100\text{MHz}$. *Plus précisément, les temps de propagation sont négligés devant les temps caractéristiques de variations des champs, les courants j sont prépondérants devant ρc et il n'y a pas d'accumulation de charges.*

Conséquences de l'ARQS Dans ce régime, l'électroneutralité du métal est assurée et donc l'équation de conservation de la charge donne $\nabla \vec{j} = 0$ (c'est la loi des noeuds) et la loi d'Ohm locale s'écrit $\vec{j} = \sigma_0 \vec{E}$ où σ_0 est la conductivité du métal (relation constitutive pour fermer les équations de Maxwell). **ODG:** $\sigma_0 \sim 6 \cdot 10^7 S/m$ pour le cuivre.

Induction de Neumann Dans le référentiel galiléen R, lié au laboratoire, on considère la situation où le champ électromagnétique peut être variable, comme dans l'expérience introductive, mais les conducteurs sont fixes. Cette situation s'appelle induction de Neumann. Le cas où le conducteur est en mouvement dans un champ fixe s'appelle induction de Lorentz. En fait, l'induction de Lorentz se ramène à l'induction de Neumann par changement de référentiel (éventuellement non galiléen). *Et l'inverse ? Hm, on ne peut (pas ?) produire n'importe quel champ magnétique à partir d'un champ constant en changeant de référentiel ?*

On a posé le cadre de l'étude. D'où vient la différence de potentiel mesurée en expérience introductive ? Comment le comprendre dans le cadre de l'électrocinétique ?

1.2 Modélisation électrocinétique

Champ électromoteur La structure des équations de Maxwell donne que le champ électrique peut s'écrire de la façon suivante :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{1}$$

avec $\vec{A}$ le potentiel vecteur. En fait, la loi de Maxwell-Faraday est caché dans cette formulation de $\vec{E}$. On définit alors le champ électromoteur $\vec{E}_m$

$$\vec{E}_m = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{2}$$

Physiquement, on va voir que ce champ peut être associé à un mouvement de charges.

Circuit électrique équivalent

La loi d'Ohm locale s'écrit alors :

$$\vec{j} = \sigma_0(-\vec{\nabla}V + \vec{E}_m) \tag{3}$$

Établissons maintenant la loi d'Ohm dans un conducteur filiforme. On considère une portion de fil AB de section S. On montre le schéma de JN. Dans l'ARQS métallique/magnétique, on a $\vec{\nabla}\cdot\vec{j} = 0$ donc dans ce cas filiforme unidimensionnel, j est uniforme et ne dépend que du temps. Pour un fil AB de section S, on définit le courant électrique par $i(t) = \int_\Sigma \vec{j}(t)\mathrm{d}\vec{S}$ où Σ est une section du cylindre. En fait, $i(t)$ ne dépend pas du choix de Σ car $\vec{\nabla}\cdot\vec{j} = 0$. On va prendre Σ normal au cylindre et donc $i_{A\to B} = jS$. Intégrons la loi d'Ohm locale selon $\mathrm{d}\vec{l}$:

$$\int_A^B \vec{j}\cdot\mathrm{d}\vec{l} = \sigma_0\int_A^B(-\vec{\boldsymbol{\nabla}}V)\cdot\mathrm{d}\vec{l} + \sigma_0\int_A^B\left(-\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right)\cdot\mathrm{d}\vec{l}$$

Or

$$\int_A^B \vec{j}\cdot\mathrm{d}\vec{l} = j(t)L = i_{A\to B}L/S$$

. D'où

$$i_{A\to B}\frac{L}{S\sigma_0} = V_A - V_B + \int_A^B\left(-\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right)\cdot\mathrm{d}\vec{l} \tag{4}$$

On définit la résistance du tronçon AB par :

$$R_{AB} = \frac{L}{S\sigma_0} \tag{5}$$

et la force électromotrice par :

$$e_{AB} = \int_A^B -\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\vec{l} \tag{6}$$

La loi d'Ohm intégrée est donc :

$$V_A - V_B = R_{AB}i_{A\to B} - e_{AB} \tag{7}$$

On peut alors proposer le circuit électrocinétique équivalent. On montre le schéma

Convention de signes. Lorsque l'on oriente le chemin d'intégration le long du conducteur, on fixe l'orientation de e et i qui sont alors dans le même sens, forcé par le choix commun de $\vec{dl}$ dans l'établissement de la loi d'Ohm. En effet, l'intégration permettant d'obtenir i définit un élément de surface $\mathrm{d}\vec{S}$ dans la section du fil, et l'intégration permettant d'obtenir e définit un élément de longueur $\vec{dl}$. Le produit $\vec{dl}\cdot\vec{S}$ définissant un élément de volume il est nécessairement positif.

Donc e et i doivent être orientés dans le même sens sur les schémas électriques, les calculs donneront leurs véritables signes.

Cas d'un circuit fermé Pour un circuit fermé, on a $A = B$, donc on obtient simplement $e = Ri$, en faisant le schéma ! On constate que le terme moteur est celui venant du champ électromoteur alors que le terme issu du potentiel électrostatique est nul. *C'est assez inhabituel d'intégrer sur un contour est d'avoir une intégrale non nulle : cela traduit le fait que la circulation de $\vec{E}$ est non conservative.*

Comment relier la force électromotrice au champ magnétique ?

$\downarrow$

1.3 Loi de Faraday

Hypothèses On calcule la force électromotrice pour un circuit filiforme fermé, rigide et immobile (pas de contact glissant) On fait un schéma d'une boucle, en indiquant le sens de $\vec{dl}$, $\vec{S}$, ce qui oriente le courant et la surface].

Calcul
$$e = \oint \vec{E}_m \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \oint -\partial_t \vec{A} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \iint_\Sigma -\partial_t \vec{B} \cdot d\vec{S} = -\partial_t \left(\iint_\Sigma \vec{B} \cdot d\vec{S} \right) = -\partial_t \phi$$
en utilisant le théorème de Stokes et où ϕ est le flux du champ magnétique à travers la surface Σ.

Retour sur l'expérience introductive On comprend l'origine du courant induit et de la fém dans l'expérience introductive. La bobine est bouclée sur elle-même pour augmenter la surface effective du circuit, qui est traversée par le champ de l'aimant. Lorsque l'aimant d'approche, $\vec{B}$ varie dans la surface considérée, donc ϕ varie donc une force électromotrice e non nulle apparaît et donc un courant induit apparaît. Si on fait le mouvement inverse, cela revient à rembobiner le temps $t \to -t$ et donc e change de signe.

Loi de Lenz La présence du moins dans l'expression de la force électromotrice souligne une propriété importante des phénomènes d'induction appelée aussi loi de Lenz. Les phénomènes d'induction ont tendance, par leurs effets, à s'opposer aux causes qui leur ont donné naissance : c'est une loi de modération. On vérifie sur le schéma que le sens du courant induit i_1 crée un champ induit $\vec{B}_1$ opposé au champ initial. *Attention, ce n'est pas toujours le cas, lorsque le circuit est mis en mouvement par un agent externe (instabilité dynamo, déphasage mécanique géométrique), ou lorsqu'il y a un élément déphasant dans le circuit comme une capacité.*

Bonus : généralisation au circuit rigide en mouvement Dans le cas où le circuit rigide serait en mouvement à vitesse uniforme $\vec{v}$, la loi de Faraday se généralise en remplaçant la dérivée temporelle par une dérivée particulaire.

Bonus : limites de validité de la loi de Faraday La formule $e = -\mathrm{d}\phi_c/\mathrm{d}t$ n'est valable pour un circuit filiforme défini à chaque instant et si ϕ_c est le flux "coupé" par le circuit. Elle ne s'applique pas à la roue de Barlow où le circuit n'est pas filiforme et on mesure $e \neq= 0$ mais $\psi = cste$. Elle ne s'applique pas à une bobine qu'on déroule où on mesure $e = 0$ même si ϕ varie car N varie. En effet, ϕ_c ne varie pas car la modification du circuit ne fait pas couper des lignes de champs.

$\downarrow$ *Quelles applications de l'induction ?*

2 Couplage électromagnétique

2.1 Auto-inductance

✍ HPrépa EM

Flux propre On considère un circuit fixe et indéformable, parcouru par un courant d'intensité $i(t)$ on fait un schéma orienté. Par l'équation de Maxwell-Ampère, ce circuit crée un champ magnétique, que nous appelons champ propre et qui est noté $\vec{B}_p(M,t)$. Le flux de champ à travers le circuit lui-même est appelé flux propre ϕ_p. Il s'exprime par $\phi_p = \int_\Sigma \vec{B}_p d\vec{S}$

Inductance propre Le champ magnétique propre en M et à l'instant t est proportionnel à l'intensité $i(t)$ dans le circuit par linéarité des équations de Maxwell et dans l'ARQS : pas de courant de déplacement dans l'équation de Maxwell-Ampère. Même si on ne connaît pas la forme exacte de $\vec{B}_p(M,t)$, on peut quand même déduire que le flux propre est proportionnel à i(t), le facteur de proportionnalité ne dépendant pas du temps mais uniquement de la géométrie du circuit. On définit alors l'inductance propre L par :

$$\phi_P(t) = Li(t) \tag{8}$$

L'inductance propre s'exprime en henry H. Avec les conventions pour ϕ, L est toujours positif, comme on va le vérifier. On montre le schéma de la spire et de ses lignes de champ. La flèche indique le sens réel du courant. Si on choisit pour sens conventionnel positif le long de la spire ce même sens, alors $i > 0$ et, en appliquant la règle de la main droite, on constate que le champ magnétique traverse la surface de la spire dans le sens positif donc que $\varphi_p > 0$. Si l'on fait le choix inverse, i et φ_p sont sont tous les deux négatifs. Le signe du flux propre est donc toujours le même que celui de l'intensité. Il en résulte que :

Une auto-inductance est toujours positive. *Bonus : mais un coefficient d'inductance mutuelle M a un signe qui dépend de l'orientation des circuits.*

Cas du solenoïde/bobine Un solénoïde est constitué de N spires régulières, supposées jointives, de section S. Sa longueur $l \gg \sqrt{S}$ est très grande devant ses dimensions latérales et on ne tient pas compte des effets de bord. On fait un schéma orienté. On va calculer son inductance propre L. Dans l'ARQS, le théorème d'Ampère donne que le champ propre à l'intérieur a la même expression qu'en magnétostatique :

$$\vec{B}_p = \frac{\mu_0 N i}{l}\vec{e}_z \tag{9}$$

On obtient alors le flux $\phi_{p,1}$ à travers une spire fictive fermée sur elle-même, très proche d'une spire du solénoïde :

$$\phi_{p,1} = \vec{B}_p \cdot \vec{S} = \frac{\mu_0 N S}{l} i \tag{10}$$

On en déduit le flux propre total, en prenant compte des N spires :

$$\phi_p = N\phi_{p,1} = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} i \tag{11}$$

d'où l'inductance propre

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} \tag{12}$$

ODG: Numériquement, pour une bobine de 1000 spires de rayon $a = 3$cm, réparties sur une longueur $\ell = 30$cm, $L = 4\pi.10^{-7} \times \frac{1000^2}{30.10^{-2}} \times \pi \left(3.10^{-2}\right)^2 = 12$mH. Pour une bobine de transformateur EDF, [todo].

Auto-induction Si l'intensité du courant traversant le circuit varie dans le temps, le flux propre varie et il apparaít donc une force électromotrice induite, nommée force électromotrice auto-induite et notée $e_p(t)$. D'après la loi de Faraday :

$$e_p(t) = -\frac{\mathrm{d}\varphi_p}{\mathrm{d}t} \quad \text{soit} \quad e_p(t) = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

en supposant que l'auto-inductance L ne dépend pas du temps, c'est-à-dire que le circuit ne se déforme pas.

Circuit électrique équivalent En présence d'un champ extérieur, la loi d'Ohm généralisée s'écrit :

$$u = Ri - e_p - e_{ext} = Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} - e_{ext} \tag{13}$$

où on rappelle que L est constant à géométrie constante. On montre le schéma électrocinétique équivalent, en convention récepteur et générateur. Pour un modèle plus réaliste, on rajoute une résistance en série. Pour une inductance pure en convention récepteur :

$$u_L = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{14}$$

Energie magnétique Considérons une inductance pure L dans en court circuit avec un générateur de tension u. On fait un schéma orienté. La loi des mailles donne $u = Ldi/dt$ Pour faire un bilan de puissance, on multiplie par i : $P_{géné} = ui = Li\mathrm{d}i/\mathrm{d}t = P_m$ où $P_{géné}$ est la puissance *fournie* (convention générateur) par le générateur et P_m est la puissance *reçue* (convention récepteur) par la bobine . On identifie alors l'énergie magnétique :

$$\mathcal{E}_m = \frac{1}{2}Li^2 \tag{15}$$

Bonus : correspondance avec l'énergie volumique électromagnétique L'énergie $\mathcal{E}_\mathrm{m}$ correspond exactement à la partie magnétique de l'énergie associée au champ, dont la densité volumique $\mathcal{E}_\mathrm{vol}$ est égale à :

$$\mathcal{E}_\mathrm{vol} = \frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}$$

Vérifions ce résultat dans le cas d'un solénoide idéal, de longueur ℓ et comparons N spires de section S $\cdot$ Le champ propre a pour valeur $B = \mu_0 \frac{N}{\ell} i$ à l'intérieur et il est nul à l'extérieur. La densité volumique d'énergie magnétique est égale à $\frac{B^2}{2\mu_0}$ à l'intérieur, c'est-à-dire dans un volume égal à $S\ell$, et elle est nulle à l'extérieur.

L'énergie associée au champ magnétique est donc puisque $\vec{B}$ est uniforme :

$$\mathcal{E}_\mathrm{m} = \frac{B^2}{2\mu_0}S\ell = \frac{\mu_0 N^2 S}{2\ell} i^2$$

$L=\frac{\mu_0 N^2 S}{\ell}$ est l'inductance du solénoide et nous obtenons bien :

$$\mathcal{E}_{\mathrm{m}}=\frac{1}{2}Li^2=\iiint_{\text{espace}}\frac{B^2}{2\mu_0}\mathrm{d}\tau$$

Bonus : définition énergétique de l'inductance Nous avons évoqué les difficultés pour le calcul et l'estimation d'une inductance propre. Pour étendre la définition de L à tous les circuits, nous pouvons identifier les deux expressions de l'énergie magnétique :

$$\frac{1}{2}Li^2=\iiint_{espace}\frac{1}{2\mu_0}B^2_{\text{propre}}\,d\tau$$

Ainsi, l'inductance est toujours définie : comme les circuits réels ne sont pas strictement filiformes, le champ $\vec{B}$ est fini et l'énergie magnétique d'un circuit limité dans l'espace est une quantité finie. Cependant, le calcul analytique de l'intégrale de B^2_{propre} sur tout l'espace est le plus souvent impossible, et la valeur de L doit être souvent considérée comme une donnée expérimentale. Cette définition implique également $e_{\text{propre}}=-L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ dans le cas d'un circuit rigide ($L=$ constante)

Il suffit pour le montrer de reprendre "à l'envers" le bilan énergétique pour un circuit rigide :

$$\mathcal{P}_{\text{source}}=\mathcal{P}_{\text{Joule}}+\frac{\mathrm{d}\mathcal{C}_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}$$

d'où :

$$ui=(Ri-e_{\text{propre}})\,i=Ri^2+\frac{d\left(\frac{Li^2}{2}\right)}{dt}$$

et donc :

$$e_{\text{propre}}=-L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

Application : arcs électriques (✍ Hprépa Electromagnétique MP page 203). L'énergie magnétique n'est pas une énergie irréversiblement dissipée comme celle de l'effet Joule. Elle est restituée au circuit si le courant diminue. Ainsi lorsque l'on ouvre l'interrupteur d'un circuit électrique, un "arc électrique" (une étincelle) se forme au moment de la rupture entre les contacts de l'interrupteur assurant une diminution rapide mais continue du courant vers 0. S'il y a une capacité parasite C (ex : les spires voisines forment de petits condensateurs), on veut voir des oscillations à la pulsation $\omega=1/\sqrt{LC}$, graduellement dissipées par effet Joule ou pertes fer le cas échéant. La tension maximale de l'oscillation peut être très élevée. Ceci lui vaut le nom de surtension. Cela vient du fait qu'après l'interruption du courant l'énergie de l'inductance $\frac{1}{2}LI^2$ a été transférée aux capacités parasites $\frac{1}{2}CV^2$. La surtension maximale peut être calculée à partir de l'égalité : $\frac{1}{2}LI_0^2=\frac{1}{2}CV_{max}^2$, I_0 étant la valeur du courant à l'instant de coupure. Ce phénomène peut constituer un problème en électrotechnique, mais il est mis à profit dans moteurs à combustion des voitures. Un courant est appliqué dans un circuit comportant une bobine d'allumage et est brutalement coupé par le rupteur, actionné par une came, afin de produire une forte tension entre les électrodes de la bougie et provoquer un arc électrique, entraînant la combustion du mélange. De nos jours, les rupteurs sont abandonnés au profit de l'allumage électronique, dont certaines variantes reposent toujours sur ce principe. (`https://fr.wikipedia.org/wiki/Ouverture_d%27un_circuit_inductif`). **ODG:** La bobine d'allumage est constituée essentiellement de 3 éléments : un noyau, en tôles feuilletées, de métal ferromagnétique, le bobinage primaire avec quelques centaines de spires de grosse section. Il est alimenté en 12 V, lorsque le rupteur est fermé il peut être alors traversé par un courant de 6 à 20 A, le bobinage secondaire avec plusieurs milliers de spires de faible diamètre et pouvant générer une tension de 45 000 V lorsque le courant du primaire est interrompu. On peut montrer cette vidéo :`https://youtu.be/Yo0-h6u3qN0?t=87`

On peut faire la transition sur le fait qu'il y a un transformateur dans la "bobine" d'allumage. Les bobines et le phénomène d'induction sont largement est exploités par EDF. En effet, pour limiter les pertes lors du transport de l'électricité, le réseau EDF utilise des lignes hautes tensions, c'est-à-dire entre 40 000 V et 20 000V, pour l'acheminer depuis les centrales jusqu'à nos maisons. Or, la tension aux bornes des prises auxquelles on branche nos appareils vaut 220 V. Pour convertir la haute tension alternative en tension alternative plus basse, on utilise des transformateurs qui sont composés de deux bobinages couplés.

2.2 Application : transformateur

✍ Sanz MPSI PTSI

Description et application Un transformateur est un appareil qui modifie l'amplitude de tensions et de courants alternatifs. Il sosnt omniprésents au quotidien : pour convertir les hautes tensions des lignes hautes tension vers le 220

V secteur puis vers les basses tensions pour les chargeurs de téléphone/orginateur. On montre des photos diverses.. Il se compose d'une carcasse ferromagnétique et de deux enroulements. Le matériau ferromagnétique sert à transférer le flux créé par une bobine à l'autre, grâce à sa grande perméabilité magnétique et donc conserver le flux magnétique le long du circuit magnétique qu'il forme. Les enroulements sont constitués de fils de cuivre, bobinés autour du circuit magnétique.

Enroulement primaire, secondaire L'enroulement primaire, ou plus simplement le primaire, ici constitué de N_1 spires, est celui qui reçoit l'énergie électrique, que restitue à la charge l'enroulement secondaire, ou secondaire, constitué de N_2 spires.

Principe Le primaire, soumis à la tension alternative $u_1(t)$, est parcouru par le courant alternatif d'intensité $i_1(t)$. Ce courant $i_1(t)$ crée un champ magnétique variable $\vec{B}(t)$. Le ferromagnétique canalise ce champ jusqu'au secondaire. Le champ variable $\vec{B}(t)$ crée alors un flux variable dans l'enroulement secondaire. Une f.é.m. $u_2(t)$ est donc induite au secondaire.On montre des schémas électriques.

Hypothèses On suppose le transformateur parfait (perméabilité magnétique $\mu \to \infty$) : il n'y a pas de perte de flux. On suppose que le secondaire fonctionne à vide (pas de perte Joule).

Un transformateur idéal est caractérisé par l'absence de perte de puissance et de fuite de flux.

Rapport de transformation Quel est le lien entre $u_2(t)$, tension au secondaire, et $u_1(t)$, tension au primaire ? Soit S la section du circuit magnétique. Le flux de $\vec{B}(t)$ à travers une section droite, c'est-à- dire orthogonale au champ magnétique, est donc $B(t)S$. Faire attention à l'orientation. Le flux total à travers les N_1 spires du primaire est donc $\phi_1(t) = N_1 B(t)S$, celui au secondaire est $\phi_2(t) = N_2 B(t)S$. Les f.é.m. induites au primaire et au secondaire sont alors :

$$e_1(t) = -\frac{\mathrm{d}\phi_1}{\mathrm{d}t} = -N_1 S\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \qquad e_2(t) = -\frac{\mathrm{d}\phi_2}{\mathrm{d}t} = -N_2 S\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \tag{16}$$

Avec $u_1 = -e_1$ et $u_2 = -e_2$ (fonctionnement à vide), on obtient :

$$\frac{u_2(t)}{u_1(t)} = \frac{N_2}{N_1} \equiv m \tag{17}$$

où m est le rapport de transformation. On vérifie la valeur trouvée expérimentalement. **ODG:** $m \sim 10^{-3}$ pour passer des lignes 20 kV au secteur 220 V.

Rendement, causes de pertes Les pertes cuivre sont dues à l'effet Joule dans les bobinages primaire et secondaire. Les pertes fer se répartissent en pertes par hystérésis, dues au parcours du cycle d'hystérésis, réduites en utilisant un milieu doux ; pertes par courant de Foucault, dues à l'effet Joule dans la masse du ferromagnétique, réduite en feuilletant le milieu ou en utilisant un milieu isolant. **ODG:** La minimisation des pertes permet d'atteindre des rendements de l'ordre de 95% pour des transformateurs de quelques dizaines de kW, et supérieur à 99% pour de très grosses unités. Le modèle du transformateur idéal s'en trouve légitimé.

Bonus : tracé de cycle d'hystérésis La géométrie d'un transformateur permet de relever expérimentalement le cycle d'hystérésis d'un ferromagnétique. La tension v_2, égale à $N_2 S\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$, est intégrée, pour mener à $y(t) = N_2 SB(t) + y_0$ L'intégrateur utilisé présente une impédance d'entrée infinie, afin d'imposer $i_2 = 0$. On l'obtient en ajoutant, par exemple, un suiveur à amplificateur opérationnel en entrée de bloc. Le théorème d'Ampère, appliqué sur une ligne de champ de longueur ℓ, canalisée par le ferromagnétique, mène à $H\ell = N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 i_1$. On en déduit que la tension $x(t)$ vaut $\frac{R_1 \ell}{N_1} H(t)$ Il suffit finalement de tracer y en fonction de x, sur un oscilloscope en mode XY. On se sera placé en mode AC pour la tension y, afin de filtrer la constante y_0. On visualise alors, à des constantes multiplicatives près, le cycle d'hystérésis, B en fonction de H

Bonus : Transformateur d'isolement La tension secondaire est une copie conforme de la tension primaire alternative. Les circuits primaire et secondairen'ont aucun lien électrique. Ils peuvent en particulier avoir deux masses différentes, sansrisquer de court-circuit

Bonus : transfert d'impédance cf. ma fiche

Illustration du transformateur
Matériel : deux bobines de nombre de spires différents, un circuit ferromagnétique doux, deux voltmètre, un GBF. On mesure le rapport de transformation et on vérifie qu'il correspond au rapport des nombres de spire.

On a en fait considéré un transformateur idéal, c'est-à-dire pour lequel il n'y a pas de pertes. En réalité, on a pas exactement la relation de proportionnalité entre les tensions du primaire et du secondaire. Une des causes de ces pertes sont les courants de Foucault.

3 Courants de Foucault

3.1 Principe

Existence des courants de Foucault. Dans le cas du tranformateur, le matériau ferromagnétique est conducteur et est placé dans un champ magnétique $\vec{B}(t)$ variable. La loi de Faraday donne l'existence d'un force électromotrice induite dans le volume et donc des courants induits. Ces courants volumiques induits sont appelés courants de Foucault, du nom du physicien Léon Foucault qui les a mis en évidence en 1851.

Pertes par courant de Foucault. L'existence des courants de Foucault implique la présence de l'effet Joule : de l'énergie électrique est dissipée sous forme de chaleur.

Loi d'échelle en régime sinusoïdal. On peut ne pas faire de calcul exact et donner une loi d'échelle. En régime sinusoïdal, l'équation de Maxwell-Faraday donne que $E \propto \omega B$. Or, la loi d'Ohm donne que la densité de courant j est en $j \propto E \propto \omega B$. Finalement, la puissance dissipée par effet Joule est $P_J = \vec{j} \cdot \vec{E}$ donc

$$P_J \propto (\omega B)^2 \tag{18}$$

Calcul exact pour un conducteur cylindrique [todo : voir chez Jérémy/2016] Considérons un conducteur cylindrique de rayon R de hauteur $h \gg R$ et de conductivité σ placé dans un champ magnétique variable parallèle à son axe $\vec{B} = B_0 cos(\omega t)\vec{e}_z$. [faire un schéma orienté du cylindre traversé par les courants induits].

Les courants de Foucault sont caractérisés par : $\vec{j}_f = \sigma \vec{E}_1$ avec $\vec{\nabla} \wedge \vec{E}_1 = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ où $\vec{E}_1$ est le champ électrique induit, qu'on va calculer.

On suppose que le champ magnétique s'identifie au champ appliqué et on néglige les effets de bords : le champ électrique a les mêmes invariances mais des symétries opposées de $\vec{B}$ donc est orthoradial et de la forme $\vec{E}(M,t) = E(r,t)\vec{e}_\theta$. En un point M distant de r à l'axe, on a, en intégrant l'équation de Maxwell-Faraday sur un cercle de rayon r et en utilisant le théorème de Stokes (on peut aussi le voir comme un théorème d'Ampère où $\vec{E} \leftrightarrow \vec{B}$ et $\mathrm{d}\vec{B}/\mathrm{d}t \leftrightarrow \vec{j}$) :

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{2} r\omega B_0 sin(\omega t)\vec{e}_\theta$$
$$\vec{j}_f = -\frac{\sigma r}{2}\omega B_0 sin(\omega t)\vec{e}_\theta$$

Les courants de Foucault sont plus intenses en périphérie du conducteur [schéma] et leur direction suit la loi de Lenz : le champ magnétique induit s'oppose à $\vec{B}$.

La puissance moyenne (sur le volume) dissipée par effet Joule est donc :

$$\langle P \rangle = \langle \int d\tau j_f E_1 \rangle = \frac{V}{16}\sigma\omega^2 B_0^2 R^2$$

On retrouve bien que la puissance dissipée par les courants de Foucault est proportionnelle à ω^2. **ODG:** [todo : donner un odg, ou un rendement]

Il faut garder à l'esprit qu'on s'est arrêté à l'ordre 1 des équations de Maxwell : le champ intérieur est une superposition du champ appliqué et du champ induit. Il faut donc prendre en compte l'effet de peau : le calcul n'est valable que si le conducteur est de taille inférieure à l'épaisseur de peau. A haute fréquence [todo : four à induction], il faut résoudre à des ordres plus élevés.

Feuilletage Dans le cas du transformateur, pour limiter les pertes par courants de Foucault, aussi appelées pertes fer car dues au matériau ferromagnétique, le matériau est feuilleté. Le feuilletage de tôles est fait de l'empilement de tôles d'acier, de même dimension, les unes sur les autresa. L'oxydation ou un vernis isolant électrique déposé sur chaque tôle permettent de limiter la circulation du courant d'une tôle à sa voisineb afin de réduire les courants de Foucault, donc l'échauffement du circuit magnétique par rapport au même circuit massif. Ceci améliore le rendement par diminution des pertes fer et donc le dimensionnement des inductances, transformateurs ou machines qui les utilisent. Les pertes par courant de Foucault sont inversement proportionnelles à la résistivité. Ces pertes peuvent donc être réduites par le choix des matériaux (résistivité élevée) et par l'épaisseur des tôles Il est constitué sous la forme de feuillets, souvent avec du vernis isolant à la surface. En feuilletant dans un plan contenant $\vec{B}$, les boucles de courant de Foucault se développement moins. On montre un schéma/photo. **ODG:** Ces tôles existent en différentes qualités (acier doux, au silicium, à grains orientés, etc.), épaisseurs, formes et dimensions. Elles sont classifiées, entre autres, par leurs pertes totales en watts par kilogramme, pour une induction alternative sinusoïdale de fréquence 50 Hz et de valeur maximale 1 T. Ainsi, les tôles de qualité courante sont-elles définies à 2,6 W/kg et 1,6 W/kg et les tôles à grains orientés (par traitements particuliers et laminage) à 0,6 W/kg.

Mécanisme de la réduction de courants de Foucault par feuilletage Si on feuillette en n feuilles, on obtient n surfaces transverses de surface réduite d'un facteur n. Donc $\phi \to \phi/n$ sur chaque surface, donc $e \to e/n$. De plus, la surface transverse aux courants a été réduite de $S \to S/n$ donc la résistance est réduite de $R = l/\sigma S \to R/n$. En bilan, les pertes de Foucault sont en $\boxed{P_F = n(e^2/R) \sim 1/n^2}$.

Dans le transformateur, on veut éliminer les pertes par courants de Foucault, mais elles peuvent être utiles dans certaines situations.

3.2 Chauffage par induction

Principe. La plaque est parcourue par un courant variable et génère un champ magnétique variable, on l'appelle inducteur. Le fond de la casserole est donc plongé dans un champ magnétique variable, des courants de Foucault se développent. La puissance dissipée par effet Joule sert à réchauffer la nourriture.

Choix de la fréquence. Comment choisir la fréquence du champ magnétique oscillant ? Il faut la choisir élevée car la puissance dissipée par effet est proportionnelle à ω^2 mais il ne faut pas la prendre trop grande car l'induit étant conducteur, le champ magnétique variable pénètre sur une épaisseur de peau $\delta \propto \frac{1}{\sqrt{\omega}}$ **ODG:** le choix technologique retenu est typiquement 25 kHz. **ODG:** δ pour le cuivre à$25kHz$, $\delta = 0.4mm$ (tableau sur wikipédia "effet de peau" pour la valeur de δ pour plusieurs fréquences)

Estimation Si on suppose que l'énergie dissipée par effet, alors avec m la masse du conducteur et C_p la capacité calorifique massique, dT la variation Joule est entièrement dissipée sous forme de chaleur de température pendant dt, on a :

$$P_j dt = mC_p dT$$

ODG: Pour le cuivre, $C_p = 385J.kg^{-1}.K^{-1}$, $\sigma = 5.96 \cdot 10^7 S.m^{-1}$, $\omega = 25kHz$, $m/V = 8.96g.cm^{-3}$, $R \approx 20cm$ et $B_0 = 1mT$, on trouve [todo : faire le calcul, et vérifier la valeur de B, mais attention, pour une plaque chauffante, le calcul du cylindre infini n'est pas valable, il faut plutôt prendre l'épaisseur de peau comme longueur caractéristique] $\frac{dT}{dt} = ??K \cdot s^{-1}$. La puissance est de l'ordre du kW, ce qui est comparable au chauffage à gaz ou à plaque électrique.

Pertes et rendement Le rendement d'une plaque à induction est de l'ordre de 80 à 90%. Les pertes proviennent en grande partie de l'effet Joule au sein des bobines des inducteurs. Ce rendement est bien supérieur à celui d'une table gaz qui est de 70% (dispersion de la chaleur par les flammes dans l'air ambiant et les produits de combustion), ou d'une table électrique à foyers en fonte qui est de 60% (nécessité d'un bon contact entre ustensile et foyer, chauffage de la plaque fonte).

Bonus : four à induction Les courants de foucault sont également utilisés dans les fours à induction utilisés dans l'industrie pour la fusion des métaux. La température de Fusion du Cuivre étant de environ 1000K on peut grâce à l'ordre de grandeur de la vitesse d'élévation de la température réalisé précédemment trouver le temps que mettra le four pour faire fondre le barreau de cuivre : t 1 minute 40 s.

3.3 Freinage par induction

Là on passe dans l'induction de Lorentz...

Chute d'un aimant dans un tube conducteur
Matériel : tube en cuivre, aluminium, PVC, petit aimant néodyme. Oscilloscope et bobines de fluxmètre si quantitatif/visuel.
On fait tomber l'aimant dans les différents tubes. Par temps croissant de chute : PVC < aluminium < cuivre. Le temps de chute d'un petit aimant est beaucoup plus important dans un tube conducteur que dans un tube non conducteur (PVC par exemple) de même géométrie.

Freinage d'un pendule
Vidéo : https://youtu.be/1ewhzD2mo8A?t=43.

Interprétation Lors de la chute de l'aimant, le flux du champ magnétique à travers une section du tube varie, ce qui induit une force électromotrice d'induction. Les courants ainsi générés dans le tube conducteur créent un champ magnétique qui agit sur l'aimant. D'après la loi de Lenz, ces courant vont s'opposer à la cause qui leur a donné naissance, c'est-à-dire le mouvement de l'aimant : la chute de l'aimant est freinée. *On peut aussi le voir en calculant les courants induits, la résultante des forces de Laplace (non présentées dans la leçon) sur le tube conducteur, ce qui donne la force exercée par le tube conducteur sur l'aimant à l'aide de la 3e loi de Newton.*

Applications Des systèmes de freinage à courants de Foucault sont utilisés notamment sur les véhicules poids lourds ou encore sur la rame à grande vitesse ICE 3 de la Deutsche Bahn. **ODG:**

Dispositif dans un véhicule Dans un véhicule, le dispositif de freinage par induction est constitué d'électroaimants fixes (stator) induisant des courants de Foucault dans des disques conducteurs (rotor) entraînés par les roues. C'est plutôt de l'induction de Lorentz. Lorsque les électroaimants sont mis sous tension, les courants de Foucault induits dans les disques génèrent des forces de Laplace s'opposant au mouvement, donc générant un couple de freinage.

Comparaison avec les freins classiques Contrairement aux freins classiques qui dissipent l'énergie par frottement, le freinage électromagnétique fonctionne sans contact, donc sans usure de garniture. Bien que l'énergie de freinage reste dissipée sous forme de chaleur (par effet Joule), ils sont moins sensibles à l'échauffement. Le freinage étant généré par la vitesse des disques, ils ne permettent en aucun cas l'immobilisation d'un véhicule jusqu'à l'arrêt complet. C'est pour cela qu'ils ne fonctionnent qu'en complément de freins conventionnels.

Conclusion

Bien que le freinage par induction peut être compris qualitativement avec la loi de Lenz, on peut faire des estimations quantitatives en introduisant la notion de force de Laplace, qui est la résultante de la force de Lorentz sur un conducteur.
Ouverture : La force de Laplace fait le pont entre des grandeurs électromagnétiques (i, B) et des grandeurs mécaniques (force) et indique la possibilité de réaliser des conversions d'énergie/puissance électro-mécaniques. L'induction en fait le principe de base des machines électrotechniques (MCC, synchrone, asynchrone..) qui servent entre autre à produire de l'énergie électrique ou mettre en mouvement les TGV.

Compléments/Questions

Commentaires

- On peut citer en conclusion un exemple un peu exotique, pour généraliser : plasma à couplage inductif radiofréquence (quelques infos sur http://en.wikipedia.org/wiki/Induction_plasma_technology).

Applications des courants de Foucault

Tachymètre Dans un véhicule, on mesure la vitesse de rotation des roues à l'aide d'un aimant relié à la sortie de la boite de vitesses et entouré d'un tube fait d'un métal conducteur allant de ladite boite jusqu'au compteur sur lequel est fixé une aiguille. Le tube, pivotant autour de son axe, est retenu par un ressort en spirale chargé de ramener l'aiguille à zéro. Plus la roue tourne vite, plus la force exercée sur la rotation du tube est grande, et plus l'aiguille du compteur s'éloigne de sa position initiale.

Dynamos de vélo Un aimant est mis en rotation par la rotation de la roue. Cet aimant permet ensuite de générer de l'énergie pour alimenter une source lumineuse. Contrairement aux dynamos traditionnelles, l'entrainement de l'aimant se fait ainsi sans contact.

Capteurs de distance sans contact Ils sont généralement constitués d'une bobine excitée à haute fréquence (de 200 kHz à 2 MHz) ; la proximité d'une pièce conductrice en modifie l'impédance ; la mesure de cette impédance permet de déterminer la distance de la pièce mesurée.

Contrôle non destructif de pièces métalliques Par exemple pour la détection des fissures dans les pièces métalliques comme les rails ferroviaires ou les pièces métalliques d'avion soumises à des contraintes répétées. En cas de défaut interne, les courants de Foucault sont différents, ce qui se traduit par une modification du champ magnétique induit. Un exemple est le contrôle de la qualité de fabrication des lames des armes d'escrime sportive.

Séparateur de déchets Un séparateur à courant de Foucault est une machine de tri employée dans le recyclage des déchets. Cet appareil sépare les emballages métalliques non-ferreux (aluminium, zinc, cuivre...) des autres emballages, y compris ceux ferromagnétiques.

Le séparateur génère un champ magnétique oscillant (**ODG:** kHz). Les métaux conducteurs non-ferreux sont parcourus par des courants de Foucault qui produit un moment magnétique opposé au champ magnétique. L'énergie potentielle étant en $U = -\vec{M} \cdot \vec{B}$, le métal est attiré par les champs faibles et est repoussé de la source du champ.

Applications du transformateur

Pince ampèremétrique

Inductance mutuelle

Exemple : petite bobine dans grande bobine : tesla coil !

Théorème de Neumann : On a l'égalité de $M_{12} = M_{21} = M$ est calculant ϕ_{12}, qui est sous la forme d'une intégrale qui met en jeu entre autres r_{12} (voir wikipedia `https://fr.wikipedia.org/wiki/Induction_mutuelle`), on montre que $\phi_{12} = \phi_{21}$.

Le signe de M dépend du choix arbitraire de l'orientation des deux circuits

L'énergie magnétique est positive car c'est une intégrale de B^2 (référence $E = 0$ en situation de courant/champ nuls). L'énergie se met sous une forme quadratique que i_1 et i_2 (HPrepa). La matrice associée est (L1, M,M,L2). Comme l'énergie magnétique est positive, la forme quadratique est définie positive, donc le déterminant de la matrice est positif et on obtient l'inégalité sur M :

$$M^2 \leq L_1 L_2$$

. Dans le cas parfait $M^2 = L_1 L_2$.

Preuve :

$$\phi_{12} = \iint_{S_2} \vec{B_1} \cdot d\vec{S} = \iint_{S_2} \overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{A_1} \cdot d\vec{S} = \oint_{C_2} \vec{A_1} \cdot d\vec{l_2} \tag{19}$$

L'expression du potentiel vecteur généré par un circuit linéique C_1 parcouru par un courant I_1 s'écrit :

$$\overrightarrow{A_1} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} I_1 \frac{\overrightarrow{dl}}{r_{12}} \tag{20}$$

L'expression finale du flux est :

$$\phi_{12} = I_1 \cdot \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{c_2} \oint_{c_1} \frac{\overrightarrow{dl_1} \cdot \overrightarrow{dl_2}}{r_{12}}\right) \equiv M_{12} I_1 \tag{21}$$

En permutant les indices, on remarque $M_{12} = M_{21}$

Instabilité dynamo

La loi de modération de Lenz n'est pas toujours valable : lorsque le champ magnétique créé par la circulation de courants peut renforcer le champ initial. C'est ce qu'il se passe dans l'instabilité dynamo : `http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP2005/04Dormy.pdf`.

Les caractéristiques principales de l'effet dynamo sont : l'effet dynamo : (i) l'instabilité se déclenche lorsque l'induction excède la dissipation ohmique ; (ii) la topologie des courants est essentielle (cela fait la différence entre l'instabilité dynamo et la modération de Lenz) (iii) la saturation du courant est assurée par l'action de la force de Laplace qui tend à freiner le disque ; (iv) la croissance d'un champ dynamo peut être vue comme provenant de la superposition de champs magnétiques induits qui se renforcent.

On pense que c'est sur le principe de la dynamo que repose l'origine du champ magnétique terrestre.

Mots clés : dynamo de Bullard, Pinton, Odier et Volk : Generation of magnetic field by dynamo action in a turbulent flow of liquid sodium et Magnetic field reversals in an experimental turbulent dynamo.

Questions :

- Fonctionnement des plaques à induction ?
- Pourquoi le nom de champ électromoteur ?
- Nom que donnait Maxwell à la quantité **A** (A = potentiel vecteur) ?
- Comment décrire l'induction sans force électromotrice ?
- Comment évaluer précisément si on se place dans l'ARQS magnétique ou électrique ? On compare c rho à j.
- Comment expliqueriez-vous à un élève le schéma du circuit électrique équivalent ?
- Formulation la plus générale de la loi de Lenz ?
- Pour l'inductance mutuelle, il y a un ordre précis pour les indices, lequel et pourquoi ?
- Intérêt du ferromagnétisme dans le transformateur ? Qu'apporte le feuilletage et dans quel sens doit-il être ? Ferromagnétisme pour canaliser les lignes de champ, et donc augmenter l'intensité du champ magnétique pour un même courant I circulant dans l'inducteur.
- Détailler les différentes pertes du transformateur ? Pertes fer (courants de Foucault), pertes cuivre (effet Joule), pertes par hystérésis.
- Comment obtenir la loi de Faraday pour l'induction de Lorentz, est-ce qu'on peut la démontrer ?
- Réalité physique de A et V ? Et en MQ ?
- Courant de Foucault avec l'aimant dans le tube : comment on écrit le PFD ? Voir Garing
- Validité de la loi de Faraday ? (il me manquait la condition "pas de contacts glissants")
- Comment traiter un problème d'induction si on est hors des cas simples de Neumann et Lorentz ?
- Comment prendre en compte les courants de Foucault pour une symétrie quelconque ?
- Expression générale du flux ? Forme infinitésimale
- Est-ce que tu es dans l'ARQS ? Quel type d'ARQS ? Oui ARQS magnétique, on néglige le courant de déplacement dans Maxwell-Ampère. Si on est pas dans l'ARQS magnétique, il faut faire des calculs relativistes, (dans l'ARQS magnétiques, les équations de Maxwell sont invariantes par transformée de Galilée).
- Loi qui lie B et i ? Postuler phi = Li, est-ce toujours valable comme définition ? Biot et Savart. Pas la meilleure définition (plutôt donner la définition énergétique), il y a un problème lorsqu'on s'approche du fil (divergence si le fil est infiniment fin).
- Démonstration pour l'application numérique de L ? D'où viennent les écarts ? ? Enroulement les unes sur les autres augmentent l'inductance, solenoïde pas du tout infini.
- M21=M12, pourquoi ? On peut le voir en écrivant les intégrales pour le flux + théorème de Stokes.
- Signe de l'inductance mutuelle : Peut être négative ? Pourquoi ? Oui,Dépend des conventions d'orientation
- L'inductance mutuelle est majorée par sqrt(L1L2) : pourquoi ? $M < \sqrt{L_1 L_2}$ vient d'un bilan d'énergie entre ce qui est stocké dans la première bobine, dans la deuxième et dans le couplage, la somme doit être positive, d'où une relation sur le déterminant.
- Comment fonctionne un alternostat ? Utilité si m=1 ? Transformateur avec un balai pour choisir le nombre de spires. Isolation de masse
- Mesure de rapport de transformation : présence de l'alternostat, quelle est l'impédance vue par la bobine au secondaire ?

- Quelles peuvent être les applications de l'autoinduction ?
- Pour affiner le modèle de Drude, quel facteur détermine en fait le libre parcours moyen des électrons dans les métaux ? [les modes de vibration du réseau cristallin : les phonons]

Passage :

- Préciser que la première partie est en référentiel galiléen. (surtout pour la loi de Lenz)
- Apres la partie electrocinétique, bien dire que c'est inhabituel, quand on intègre sur un contour fermé d'habitude c'est nul.
- Est ce que il y a des exceptions à la loi de Lenz ? Est ce que c'est toujours en référentiel galiléen ? Qu'est ce qui se passe si on rajoute des capacités ? Elles introduisent des déphasages (opposés aux bobines), donc cela peut amplifier le champ. La loi de Lenz est valable que quand en présence de bobine ou de résistances.
- Pour la définition du flux, plutôt utiliser la définition énergétique
- Dans le transformateur, en quoi les lignes de champs sont canalisées dans le ferro ? Voir les conditions de passage, H tangentiel est continu, donc $B_{ext}/B_{int} = \mu_0/\mu_r << 1$
- Hypothèses du transformateur. (il faut que le secondaire soit à vide pour qu'il n'y ait pas de pertes cuivres).
- On peut faire la pince ampèremétrique (avant le transformateur).
-