LP21 - Induction électromagnétique

Cléments (de la Salle et Colléaux)

9 juin 2020

Niveau : L1 / L2

Bibliographie

- ✍ *Hprépa Electromagnétisme, 2e année* ⟶ Pour rester dans les clous du programme p.167
- ✍ *EM*, **Mauras** ⟶ à lire
- ✍ *Tout-en-un Physique PCSI*, **Salamito** ⟶ Chap. 30 - 31 - 32
- ✍ *1001 questions de la Physique en Prépa*, **Garing** ⟶ à lire (plaque et freinage)
- ✍ *La physique par les objets du quotidien*, **Ray** ⟶ plaque à induction
- ✍ *EM 3*, **BFR** ⟶ à lire comme tout BFR

Prérequis

- ➢ Force de Laplace
- ➢ ARQS magnétique
- ➢ Équations de Maxwell
- ➢ Théorème de Stockes
- ➢ Transformateur

Expériences

☕

Table des matières

Introduction

Manip' : Mise en évidence

✍ *Hprépa p.165*
Faire passer un aimant permanent dans une bobine puis la bobine autour de l'aimant et voir apparaître un courant **seulement quand l'aimant bouge**! On peut aussi imaginer créer un champ variable avec un électroaimant, foutre une bobine et voir qu'en doublant la fréquence, on double l'amplitude du courant créé.

Vu qu'on a déjà vu qu'un courant ça créait un champ magnétique, ça nous étonne pas trop qu'on puisse faire l'inverse... Mais là il faut bien une variation pour voir quelque chose!

NB

Le champ créé par un courant dans un fil provient de Maxwell-Ampère mais là on va utiliser Maxwell-Faraday, donc c'est pas du tout le phénomène inverse!

1 Électromagnétisme et induction

1.1 Cadre de l'étude

✍ *Mauras p.424*

On se place dans l'ARQS magnétique :
- On néglige la propagation des ondes EM devant les variations des champs
- On suppose $||\mathbf{j}|| \gg \rho c$ et $c||\mathbf{B}|| \gg ||\mathbf{E}||$
- Pas d'accumulation de charges $\operatorname{div} \mathbf{j} = 0$
- Jauge de Coulomb (ne pas en parler) $\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$
- Seule équation qui change : on enlève le courant de déplacement dans Mawell-Ampère

Je sais c'est pas au programme, mais franchement ça sert à rien de se faire chier à trouver autre chose, y a rien d'aussi simple qu'avec le potentiel vecteur...

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \implies \exists \mathbf{A};\ \mathbf{B} = \mathbf{rot}\,\mathbf{A}$$

Jauge de Coulomb

À ne pas dire à l'oral!
On peut a priori choisir $\mathbf{A}$ à un gradient près ($\mathbf{rot}\,\mathbf{grad} = \mathbf{0}$). Mais la jauge de Coulomb vient limiter ce choix :

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$$

Ce choix est fait pour retrouver une équation de Poisson (en ARQSM, mais sinon c'est équation de d'Alembert) pour $\mathbf{A}$:

$$\Delta \mathbf{A} + \mu_0 \mathbf{j} = 0$$

C'est un choix arbitraire mais censé.

Alors on peut exprimer un lien entre le champ électrique et ce **potentiel vecteur** :

$$\mathbf{rot}\,\mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B} \implies \exists V;\ \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{A} - \mathbf{grad}\,V$$

ARQS

Dans l'ARQS, le temps typique de variation des sources est grand devant le temps de propagation

$$\tau \gg \frac{L}{c} \implies \epsilon = \frac{L}{c\tau} \ll 1$$

Mais on peut aller plus loin en introduisant une grandeur sans dimension comparant les effets électrique et magnétique $xi = cB/E$. On peut montrer que cette grandeur compare également les potentiels et les sources :

$$\xi = \frac{cB}{E} = \frac{cA}{V} = \frac{j}{\rho c}$$

Grâce à la dernière forme (celle des sources) on peut distinguer deux cas limites :

Conducteur Les courants dominent les charges (milieu neutre) $\xi \gg 1$ c'est l'**ARQS magnétique**

Condensateur Les charges dominent les courants $\xi \ll 1$ c'est l'**ARQS électrique**

Type d'ARQS	Magnétique	Électrique
Courants/Charges	Les courants dominent	Les charges dominent
Hypothèses	$\frac{L}{\tau c} = \epsilon \ll 1$ $\frac{c\mathcal{A}}{\mathcal{V}} = \frac{\tilde{j}}{\tilde{\rho} c} = \xi \gg 1$	$\frac{L}{\tau c} = \epsilon \ll 1$ $\frac{c\mathcal{A}}{\mathcal{V}} = \frac{\tilde{j}}{\tilde{\rho} c} = \xi \ll 1$
Équations de Maxwell	$\nabla.\mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ $\nabla.\mathbf{B} = 0$ $\nabla\wedge\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ $\nabla\wedge\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$	$\nabla.\mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ $\nabla.\mathbf{B} = 0$ $\nabla\wedge\mathbf{E} = 0$ $\nabla\wedge\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$
Jauge	Jauge de Coulomb : $\nabla.\mathbf{A} = 0$	Jauge de Lorenz : $\nabla.\mathbf{A} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial V}{\partial t} = 0$
Conservation de la charge	Courants à flux conservatifs : $\nabla.\mathbf{j} = 0$	Pas de changement : $\nabla.\mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$
Énergie	Forme magnétique : $\frac{\mathbf{B}^2}{2\mu_0}$	Forme électrique : $\frac{\epsilon_0 \mathbf{E}^2}{2}$
Électrocinétique	Bobines à basses fréquences	Condensateurs à basses fréquences

FIGURE 1.1 – Suivant les hypothèses faites, certaines équations sont modifiées, ou non. Extrait du cours de Jérémy FERRAND.

1.2 Force électromotrice et loi de FARADAY

Considérons un circuit $\mathcal{C}$ fermé et orientons le (schémaaaaa!). Dans l'expérience introductive, on a soumis un tel circuit à un champ magnétique variable $\mathbf{B}(t)$.

Définition : Force électromotrice

Les charges q soumises à un champ électrique $\mathbf{E}$ vont se mettre en mouvement sous l'effet de la force de LORENTZ $\mathbf{F}$. La résultante de cette force pour 1C sur le circuit est appelée **force électromotrice** :

$$e = \oint_{\mathcal{C}} \frac{\mathbf{F}}{q} \cdot \mathbf{dl} = \oint_{\mathcal{C}} \mathbf{E} \cdot \mathbf{dl}$$

En vrai cette "force électromotrice" a la dimension d'une tension, c'est plutôt comme ça qu'il faut la voir, parce que sinon on s'embrouille.

NB

Dans cette définition, le terme de champ magnétique n'intervient pas car on suppose tout d'abord que le circuit ne bouge pas, donc la vitesse des charges est colinéaire au circuit donc $(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{dl} = \mathbf{0}$... Les notions d'inductions de Lorentz et Neumann seront explicitées plus tard.

Maintenant, on peut expliciter cette force :

$$e = \oint_{\mathcal{C}} \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathbf{grad}\, V\right) \cdot \mathbf{dl}$$
$$e = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_{\mathcal{C}} \mathbf{A} \cdot \mathbf{dl}$$
$$e = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_{\mathcal{S}} \mathbf{B} \cdot \mathbf{dS}$$

Sans A

$$e = \oint_{\mathcal{C}} \mathbf{E} \cdot \mathbf{dl}$$
$$e = \iint_{\mathcal{S}} \mathbf{rot}\, \mathbf{E} \cdot \mathbf{dS}$$
$$e = \iint_{\mathcal{S}} -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{dS}$$
$$e = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_{\mathcal{S}} \mathbf{B} \cdot \mathbf{dS}$$

Pour rester niveau L1

Juste balancer Faraday... Du coup on ne peut plus faire proprement les courants de Foucault donc on peut faire le freinage par induction par exemple ✍ *Salamito éd. 5 p.1127* ou bien le haut-parleur ✍ *p.1135* ou encore ✍ *p.1112*

Où $\mathcal{S}$ est une surface quelconque ayant pour support le contour $\mathcal{C}$ et $\mathbf{dS}$ est orientée selon la convention choisie pour l'orientation de $\mathcal{C}$ (schééééémaaaaaa !).

— Première égalité : L'intégrale d'un gradient sur un contour fermé est nulle

— Deuxième égalité : Théorème de Stockes avec $\mathbf{rot}\, \mathbf{A} = \mathbf{B}$

Définition : Flux magnétique

On retrouve dans la précédente équation le flux magnétique à travers la surface $\mathcal{S}$

$$\phi = \iint_{\mathcal{S}} \mathbf{B} \cdot \mathbf{dS}$$

Alors on obtient la loi de FARADAY, qui est la loi fondamentale de l'induction :

$$e = -\frac{\partial \phi}{\partial t}$$

Loi de LENZ

Le signe - traduit le principe de modération de LENZ : Le courant induit va s'opposer à la variation du flux. Qu'est-ce quoi, un courant qui s'oppose à une variation de flux !? Oui en fait ce qu'on veut dire par là, c'est que le courant qui circule va lui aussi créer un champ, et ce champ sera opposé à la variation du champ extérieur...

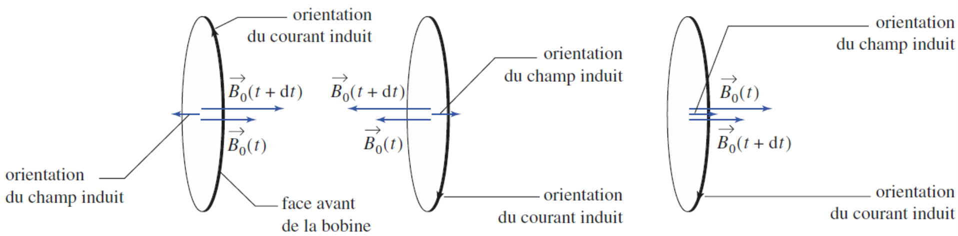


FIGURE 1.2 – Figure pas très belle... Ne pas hésiter à en faire une autre au tableau en faisant clairement apparaître **dB**

1.3 Deux types d'induction

La démonstration précédente s'est faite de le cas où le champ magnétique variait mais que le circuit ne bougeait pas. Mais on a vu aussi qu'on pouvait faire bouger le circuit dans un champ constant (manip d'intro). En fait les deux phénomènes sont strictement les équivalents, ils décrivent la même réalité mais les calculs se font différemment. Ces deux façons de voir le phénomène ont un petit nom :

- Circuit immobile dans un champ magnétique variable : induction de NEUMANN (arrêtez de prononcer "Newman" sérieux...)
- Circuit mobile dans un champ constant : induction de LORENTZ

NB

Pour l'induction de LORENTZ, on peut aussi redémontrer la loi de FARADAY en notant $\mathbf{v} = \mathbf{v_e} + \mathbf{v_C}$ la vitesse des porteurs de charges et en posant le champ électromoteur $\mathbf{E_m} = \mathbf{v_C} \times \mathbf{B}$. La manière dont c'est fait ici ✍ *Hprépa p.176* est pas mal, elle part d'un bilan énergétique. Mais c'est long donc on va pas le faire ici.

Ainsi la variation d'un flux fait apparaître une tension dans le circuit, on peut donc modéliser ça par un **circuit équivalent** (schémaaaa !). On garde tout le formalisme d'électrocinétique, mais on rajoute juste un générateur parfait de tension e.

Circuit équivalent

Ainsi la variation d'un flux fait apparaître une tension dans le circuit, on peut donc modéliser ça par un **circuit équivalent**. On garde tout le formalisme d'électrocinétique, mais on rajoute juste un générateur parfait de tension e (schémaaaa !).

2 Couplage électromagnétique

2.1 Auto-induction

On a vu dans un chapitre précédent qu'un courant électrique pouvait créer un champ magnétique propre, pour rappel dans un solénoïde de densité linéique de spires $n = {}^{N}\!/_{l}$, de section S et d'axe $\mathbf{e_z}$:

$$\mathbf{B_p} = \mu_0 n i\,\mathbf{e_z}$$

Or on vient de voir qu'une variation du flux magnétique peut entraîner la création d'une différence de potentiel, en particulier le champ électrique créé par ce solénoïde lui-même !

Définition : Inductance propre

On définit l'inductance propre d'un composant L comme le flux qu'il est capable de produire pour un certain courant i qu'on lui impose :

$$\phi = Li$$

Dans le cas du solénoïde infini, le flux total est égal à N fois le flux à travers une spire :

$$\phi = Li = NB_pS \implies L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S$$

Alors si on fait circuler un courant variable, on va créer un flux variable donc une tension aux bornes du composant :

$$e = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

On retrouve la tension aux bornes d'un bobine d'inductance propre L qu'on étudie depuis toujours dans les petites classes ! Le signe - provient du fait que dans le circuit équivalent, on modélise l'apparition de la force électromotrice par un générateur, donc en convention ?... Générateur bravo ! Or pour une bobine, on donne plutôt la tension en convention récepteur.

Faire un schéma et faire ressortir l'équivalence entre foutre un générateur ou une inductance propre L et illustrer les conventions choisies.

Inception

La question qu'on s'est tous déjà posé : mais si un courant crée un champ qui créer un courant... Alors ce courant peut-il créer un champ (qui va lui aussi créer un courant et... RAAAAAAAAH !). Et bien la réponse est oui. Voilà. Mais bon c'est négligeable donc ça va :)

2.2 Inductance mutuelle

De même, si on place côte à côte deux circuits, l'un peut créer un champ qui va induire un courant dans l'autre, et réciproquement. Le coefficient qui lie le flux de 2 sur 1 ϕ_{21} au courant du circuit 2 i_2 s'écrit de la même forme que dans le cas d'une induction propre :

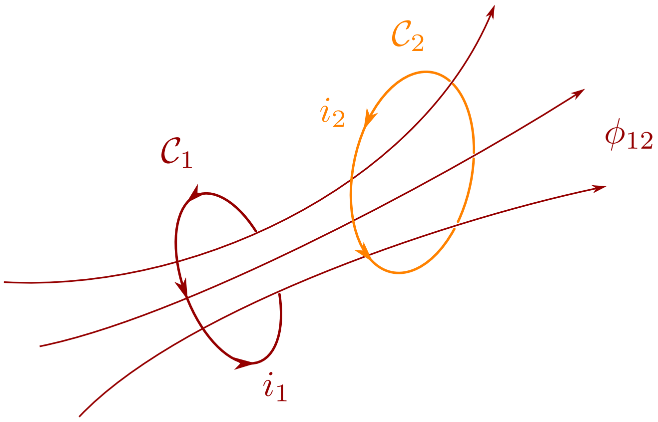
$$\begin{cases} \phi_{21} = M_{21} i_2 \\ \phi_{12} = M_{12} i_1 \end{cases}$$

Il existe un théorème (théorème de Neumann) qui énonce une symétrie dans ces inductions : $M_{12} = M_{21} = M$, on peut alors réécrire

$$\begin{cases} \phi_{21} = M i_2 \\ \phi_{12} = M i_1 \end{cases}$$

Et de la même manière que dans la sous-partie précédente, on peut définir des forces électromotrices en régime variable :

$$\begin{cases} e_1 = -M\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \\ e_2 = -M\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \end{cases}$$



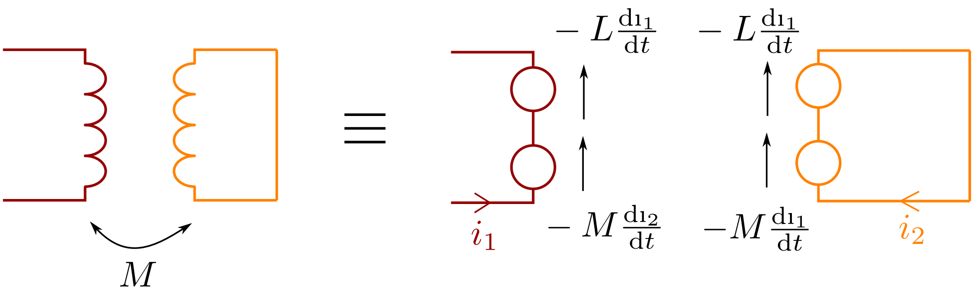


FIGURE 2.1 – Schéma équivalent, évidemment il y a une erreur un i_2 est devenu un i_1...

Manip' : Mise en évidence

✍ *MP20 - Induction et auto-induction*
Trouver une expérience pour montrer que la circulation d'un courant variable fait apparaître un courant dans l'autre circuit pourtant fermé sur lui-même. On peut aussi montrer que M dépend de la distance...

Application

C'est le moment de parler du transformateur les tensions dans chaque circuit sont (en convention récepteur)

$$\begin{cases} u_1 = L_1\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \\ u_2 = L_2\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + M\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \end{cases}$$

La puissance magnétique est

$$u_1 i_1 + u_2 i_2$$

Donc l'énergie magnétique stockée est

$$E_m = \frac{1}{2}L_1 i_1^2 + \frac{1}{2}L_2 i_2^2 + M i_1 i_2 \geqslant 0$$

En posant $x = \frac{i_1}{i_2}$, il vient que

$$\frac{1}{2}L_1x^2 + Mx + \frac{1}{2}L_2 \geqslant 0$$

Ce qui implique (au niveau du discriminant) que

$$|M| \leqslant \sqrt{L_1L_2}$$

Mais donc pour un transformateur parfait, on a l'égalité $M^2 = L_1L_2$. Ainsi les équations peuvent se réécrire

$$\begin{cases} \dfrac{u_1}{L_1} = \dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + \sqrt{\dfrac{L_2}{L_1}}\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \\ \dfrac{u_2}{\sqrt{L_1L_2}} = \sqrt{\dfrac{L_2}{L_1}}\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + \dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \end{cases}$$

Ce sont les même formes ! Et puisque l'on a vu que $L \propto N^2$, alors on retrouve le résultat de conversion d'un transformateur :

$$\frac{u_1}{u_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \frac{N_1}{N_2}$$

3 Courants de Foucault

3.1 Principe

✍ *H-Prépa, p.220*
✍ *Salamito, p.1087 ou p.1108 et 1127 sur l'édition 5*
✍ *Précis Bréal, p.158*

Soit un matériau conducteur mais non parfait (on verra pourquoi), genre un ferromagnétique, de conductivité γ finie soumis à un champ magnétique créé par des *sources extérieures* et dépendant du temps $\mathbf{B}_e = \mathbf{B}_e(t)$.

L'écriture de l'équation de Maxwell-Faraday permet de voir la création d'un champ électrique induit $\mathbf{E}_i$ dans le matériau :

$$\mathbf{rot}\,\mathbf{E}_i = -\frac{\partial \mathbf{B}_e}{\partial t}$$

En prenant alors en compte la conductivité *finie* du matériau, il vient un vecteur densité volumique de courant induit $\mathbf{j}_F = \gamma\mathbf{E}_i$.

Courants de Foucault
Dans un matériau conducteur réel (bloc de fer) de conductivité γ finie soumis à un champ extérieur $\mathbf{B}_e$ est parcouru par des courants induits appelés courants de Foucault :

$$\mathbf{j}_F = \gamma\mathbf{E}_i \qquad \mathbf{rot}\,\mathbf{E}_i = -\frac{\partial \mathbf{B}_e}{\partial t}$$

Loi de Ohm

La loi de Ohm se généralise comme

$$\mathbf{j} = \mathbf{E} + \mathbf{E_i}$$

On va faire un exemple pour bien comprendre : un conducteur cylindrique de rayon R et de hauteur h de volume $\mathcal{V} = \pi R^2 h$ soumis à un champ extérieur $\mathbf{B}_e = B_e \mathbf{e_z} = B_0 \ \cos{(\omega t)} \ \mathbf{e}_z$ parallèle à l'axe de révolution $\mathbf{e}_z$.

Pour trouver le champ électrique induit $\mathbf{E}_i$ nécessaire à la détermination des courant de Foucault, il faut déjà faire un peu de symétrie et invariance. $\mathbf{E}_i$ dépend pas de θ. En assimilant le champ en chaque point au champ extérieur, on a en un point M distant de l'axe de r on peut utiliser Maxwell-Faraday et trouver le champ $\mathbf{E}_i$

$$\mathbf{E}_i = -\frac{1}{2} r \frac{\mathrm{d}B_e}{\mathrm{d}t} \ \mathbf{e}_\theta$$

Ce qui permet de trouver les courant de Foucault :

$$\mathbf{j}_F = -\gamma \frac{1}{2} r \frac{\mathrm{d}B_e}{\mathrm{d}t} \ \mathbf{e}_\theta$$
$$\mathbf{j}_F = -\gamma \frac{1}{2} r \omega B_0 \ \sin{(\omega t)} \mathbf{e}_\theta$$

Remarques

— on peut représenter les courants de Foucault qui sont notamment plus importants loin de l'axe

— le champ magnétique créé par ces courants est dans le sens opposé au champ extérieur $\mathbf{B}_e$: rôle du signe - et loi de Lenz !

— le calcul réalisé l'a été à l'ordre 1, ie on ne prend pas en compte le champ magnétique crée par les courants de Foucault (il est négligeable mais il est là)

On peut calculer la puissance dissipée $\mathcal{P}$ par effet Joule par ces courants :

$$\langle \mathcal{P} \rangle = \langle \int_{\mathcal{V}} \mathbf{j}_F \cdot \mathbf{E}_i \ \mathrm{d}\tau \rangle$$
$$\langle \mathcal{P} \rangle = \frac{1}{\gamma} \int_{\mathcal{V}} \langle \mathbf{j}_F^2 \rangle$$
$$\langle \mathcal{P} \rangle = \frac{\mathcal{V}}{8} \gamma \omega^2 B_0^2 R^2 \langle \sin^2{(\omega t)} \rangle$$

La puissance volumique dissippée par effet Joule est donc :

$$\frac{\langle \mathcal{P} \rangle}{\mathcal{V}} = \frac{\gamma \omega^2 B_0^2 R^2}{16}$$

Notons qu'il s'agit bien d'une énergie **dissipée** et qu'elle peut être chiante. Typiquement dans les transformateurs où les courants de Foucault représentent une source de perte non négligeable (cf la biblio de la LP46).

On peut les contrôler de deux manières pour un métal donné :

— Jouer sur ω par la puissance en dépend fortement, en ω^2. faire attention car ω intervient aussi dans l'épaisseur de peau $\delta = \sqrt{\frac{1}{\gamma \mu_0 \omega}}$ qui détermine la pénétration du champ électromagnétique dans le conducteur

— Jouer sur la surface sur laquelle les courants de Foucault peuvent se développer. Pour limiter les courants de Foucault on peut donc limiter cette surface, comme c'est fait dans les transformateurs : c'est le **feuilletage**

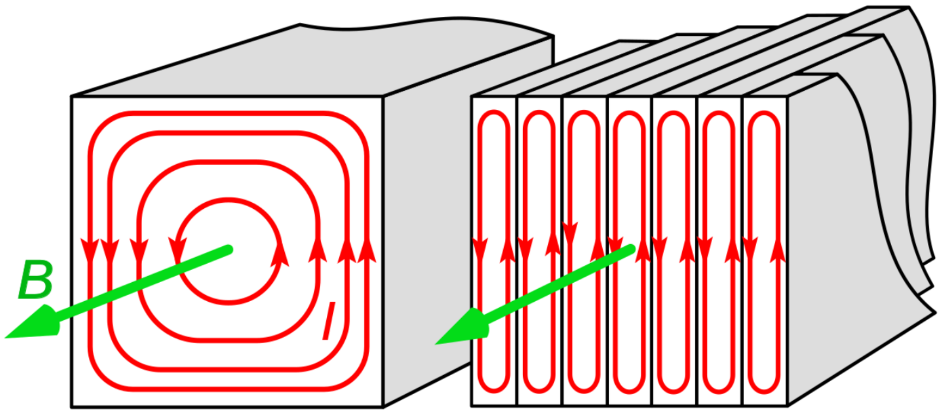


FIGURE 3.1 – **Feuilletage d'un ferro qui permet de limiter les pertes par courants de Foucault**

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

3.2 Chauffage par induction

✍ *Ray, p.73*
✍ *Garing, p.170*
✍ *Salamito ed.5, exo 31.6, p.1112*
La puissance dissipée par les courants de Foucault peut être utilisée à bon escient, et notamment pour le chauffage : tout le monde a déjà entendu parler des plaques de cuisine à induction. Eh bien c'est les courants de Foucault !

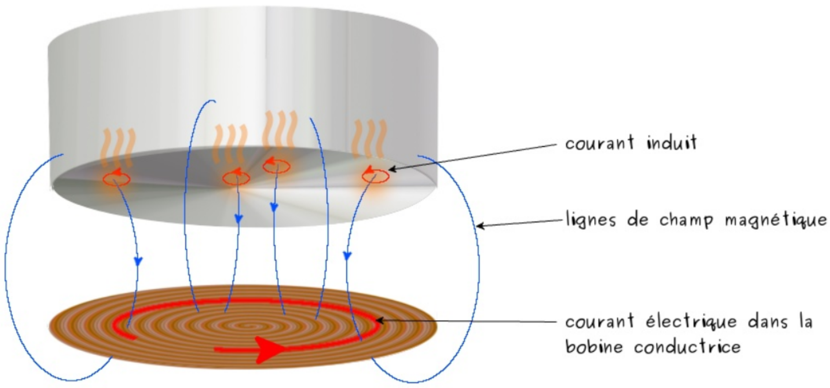


FIGURE 3.2 – **Chauffage par induction**

Une bobine située dans la plaque crée un champ magnétique, c'est l'**inducteur**. Le fond de casserole, qui doit être en métal conducteur, est donc parcouru par des courants de Foucault qui réchauffent l'eau en disspisant de la puissance par effet Joule.

Remarques

- ces plaques nécessitent donc une casserole en métal conducteur et ont un fond épais pour maximiser l'intensité des courants de Foucault et donc l'échauffement
- la plaque en elle-même n'est pas chauffée mais attention ell est contact avec le fond de la casserole donc chaude quand même..

— les plaques actuelles détectent le champ induit par les courants de Foucault pour détecter la présence d'une casserole et ainsi arrêter de produire le champ magnétique quand il n'y a plus de casserole
— même principe par les chargeurs sans fils de portable (on récupère juste le courant
— fort rendement (80 à 90%) baissé par l'effet Joule dans la bobine de l'inducteur

3.3 Freinage par induction

✍ *Garing*
✍ *H-Prépa, p.222*

On change d'induction, cette fois-ci c'est le conducteur qui bouge dans un champ constant. Mais le principe reste le même et il va y avoir création de courants de Foucault.
La force de Laplace sur ces courants va donc produire une force qui va ralentir le mouvement du disque (faire le raisonement qualitatif ou juste invoquer Lenz *Raiton ! La loi de modération de Lenz !*)

Remarques

— breveté depuis 1903 et première réalisation 1936
— dépend de la vitesse instantannée du disque donc ne permet pas un ralentissement total, ce système doit être utilisé en parallèle d'un autre système de freinage classique
— pas de contact = pas d'usure mécanique !
— par contre l'énergie perdue par échauffement (effet Joule toujours...) est perdue en pure perte, on peut pas la récupérer comme les véhicules classiques

Manip' : Chute d'un aimant dans un tube conducteur

✍ *Garing Magnétisme, p.163* ✍ *BUP 882, p.487*
La chute est ralentie par l'établissement de courants de Foucault dans le tube conducteur.

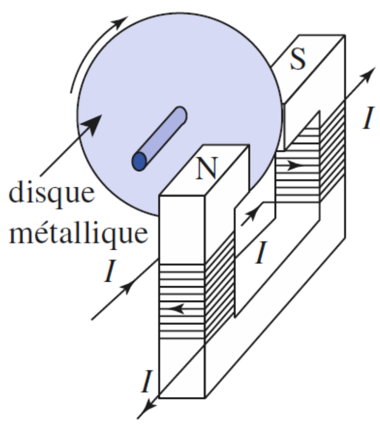


FIGURE 3.3 – **Système de freinage par induction**

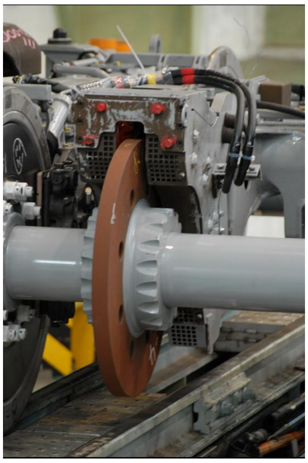


FIGURE 3.4 – **Système réel**

Questions

★ Est-ce qu'on a déjà vu de l'induction avant cette leçon ?

Oui les bobines, on balance la formule $u = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ *mais on sait pas d'où ça vient*

★ Dans l'ARQS $\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} = 0$, tu connais pas un cas particulier pour lequel c'est pas vrai ?

Dans un condensateur on peut avoir accumulation de charge, donc on ne peut pas négliger le courant de déplacement. Ça ne pose pas de problème d'application mais fondamentalement c'est un peu gênant.

★ Dans quel référentiels on se place ? Lequel est galiléen, l'autre peut ne pas l'être ? Tu fais une transformation des champs de GALILÉE ?

Fém dans ref du circuit et champ dans référentiel du labo. Transformation de GALILÉE *ou pas, c'est pareil tant que la vitesse de déplacement est faible.*

★ C'est troublant que $M_{12} = M_{21}$, on peut imaginer une grande bobine et une petite bobine...

On peut s'en convaincre avec des schémas. Sinon l'idée de la démo : l'énergie est une fonction d'état déterminée par i_1 *et* i_2. *On veut passer de* $(0, 0)$ *à* (i_1, i_2), *il y a deux moyens : soit on passe par* $(i_1, 0)$ *(donc induction de 1 vers 2), soit l'inverse.*

★ Est-ce que la présence d'un ferro change la forme de la cartographie du champ créé par une bobine ?

Non, on dit souvent "la matériaux canalise les lignes de champ" mais leur forme ne change pas... Par contre l'intensité est amplifiée dans le ferro donc ça revient finalement au même.

★ Modèle du transformateur parfait ?

Pas de courants de FOUCAULT *(pertes cuivre) ni d'hystérésis (pertes fer).*

★ Qu'est-ce qu'il se passe si on court-circuite le deuxième circuit après le transfo ?

On ne peut plus négliger la résistance du bobinage. En manip on peut voir que si le courant i_2 *augmente trop, on a un écart au modèle.*

★ Bande-passante du transfo ? Ça marche un transfo en continu ?

Il faut mettre la résistance de sortie en série.

★ Et en haute fréquence ?

Cette fois-ci c'est au niveau des courants de Foucault *qu'on a des problèmes.*

★ Quel est l'intérêt d'utiliser des hautes tensions de le transport d'EDF ?

Le consommateur interagit comme générateur (négatif $e = -Ri^2$) de courant : c'est le courant qui est utilisé, pas la tension. Faut donc diminuer les pertes en Ri^2 donc augmenter U (pour diminuer i).

★ Quelles sont les façons de feuilleter un matériaux ?

3 façons (en vrai plus mais bon) pour les trois directions de l'espace : il faut couper les courants de Foucault. *Faut pas feuilleter les plans perpendiculairement au champ* $\mathbf{B}$ *sinon les courants ne sont absolument pas contraints !*

Commentaires

— Les circuits équivalents sont des concepts mathématiques... Il faut le signaler quand on passe à des circuits physiques.

— C'est bien de préciser les conventions utilisées.

— Attention à bien faire la distinction entre fil infiniment fins ou pas : quand on parle de courants de Foucault c'est des courants volumiques !

— Attention pour Lenz "les conséquences s'opposent aux cause", mais ici la cause c'est pas le flux mais sa **variation**.

— Prenons un aimant permanent et un spire qui bouge dans son champ, regarder la variation du flux à travers la spire, c'est comme regarder le flux dans le cylindre formé par le déplacement de la spire. On retrouve ce résultat grâce à la conservation du flux de $\mathbf{B}$: $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$

— Donner des OdG pour L et M.

— Quand on parle du transfo, il faut donner les limitations notamment le fait que ça ne fonctionne qu'en régime variable (cf. questions).

— Le freinage provient du fait que le champ est inhomogène : il y a une zone de l'espace ou les courants de Foucault sont dans un sens, et une zone dans l'autre, donc globalement il n'y a pas de compensation.

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 ?

Qu'est-ce qu'il y a de particulier sur les transformateurs, pourquoi ? Feuilletage pour éviter les pertes par courants de Foucault.

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.

L21=L12, 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 ?