

LP21 – INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

17 juin 2021

Nicolas Barros & Abel Feuvrier

Oui
MR C

C'est comment qu'on freine

Alain Bashung, C'est comment qu'on freine ?

Niveau : MPSI

Commentaires du jury

Bibliographie

- ♣ *ÉM dans le vide*, **Jérémy Ferrand** → Bases et subtilités (changement de référentiel par exemple)
- ♣ *Dictionnaire de physique expérimentale IV*, **Quaranta** → Bobine, applications de l'induction
- ♣ *BFR3*, **BFR** → Chapitre 5, principalement sur auto et mutuelle induction
- ♣ *Tout en un PCSI*, **Salamito** → A chopper en B.U., ou en bu provisoire

Prérequis

- Électrocinétique
- Notion de champ magnétique, champ magnétique du solénoïde infini

Expériences

- ☛ Un petit truc qualitatif mise en évidence qualitative de la loi de Faraday
- ☛ Une animation historique cool

Table des matières

1	Lois de l'induction	2
1.1	Flux d'un champ magnétique	2
1.2	Loi de Faraday	3
1.3	Loi de Lenz	3
2	Induction, autoinduction	3
2.1	Autoinduction	3
2.2	Induction mutuelle	4
3	Applications	5
3.1	Transformateurs	5
3.2	Chauffage par induction, ou comment faire cuire ses nouilles avec un aimant	5
3.3	Freinage par induction	7

Introduction

☞ Quaranta IV page 116 On a pas de GBF, pas d'alim, rien. Et pourtant, quand on approche un aimant, on voit apparaître une fém. (Je pense que c'est mieux avec un galvanomètre, parce que comme ça y a vraiment rien de branché, l'énergie ne peut venir que du mouvement de l'aimant. À tester au labo si on a le temps)

Mise en évidence qualitative de la loi de Faraday

Bobine 1000 spires (P60.21/4), boîte à décades (P56.14/11), AO (P41.4/2), 2 LED (P29.12/4-P29.12/3), aimant plat

On réalise le montage de la figure 1. On approche un aimant : on voit apparaître une fém ; on le retire ou on l'approche dans l'autre sens : on voit apparaître une fém opposée.

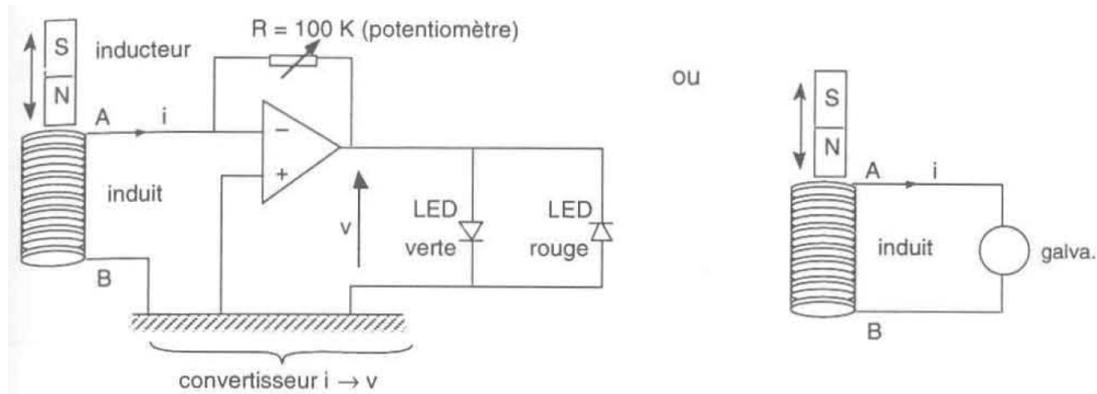


FIGURE 1 – Mise en évidence qualitative du phénomène d'induction (Quaranta)

Il y a donc une fém dont la source est la variation de flux magnétique. C'est ce qu'on appelle l'induction électromagnétique.

1 Lois de l'induction

☞ Cours Ferrand

1.1 Flux d'un champ magnétique

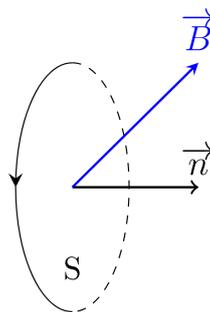


FIGURE 2 – Schéma à projeter/reproduire pour définir Φ_B

Avec les notations de la figure 2, on a :

$$\Phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1)$$

Faire remarquer que c'est algébrique et donner le cas d'un champ uniforme (qui sera le seul traité ici). Elle nécessite d'avoir orienté notre surface : on commence par définir un sens de parcours -ici représenté par la petite flèche sur le schéma. On utilise ensuite la convention de la règle de la main droite.

L'unité de flux magnétique est le Weber, de symbole Wb. On est pas beaucoup plus avancé.

1.2 Loi de Faraday

Petite parenthèse histoire des sciences, sir slide? : <http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/faraday/induction/index.php>. <http://histoires-de-sciences.over-blog.fr/2013/11/quand-faraday-d%C3%A9couvre-l%E2%80%99induction-%C3%A9lectromagn%C3%A9tique.html>. On sait depuis 1820 (expérience d'Oersted) qu'un courant électrique peut créer un champ magnétique. On cherche à présent la réciproque, comme le note Faraday dans son cahier "Convert magnetism into electricity". Les premières expériences menées par Fresnel, Colladon et Faraday lui-même sont des échecs : quelle que soit la configuration, on ne crée pas de courant. Cependant, Faraday remarque que son galvanomètre bouge pendant le régime transitoire : cette observation expérimentale va mener à la découverte de l'induction, et à la loi expérimentale de Faraday.

Alors en fait, dans l'ARQS¹ (Michel Faraday, 1831) :

$$e_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2)$$

où e_{ind} est la fém induite dans un circuit à travers lequel le champ \vec{B} a un flux Φ_B .

On leur a bien fait comprendre en intro, mais le rappeler : la source de cette fém n'est pas le flux de champ magnétique mais ses variations. Cette relation est valable quelle que soit la cause de variation du flux : que ce soit le courant produisant le flux variant, le circuit mobile, le champ magnétique variant, ou toutes ces réponses à la fois.

D'un point de vue pratique, tout se passe comme si on ajoutait dans le schéma électrocinétique du système étudié un générateur. La fém induite e est alors comptée positive dans le sens conventionnel positif du courant.

↓ Et le "-", on l'interprète comment ?

Y a une petite subtilité (cf Salamito p 1066) : l'expression de la fém induite dans le circuit n'est valide que si on peut définir un flux variable ϕ dans le circuit, et si le circuit coupe les lignes de champ magnétique dans son déplacement

1.3 Loi de Lenz

"Le champ électromoteur créé par la variation de flux crée un champ magnétique qui tend à s'opposer au champ qui lui a donné naissance."

Dire plutôt que les conséquences de l'induction ont tendance à s'opposer aux causes de l'induction ? En tout cas, prendre l'exemple d'une spire et faire le raisonnement habituel (B de la contrainte $\rightarrow e \rightarrow i \rightarrow B$ opposé). Il connaissent le champ créé par une bobine, une spire ça devrait passer.

↓ En fait on a déjà vu des dispositifs qui utilisent ce phénomène.

↪ Salamito p1073, BFR p101

2 Induction, autoinduction

2.1 Autoinduction

On va établir la relation de constitution de la bobine (qu'on connaît déjà mais qu'on avait admise à l'époque) $u = -L \frac{di}{dt}$ (en convention générateur sans perte de généralité).

On considère un solénoïde infini d'axe \vec{e}_z . (Il faut un schéma au tableau ou une diapo.) On a vu que lorsqu'on y fait passer une intensité i ² (dans la direction $+z$ avec la règle de la main droite), le champ magnétique produit s'écrit $\vec{B} = \mu_0 n i \vec{e}_z$ dans la bobine, **dans l'ARQS**.

Ce qui nous intéresse en induction ce sont les variations de flux magnétique à travers le circuit (oui on rabâche).

1. Ici l'ARQS magnétique, on est en sup ; mais être chaud ! cf cours de Ferrand
 2. Il me semble plus clair et plus cohérent avec les parties précédentes de voir i comme la contrainte et u comme le résultat. C'est assez contre-intuitif, en tout cas pour moi : on a l'habitude de voir le mouvement des corps comme la conséquence des différences de potentiel, et pas l'inverse. C'est moins choquant quand on écrit $\Phi_B = Li$.

Le flux magnétique s'écrit ici $\Phi_B = NS\mu_0 ni$. On définit L par la relation $\Phi_B = Li$, on a donc $L = N\mu_0 nS$ (indépendant de i) (une application numérique peut être sympa ici : pour $N=1000, l = 10$ cm, $R = 3$ cm, on arrive à $L = 36$ mH).

On a donc $\frac{d\Phi_B}{dt} = -L\frac{di}{dt}$.

On peut finalement appliquer le théorème de Faraday, qui nous donne ici :

$$u = -L\frac{di}{dt} \quad (3)$$

ce qui est bien la relation constitutive des bobines qu'on avait admise plus tôt dans l'année. On peut maintenant l'interpréter comme un phénomène d'induction, ou plus précisément d'autoinduction : le circuit inducteur est le même que le circuit induit. Cette fém s'oppose toujours à la variation de I , et interdit toute discontinuité dans l'intensité. l'étude d'un circuit RL permet de nous convaincre que l'inductance s'oppose aux variations de courant.

Etude énergétique : l'énergie magnétique d'un circuit d'auto-inductance L parcouru par un courant d'intensité i est

$$E_m = \frac{1}{2}Li^2 \quad (4)$$

↓ Mais le flux magnétique peut venir d'un autre système. D'ailleurs, on a toujours pas explicité l'expérience d'intro...

2.2 Induction mutuelle

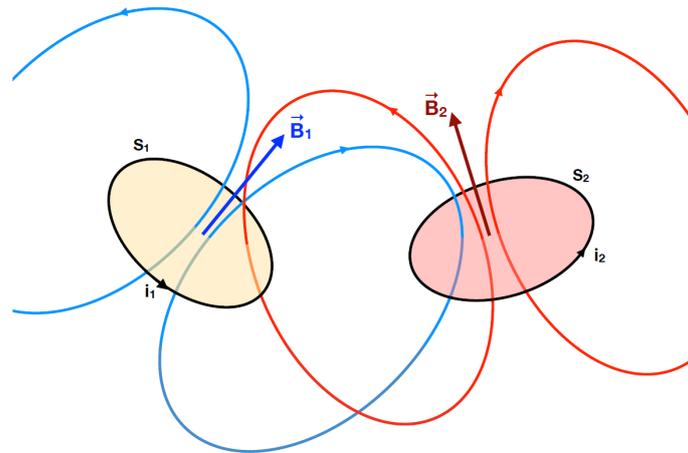


FIGURE 3 – Schéma d'induction mutuelle entre deux spires de courant

On se sert du schéma de la figure 3 pour convaincre les élèves qu'une spire (et a fortiori une bobine) peut créer un champ magnétique dans une autre spire (resp. une autre bobine). Vocabulaire à caser : flux propre, flux extérieur. On garde les notations de la figure et on donne le circuit équivalent³.

Finalement, on attaque :

$$\begin{cases} \Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{21} = L_1 i_1 + M i_2 \\ \Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{12} = L_2 i_2 + M i_1 \end{cases} \quad (5)$$

Donc, en appliquant la loi de Faraday (ne pas la détailler, ils ont compris, tkt) :

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

Énergétiquement, comme on a $P_m = u_1 i_1 + u_2 i_2$, on arrive à l'énergie magnétique E_m (détailler le calcul, c'est explicitement au programme) :

3. notion instinctive mais importante!

$$E_m = \frac{1}{2}L_1 i_1^2 + \frac{1}{2}L_2 i_2^2 + M i_1 i_2 \quad (7)$$

On a un terme de couplage, sans trop grande surprise.

↓ Et dans la vraie vie ça sert à quoi ?

3 Applications

3.1 Transformateurs

On a encore au tableau le schéma des inductances couplées, on peut donc faire facilement apparaître le quadripôle qu'elles constituent et embrayer avec les transfos : c'est le cas du couplage parfait. Balancer les schémas des transfos de la LP46 (figure 4), expliquer l'intérêt du noyau ferromagnétique et sortir la loi de transformation des tensions vite fait.

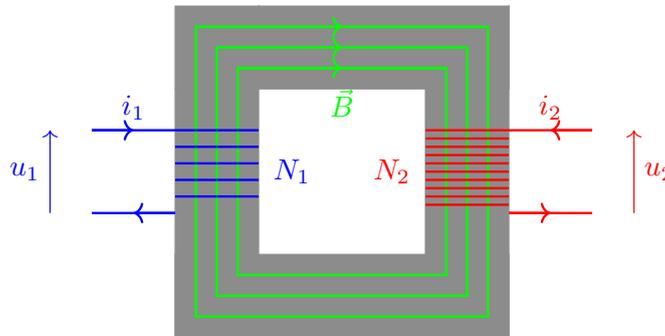


FIGURE 4 – Schéma de transformateur

On se place dans l'approximation du transformateur parfait⁴, donc pas de fuite de champ magnétique ni de phénomène dissipatif. Donc le noyau conduit parfaitement le champ magnétique : on a $\Phi_1 = \Phi_2$.

Donc la loi de Faraday donne :

$$-\frac{d\Phi}{dt} = \frac{u_1}{N_1} = \frac{u_2}{N_2} \quad (8)$$

Utilité : augmenter la tension dans les lignes pour le transport/l'abaisser pour les particuliers. Ici on peut éventuellement caser une petite manip de démo si il reste trop de temps, mais j'y crois pas trop.

3.2 Chauffage par induction, ou comment faire cuire ses nouilles avec un aimant

☛ Salamito p1092, BFR p101

Quand on balance un champ magnétique dans un conducteur, ça provoque un courant, et on appelle ça des courants de Foucault. Et on sait aussi que quand y a des courants dans un conducteur y a de l'effet Joule. Donc quand on balance un champ magnétique dans un conducteur y a de l'effet Joule, et il chauffe. C'est le principe des poêles à induction. On peut expliquer tout ça qualitativement avec la figure 5.

Compléments culturels :

- ces plaques nécessitent donc une casserole en métal conducteur (par exemple ferromagnétique) et ont un fond épais pour maximiser l'intensité des courants de Foucault et donc l'échauffement, ainsi qu'une répartition homogène de la chaleur
- — fort rendement (80 à 90%) baissé par l'effet Joule dans la bobine de l'inducteur. c'est environ 20% moins que les plaques en fonte.

4. on peut pas le définir complètement à ce niveau, mais être prêt pour les questions, go LP46

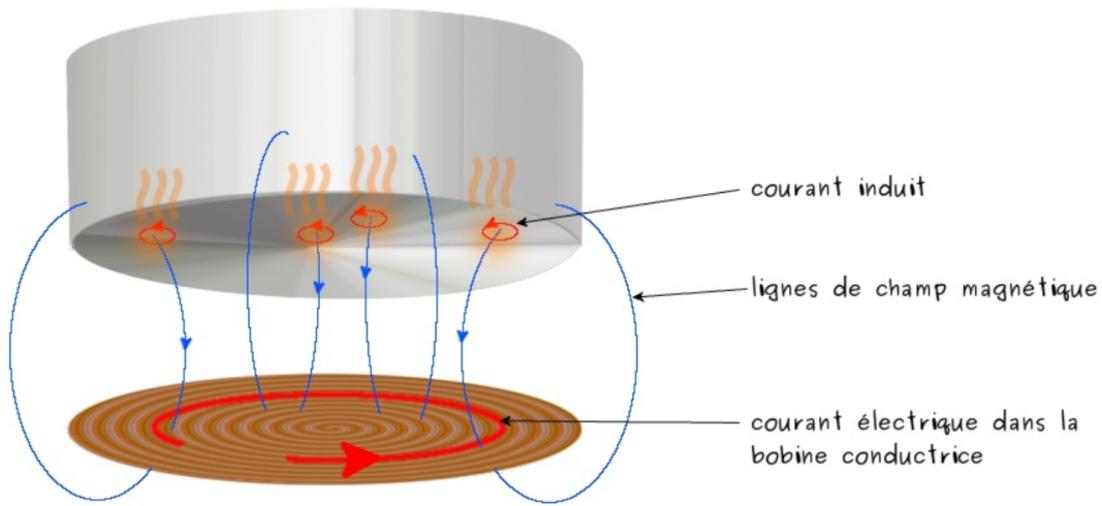


FIGURE 5 – Schéma du principe du chauffage par induction (Cléments)

Maintenant le gros exo si on a le temps (typiquement 5 minutes, sinon passer à la conclusion). :

En pratique on a dans la table en céramique un bobinage nommé inducteur alimenté en courant sinusoïdal. On choisit des fréquences en général très élevées (25 kHz), car vous savez maintenant très bien que c'est les variations de champ magnétique qui nous intéressent. ça donne à peu près ça :

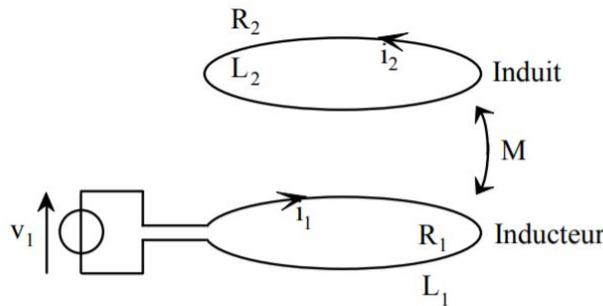


FIGURE 6 – Modélisation de l'ensemble plaque-inducteur comme deux circuits couplés par inductance mutuelle. On remarquera qu'on a bien placé v_1 dans le sens de i_1 , en convention générateur

Pour les curieux, on a : $R_1 = 1,8 \cdot 10^{-2} \Omega$, $R_2 = 8,3 \cdot 10^{-3} \Omega$, $L_1 = 30 \mu H$, $L_2 = 0,24 \mu H$, $f = 25 kHz$, $V_1 = 110V$, $M = 2,0 \mu H$

On commence par la modélisation du circuit électrique équivalent, qui va réutiliser les éléments vus dans la partie 2.

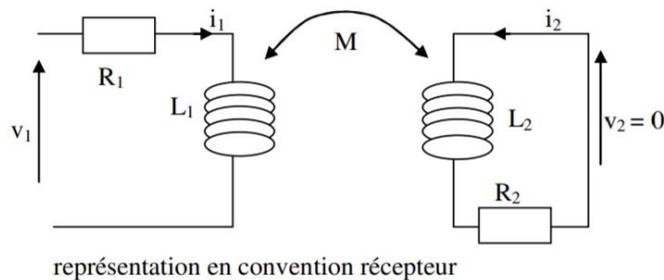


FIGURE 7 – On représente tout ça avec un joli schéma au tableau.

On ramène notre problème à un problème d'électrocinétique, que l'on sait très bien résoudre. On commence par les équations électriques dans les deux circuits.

$$\begin{cases} V_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ 0 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

Aaargh un système couplé. Go passer en complexe. En toute rigueur - et devant le jury - bien dire qu'on passe en complexe avec les petits traits en dessous des lettres là.

$$\begin{cases} V_1 = (R_1 + jL_1\omega)i_1 + jM\omega i_2 \\ 0 = (R_2 + jL_2\omega)i_2 + j\omega M i_1 \end{cases} \quad (10)$$

Et on en tire :

$$\begin{cases} i_2 = \frac{-jM\omega}{R_2 + jL_2\omega} i_1 \\ V_1 = i_1 \left(R_1 + jL_1\omega + \frac{M^2\omega^2}{R_2 + jL_2\omega} \right) \end{cases} \quad (11)$$

Le but ça va être d'essayer d'estimer les puissances dissipées dans l'inducteur et dans l'induit. On va donc essayer d'obtenir les intensités i_2 et i_1 .

C'est l'heure des approximations (en vrai, les faire avant les calculs bien sûr)! On en souvient qu'on prend des des grosses fréquences, qu'on choisit telles que $R_1 \ll L_1\omega$ et $R_2 \ll L_2\omega$.

$$\begin{cases} i_2 = \frac{-M}{jL_2} i_1 \\ V_1 = i_1 \left(jL_1\omega - \frac{M^2\omega}{L_2} \right) \end{cases} \quad (12)$$

Deux coups de baguettes magiques plus loin on obtient les puissances et on fait les applications numériques. Attention, on est repassé en réel.

$$\begin{cases} P_1 = R_1 I_1^2 = \frac{R_1 V_1^2}{\omega^2 (L_1 - \frac{M^2}{L_2})^2} = 50W \\ P_2 = R_2 I_2^2 = \frac{M^2 R_2 V_1^2}{\omega^2 (L_1 L_2 - M^2)^2} = 1590W \end{cases} \quad (13)$$

Le rendement semble pas trop mal, on chauffe bien davantage l'induit! Attention quand même à pas mettre ses mains sur la plaque apres cuisson, y a quand meme des echanges thermiques. D'ailleurs si on sort la poêle du feu ($M=0$), ou si juste on l'éloigne, P_2 diminue, ça semble bien marcher

3.3 Freinage par induction

Je pense qu'on peut s'en sortir sans les forces de Laplace, avec juste la loi de Lenz.

On a vu que dans le cas où la source des variations de flux magnétique était magnétique (variation de \vec{B}), l'induction créait des champs \vec{B} opposés.

Et si la source de variation de flux magnétique est mécanique (chute d'un aimant dans un tube conducteur, un peu comme dans l'expérience d'intro)? L'induction va s'opposer à la chute, c'est-à-dire freiner l'aimant.



Freinage par induction

On fait tomber un petit aimant en néodyme à travers un tube de cuivre : il met des plombes. On peut aussi le faire tomber à travers un tube de plastique pour se convaincre que c'est pas les frottements solides qui ralentissent tant sa chute.

Ce principe est utilisé pour freiner d'autres trucs, genre des bagnoles. Et ça nous fait une belle transition vers la conclusion.

Conclusion

Ouvrir sur la force de Laplace, l'induction de Lorentz et la conversion électromécanique.