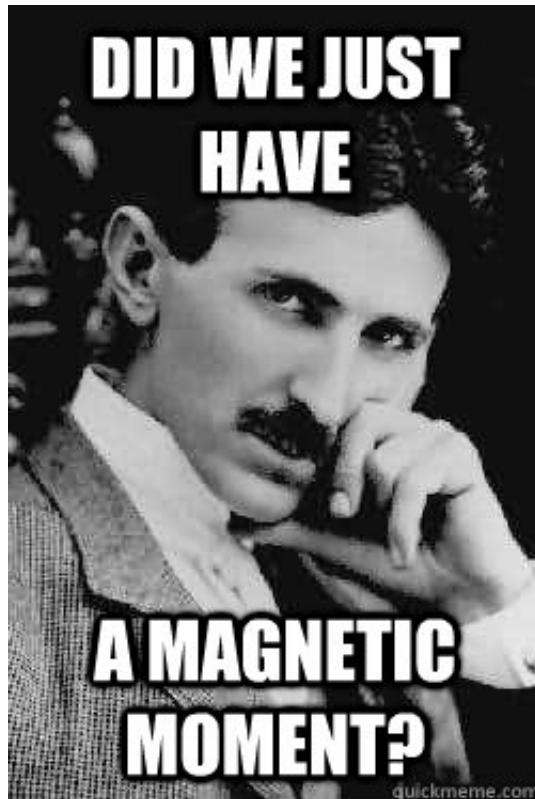


# LP21 : Induction électromagnétique



## Prérequis :

Niveau : L1

- Champ magnétique (aimant, spire, bobine, règle de la main droite, . . .)
- Actions du champ magnétique (forces de Laplace, moment magnétique)
- Electrocinétique (conventions générateur/récepteur, bobine, loi des mailles)

## Bibliographie :

- ☞ *Tout en un Physique PCSI* - Dunod, B. Salamito [1]
- ☞ *Hprep* [2]
- ☞ *Electromagnétisme 3* - Bertin, Faroux, Renaud [3]

## Rapports de jury :

**2015** : *L'algébrisation rigoureuse des grandeurs électriques et mécaniques est nécessaire lors de la paramétrisation.*

**2014** : *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.*

## Introduction générale de la leçon :

*Qu'est-ce que l'induction ? Comment mettre en évidence ce phénomène et quelles en sont les utilisations dans la vie de tous les jours ?*

Lorsqu'on place une boussole proche d'un fil électrique alimenté par un courant continu, on observe un alignement de la boussole, ce qui s'explique par le fait qu'un fil conducteur parcouru par un courant constant produit un champ magnétique constant. Ce résultat est énoncé par **André-Marie Ampère** en 1820. La communauté scientifique de l'époque se demanda s'il était possible de réaliser l'effet inverse : produire un courant constant à l'aide d'un champ magnétique constant.

En essayant de mettre en évidence ce phénomène, **Michael Faraday** découvre en 1831 l'induction électromagnétique.

Mettre en évidence le phénomène d'induction :

**Manip** : Une bobine, un aimant droit et une ampoule/oscillo. On montre que l'ampoule s'allume quand on s'approche de la bobine avec l'aimant et qu'il ne se passe rien si on ne bouge pas l'aimant par rapport à la bobine.

Les variations du champ magnétique donnent naissance à une tension, dite *induite*, c'est l'**induction électromagnétique**.

*Transition : On va essayer de comprendre cette expérience et la théoriser.*

## Proposition de plan :

### I) Phénomène d'induction électromagnétique :

#### I-1) Flux magnétique :

Le champ magnétique *traversant le circuit* varie dans le temps. Il est donc commode d'introduire une grandeur qui quantifie cette variation, le **flux magnétique**.

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

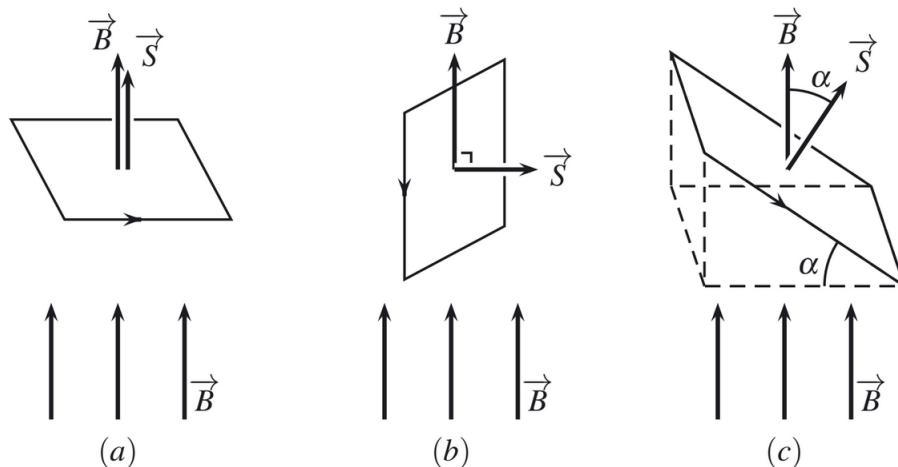
Où S est la surface de la spire. Ce flux est une grandeur *algébrique*. Son signe dépend du choix de l'orientation de la spire et il est changé en son opposé si le champ magnétique change de sens.

Unité le Weber : Wb = T.m<sup>2</sup>

Remarque :

- Dans le cas d'un champ magnétique uniforme,  $\varphi = \vec{B} \cdot \vec{S}$ .
- Pour une bobine,  $\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i$  avec  $\varphi_i$  le flux magnétique traversant la i<sup>ème</sup> spire.

Exemple :



*Transition : Lorsqu'il découvre l'induction électromagnétique en 1831, Faraday comprend que la variation du flux magnétique entraîne l'apparition d'un courant dans la bobine.*

### I\_2) Loi de Faraday :

Il énonce alors une loi qui porte son nom :

#### Loi de Faraday :

Le courant induit dans le circuit est égal à celui que produit un générateur fictif dont la force électromotrice  $e$ , appelée **force électromotrice induite** (notée **f.é.m induite** est donnée par :

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (2)$$

Avec  $\varphi$  le flux magnétique dans le circuit.

*Transition : Cette loi est contenue dans une loi plus générale, la loi de Lenz.*

### I\_3) Loi de modération de Lenz :

Loi empirique qui s'énonce comme suit :

#### Loi de Lenz :

Les phénomènes d'induction s'opposent, par leurs effets, aux causes qui leur ont donné naissance. Ce sont les conséquences électriques, mécaniques, électrocinétiques de la variation de flux qui s'opposent à la variation de flux.

Cette loi a son importance car la loi de modération de Lenz peut faire intervenir des actions autres qu'électriques (mécaniques par exemple).

diapo

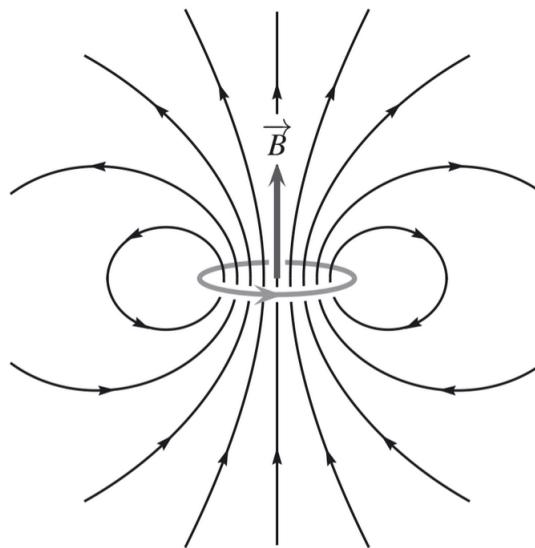
*Transition : Dans l'expérience d'introduction nous étions dans le cas d'un circuit fixe mais avec un champ magnétique variable. Quels sont les phénomènes mis en jeu ?*

## II) Circuit fixe dans un champ magnétique variable :

C'est l'induction de Neumann.

### II.1) Auto-induction, inductance propre :

Une spire parcourue par un courant  $i$  crée un champ magnétique  $B$  dont les lignes de champ s'enroulent autour de la spire. Le champ  $B$  traverse donc le circuit, ainsi le flux magnétique qui passe au travers de la spire est non nul.



Ce flux est appelé **flux propre**, noté  $\varphi_p$ . Ce flux sera proportionnel à  $B$ , et  $B$  est proportionnel à  $i$ , on peut donc écrire :

$$\boxed{\varphi_p = Li} \quad (3)$$

Avec **L l'inductance propre**.

Remarque : L est toujours positive.

*Transition : Que vaut l'inductance propre de notre bobine ?*

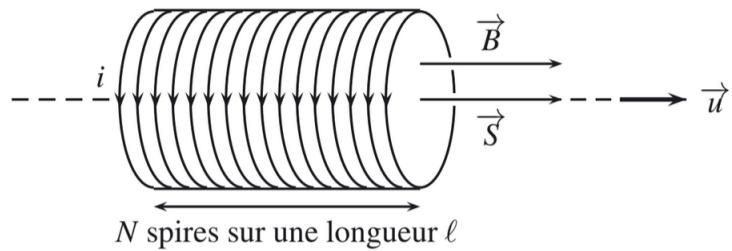
### II.2) Calcul de l'inductance propre :

Nous pouvons en effet calculer son inductance, étant donné que nous connaissons l'expression du champ magnétique à l'intérieur.

$$\vec{B} = \mu_0 \frac{N}{l} i \vec{u} \quad (4)$$

Et si  $\vec{B}$  est constant, avec une surface fixe alors le flux magnétique dans la bobine est :

$$\varphi_p = N \varphi_{spire} = N \vec{B} \cdot \vec{S} = \mu_0 \frac{N^2}{l} S i = Li \quad (5)$$



Si on prend une surface orientée dans le même sens que le champ  $\vec{B}$ .

Finalement,

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S \quad (6)$$

### Calcul numérique pour la bobine de l'expérience.

*Transition : Si il y a un flux qui traverse notre bobine et qu'il est variable dans le temps, alors il y a apparition d'une force électromotrice.*

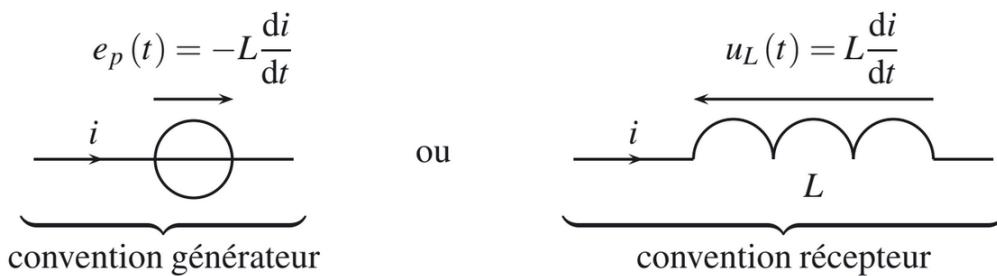
### II-3) Schéma électrique équivalent :

On appelle cette tension une **force électromotrice auto-induite**.

Elle vaut :

$$e_p(t) = -\frac{d\phi(t)}{dt} = -L \frac{di(t)}{dt} \quad (7)$$

Ainsi pour tenir compte de ce phénomène on modifie le schéma électrique de la bobine :



La puissance cédée au circuit par la bobine est

$$\mathcal{P} = L \frac{di(t)}{dt} i(t) = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L i(t)^2 \right) \quad (8)$$

Remarque :

- Ceci est cohérent avec la loi de Lenz, on a bien un dipôle qui s'oppose au passage du courant, soit à la cause qui lui a donné naissance (si  $\frac{di(t)}{dt} > 0$  alors  $e_p(t) < 0$ ).
- On retrouve l'énergie magnétique d'une bobine :  $\mathcal{E}_{mag} = \frac{1}{2} L i(t)^2$

**II-4) Inductance mutuelle :**

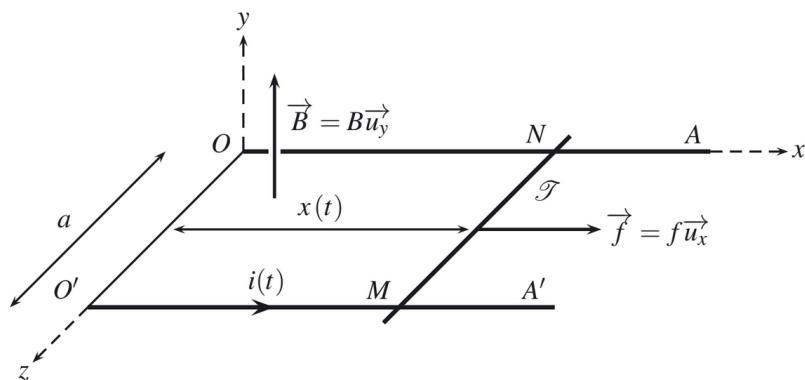
Le champ magnétique peut aussi provenir d'un autre circuit !  
diapo

Cette propriété est notamment utilisée dans les transformateurs afin de diminuer la tension lors de l'acheminement de l'électricité.

*Transition : On s'est intéressé au cas du circuit fixe dans un champ magnétique variable, mais il y a aussi un phénomène d'induction dans le cas d'un circuit variable dans un champ magnétique fixe ! (Lorentz)*

**III) Circuit déformable dans un champ magnétique stationnaire :**

C'est l'induction de Lorentz.

**III\_1) Rails de Laplace :**

Un tige conductrice mobile placée sur deux conducteurs fixes appelés rails de Laplace. L'ensemble est soumis à un champ  $B$  uniforme perpendiculaire aux rails. On branche un générateur  $E$  qui délivre une tension et un courant.

Étant donné que le barreau est conducteur est soumis à un champ magnétique, il subit la force de Laplace. La tige se met alors en mouvement dans un champ magnétique dont elle coupe les lignes de champ. Si on néglige les frottements, on est sensé obtenir une vitesse de barreau infinie, mais ce n'est pas ce qu'on observe. C'est à cause d'un phénomène d'induction, il y a apparition d'une fem induite qui s'oppose à celle du générateur.

*Transition : Essayons alors d'établir les équations du système.*

**III\_2) Équations :****Équation mécanique :**

- Système : barreau de masse  $m$
- Système : Bilan des forces (poids, support, Laplace)
- Système : PFD projeté sur  $\vec{e}_x$  :

$$m \frac{dV_x}{dt} = iBa \quad (9)$$

Si on intègre par rapport au temps sans prendre en compte le phénomène d'induction on obtient une vitesse infinie. Cependant  $i = i(t) \neq 0$ . En effet  $\varphi = Bax$ , donc  $e = -BaV_x$ .

On peut donc faire un schéma électrique équivalent en prenant en compte un générateur de tension induite :

### Équation électrique :

On applique la loi des mailles (les phénomènes d'induction sont valables dans le cas de l'ARQS).

$$E + e_{ind} = Ri(t) \quad (10)$$

En combinant les deux équations on trouve une équation différentielle linéaire d'ordre 1 à coefficients constants que nous savons résoudre.

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{aB}{m} \frac{(E - BaV_x)}{R} \quad (11)$$

Finalement on trouve :

$$\begin{cases} V_x(t) = V_{lim}(1 - \exp(-\frac{t}{\tau})) \\ i(t) = \frac{E}{R} \exp(-\frac{t}{\tau}) \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} V_{lim} = \frac{E}{Ba} \\ i(t) = \frac{E}{R} \exp(-\frac{t}{\tau}) \end{cases}$$

*Transition : Afin d'interpréter ces équations, nous pouvons réaliser un bilan de puissance sur le système.*

### III\_3) Bilan de puissance :

diapo

$$\begin{cases} (EM).v \\ (EE).i \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m \frac{dv}{dt} v \\ Ei + ei \end{cases} = iaBv \Rightarrow \begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} mv^2 \right) = iaBv \\ Ei - iaBv = Ri^2 \end{cases}$$

$$Ei = Ri^2 + \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} mv^2 \right) \quad (12)$$

$$\mathcal{P} = \mathcal{P}_{joule} + \frac{d}{dt} (E_c) \quad (13)$$

Une partie de la puissance est dissipée par effet joule, l'autre est celle qui a servit à mettre en mouvement le barreau.

### Conclusion :

En conclusion, nous avons compris ce qu'était le phénomène d'induction et plus généralement l'application de la loi de Lenz dans cette leçon. Cette loi est en effet une loi très générales de la physique et des principes de modérations (citer le Châtelier). Ces lois sont la traduction de la convergence des systèmes vers l'équilibre. L'induction a des applications très intéressantes, freinage, plaques à induction (chauffage par courant de Foucault), etc.

## Remarques et questions

### Remarques :

Bonne leçon pour quelque chose niveau L1. Le plan est très classique, le point méthode à la fin très apprécié. Nécessite pas mal de culture si faite niveau L2, et pour la réponse aux questions. Il faut bien maîtriser les moteurs, les courants de Foucault, tout ce qu'on aime :).

### Questions :

- Dates Lenz, Faraday ? 1834, 1831.
- Fem dans les cas Neumann, Lenz avec eq de Maxwell ? Il faut intégrer l'équation de Maxwell Faraday.
- Est-ce qu'il y a toujours une fem ? Non il faut un circuit filiforme et pas de contact glissant.
- Induction Neumann + Lorentz ? C'est possible, il faut sommer les fem de chaque phénomène d'induction. En pratique : On approche un aimant d'une bobine parcourue par un courant sinusoïdal.
- Pourquoi  $B$  respecte la règle de la main droite ? C'est la définition du rotationnel. Un champ tourne autour de son rotationnel.
- Attention  $L > 0$  forcément mais le signe de  $M$  est arbitraire.
- Comment montrer que  $M_{12} = M_{21}$  ? C'est le **théorème de Neumann**, la preuve est faite en utilisant Maxwell Faraday et Biot et Savart.
- C'est quoi l'ARQS magnétique ?
- Lorsque on utilise le T de Stokes, c'est quoi la surface ? La surface du contour fermé. Pour un volume on prend la surface d'un volume.
- D'où vient  $i d\vec{l} \wedge \vec{B}$  ? C'est Lorentz macro. Faire la preuve.
- Dépendance en fréquence des plaques à induction ?
- Application de la leçon : Freinage par induction (camion, TGV) (création de courants de Foucault). La fin de la leçon est bien mais il ne s'applique pas au camion. Induction  $\rightarrow$  Courants de Foucault  $\rightarrow$  Dissipation effet joule, l'énergie est puisée de  $E_{cin}$ .
- Quel est le rôle de l'induction pour une onde qui rentre dans un conducteur plasma/métal ? Création de courants de Foucault, ils restent en surface par effet de peau.
- Condition pour avoir des courants de Foucault ? Il faut que le circuit ne soit pas filiforme et faire un champ  $E$  variable.
- Quelle est la dépendance en fréquence des courants de Foucault ?  $\delta = \sqrt{\left(\frac{2}{\mu_0 \gamma w}\right)}$ .
- Quelle est leur géométrie ? Ils sont circulaires, on applique Maxwell Faraday et la loi d'Ohm locale en régime variable.  $\frac{1}{\sigma} \vec{rot}(\vec{j}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ .
- Donc pour le chauffage à induction, comment faire pour que ça chauffe ? Pas de HF sinon  $\delta$  faible. Pas basse fréquence car  $\delta$  proportionnel à  $w$ . Il faut se placer à un fréquence intermédiaire (genre 5kHz).
- Quelle est l'origine du champ  $B$  terrestre ? Ce n'est pas en bougeant le métal qu'on crée  $B$  car on est bien au delà de Tcurie. Le centre de la Terre est un milieu conducteur, convectif. C'est le champ magnétique du soleil (des tempêtes solaires) qui lance ce phénomène qui est auto-entretenue sur Terre, d'où le fait que le pôle sud magnétique se déplace (au Canada actuellement).

- Quel est le fonctionnement du transfo ?  $i$  variable
- Exemples de courants de Foucaults gênants ? pertes cuivres, guide d'onde pertes par courant de Foucault si métal parfait.