

# CORRECTION DE LA LP21 : INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Mardi 5 Décembre 2017

Samuel Boury <sup>1</sup>, Jean-Yonnel Chastaing <sup>2</sup>

*Préparation à l'Agrégation de Physique option Physique 2017-2018, Ecole Normale Supérieure de Lyon*

**Remarque préliminaire :** Les éléments de correction qui sont donnés à l'oral et dans cette fiche correctrice portent sur la leçon qui a été présentée, et uniquement sur celle-ci. Le choix du contenu de la leçon et la façon dont elle a été présentée sont deux choses différentes. Par ailleurs, il n'y a pas de plan parfait pré-établi ; nous vous donnons uniquement des références et des pistes de réflexion pour qu'ensuite vous fassiez vos propres choix.

## Quelques commentaires généraux

La leçon présentée comportait de bonnes idées et globalement une bonne démarche. L'approche choisie, d'abord phénoménologique puis avec les équations de Maxwell, permet de bien couvrir le problème. L'induction étant depuis peu au programme de première année de prépa, vous pouvez tout à fait construire la leçon différemment en ne parlant pas des équations de Maxwell, à condition bien sûr d'adapter le propos.

Le lien entre le champ magnétique et les courants induits était bien expliqué et toujours en filigrane, les allers-retours entre les deux grandeurs étaient appréciables. Il est cependant dommage de ne pas avoir mentionné explicitement les courants de Foucault pendant la leçon.

À ce sujet, vous pouvez inclure la démonstration du circuit électrique équivalent, faisant apparaître l'expression de la force électro-motrice et des courants de Foucault. Elle n'est pas difficile à faire et permet de bien visualiser ce que vous faites lorsque vous mentionnez des "circuits équivalents". Comme c'était le cas, les circuits doivent toujours être orientés, on vous le reprochera si vous ne le faites pas.

Vous pouvez imaginer de nombreuses applications : freinage d'une roue, d'un aimant dans un tube, pince ampèremétrique, transformateur, moteur, chauffage par induction, etc. N'essayez pas de toutes les couvrir, mais maîtrisez bien celles que vous choisissez et essayez de faire preuve d'originalité pour réveiller un peu le jury en fin de journée.

Dans l'ensemble, les idées théoriques importantes étaient présentes et judicieusement exposées, mais les applications décevantes et insuffisamment exploitées. Alors qu'il y avait un véritable souci d'interpréter physiquement ce qui se passait avec les lois de Lenz et de Faraday, puis les équations de Maxwell, cette préoccupation disparaissait malheureusement au profit des calculs dans les applications.

Par ailleurs :

1. Ne marquez jamais de résultats qui soient sans unités ou inhomogènes. En particulier, n'écrivez jamais une égalité entre un vecteur et un scalaire, ça se voit ! Il n'y avait aucune unité d'un bout à l'autre de la leçon, alors que des rayons, des champs, des intensités, des fréquences, des puissances, des inductances, etc, étaient présents tout le temps !

---

1. [samuel.boury@ens-lyon.fr](mailto:samuel.boury@ens-lyon.fr)

2. [jeanyonnel.chastaing@ens-lyon.fr](mailto:jeanyonnel.chastaing@ens-lyon.fr)

2. Il est impératif d'aller au bout des choses : un calcul de puissance dissipée, d'inductance, etc, ne sert à rien s'il est présenté seul. Dans ces cas le calcul importe même peu, on attend davantage que le résultat soit commenté : quelle unité ? quels rôles ont les différents paramètres ? application numérique ?
3. N'hésitez pas à écrire autre chose que des formules au tableau. L'idée de la leçon est de présenter un simili-cours, on retient ce qui est écrit, donc usez de la craie pour laisser de vraies phrases pour les définitions, les hypothèses des modèles, vos étapes de raisonnement ...
4. Soyez cohérents dans les notations : ça semble être du détail, mais écrire  $\nabla^2$  au lieu de  $\Delta$  pour le laplacien alors que toutes les formules sont avec **grad**, **div** et **rot** n'est pas judicieux.
5. Au passage, n'oubliez pas que ces trois abréviations sont les seules que vous avez le droit d'écrire, et les seuls mots que vous pouvez intégrer à des expressions mathématiques avec  $=$ ,  $\Sigma$ , ...
6. Toujours sur les notations, quand une grandeur ne dépend que d'une variable on utilise une dérivée droite (totale) et non une dérivée ronde (partielle).

## Sur la leçon elle-même

L'introduction, et le début de la leçon en général, étaient assez bien motivés : adopter une approche phénoménologique et physique de l'induction par les lois de Lenz et de Faraday permettait d'amener de nombreuses considérations expérimentales et de bien expliquer le phénomène d'induction avant de rentrer dans le vif du sujet en déroulant les équations de Maxwell et les potentiels. Évitez toutefois de commencer la leçon par : "Bonjour, aujourd'hui je vais vous présenter la leçon ...", ce type de phrase change la perspective du jury de "il va nous raconter quelque chose d'intéressant" en "il est obligé d'être là". Partez directement dans le vif du sujet, le titre de la leçon est de toutes façons écrit au tableau.

Introduire le phénomène d'induction électromagnétique et la loi de Lenz par l'expérience très simple de l'aimant que l'on fait passer à travers une bobine créant un courant est un bon point, mais il est dommage de ne pas aller au bout des choses : montrez simplement que bouger la bobine quand l'aimant est fixe produit le même phénomène, vous illustrez ainsi Neumann et Lorentz dont vous pouvez parler ensuite.

## 1 Force électro-motrice et courant induit

Poser la loi de Faraday comme une loi empirique est un choix qui se défend historiquement et qui permet de bien discuter du lien entre le champ magnétique et la force électromotrice produite. N'oubliez pas de revenir soigneusement dessus lorsque vous abordez les équations de Maxwell. Dans le cas de l'induction de Neumann comme de Lorentz cette loi peut-être redémontrée. Attention aux conditions nécessaires pour l'appliquer, vous pouvez garder en tête des exemples non triviaux : les rails de Laplace (changement de taille du circuit, mais la loi reste valide), une bobine dont on fait varier le nombre de spires (la loi ne s'applique pas) ou encore la roue de Barlow (la loi ne s'applique pas non plus).

Si vous choisissez d'aborder l'induction avec un formalisme mathématique, vous avez besoin de trois choses :

1. L'hypothèse de l'ARQS magnétique, à ne pas confondre avec l'ARQS électrique, pour laquelle vous devez être précis dans les hypothèses. Le fait de négliger les temps de propagation des ondes électromagnétiques compte tenu des distances parcourues découle en fait directement de l'expression des potentiels retardés pour  $V$  et  $\mathbf{A}$  dans laquelle on néglige le retard des ondes. N'oubliez pas cette approximation dans la suite de la leçon : elle est valable pour des fréquences usuelles comme le 50Hz, mais pas pour des hyperfréquences à 10MHz. Soyez donc prudents en disant que pour maximiser des effets inductifs il faut augmenter la fréquence !

2. Les équations de Maxwell, avec les approximations de l'ARQS magnétique. Au passage, dire et écrire que  $\nabla \cdot \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$  est du plus mauvais effet, quand bien même vous le corrigez quelques minutes plus tard.
3. La loi d'Ohm locale pour fermer le système. Vous n'avez pas à la redémontrer, elle a tout à fait sa place en prérequis, mais dites quand même que vous savez qu'elle vient du modèle de Drude.

Les démonstrations se font ensuite facilement en passant par les potentiels  $V$  et  $\mathbf{A}$ , mais vous pouvez vous contenter d'en donner les définitions sans les formules complètes, ou utilisez judicieusement un transparent pour ne pas perdre de temps.

Les inductions de Neumann et de Lorentz sont en fait la même chose, le point de vue adopté est seulement adapté aux systèmes que l'on considère. Si vous choisissez de faire la démonstration pour les deux, précisez clairement votre démarche et les champs électromoteurs obtenus. Selon ce que vous envisagez de faire, vous pouvez d'emblée dire que vous ne vous concentrez que sur l'une des deux inductions, mais ne vous privez pas de donner un exemple concret pour chacune d'elles.

## 2 Applications

Deux applications ont ensuite été présentées. Selon l'organisation de la leçon, vous pouvez très bien les intégrer aux développements sur l'induction de Neumann, de Maxwell, ou des courants de Foucault (si vous en parlez). Quitte à faire une partie "applications" essayez d'innover un peu sur le titre.

L'exemple de la pince ampèremétrique est assez classique et a l'avantage de pouvoir être mis en place rapidement. En revanche il est dommage de ne pas expliquer à quoi elle sert véritablement : on l'utilise essentiellement pour la mesure de courants forts, vous ne la sortez pas en TP. Gardez aussi en tête qu'elle n'est pas très utile si le câble est blindé. Concernant son fonctionnement, vous n'êtes pas obligé de rentrer dans les détails du guidage du champ par un ferromagnétique feuilleté (et non fritté, ce n'est pas la même chose), qui va inévitablement appeler un certain nombre de questions après votre présentation.

L'exemple de la purification des métaux est original et permet de présenter une application industrielle de l'induction. Si vous choisissez de faire un tel exemple le jury aura davantage besoin d'être guidé pour le comprendre pleinement, donc faites les efforts nécessaires : en particulier, détaillez bien les étapes et ne rajoutez pas sans arrêt des informations sur un schéma déjà surchargé sans prendre le temps d'expliquer ce que vous faites. Motivez également votre propos : dire que l'on s'en sert pour purifier des métaux c'est bien, dire que cette technique sert pour des métaux comme le tantale ou dans le domaine de l'électronique c'est mieux. Attendez-vous au passage à des questions plus techniques notamment sur la thermodynamique et la cinétique de cette méthode de purification, ainsi que sur des aspects physico-chimiques (fusion congruente ? les courants sont-ils modifiés en changeant de phase ? etc). Enfin, ne faites pas un calcul de puissance dissipée dépendant d'une dizaine de paramètres sans commenter leur effet par quelques applications numériques ...

## 3 Auto-induction et mutuelle-induction

La dernière partie concernait le phénomène d'auto-induction et de mutuelle-induction. Ce n'est pas un passage obligé de la leçon, mais si vous vous y attaquez prenez le temps de le faire correctement. Pour éviter de manquer de temps et de le faire remarquer il est bon de structurer votre leçon avec différents passages que vous pouvez réduire à l'oral pour rattraper votre retard.

Il est facile de calculer le coefficient d'auto-inductance  $L$  pour un solénoïde et de faire une application numérique pour retrouver, à tout hasard, l'inductance de la bobine posée sur la paillasse : ne vous en privez pas ! N'oubliez alors pas de dire que cette grandeur a une unité (Henry) et qu'il s'agit bien de la même qu'en électrocinétique.

Pour ce qui est de la mutuelle-induction, vous pouvez envisager d'aller jusqu'à monter un petit transformateur et faire une rapide mesure du rapport de transformation à comparer au cas idéal. Vous pouvez

utiliser un ferromagnétique pour guider le champ magnétique à travers les bobines et conclure sur l'intérêt de l'induction pour la conversion de puissance. Expérimentalement, pour montrer rapidement le phénomène, placez les bobines sur le même axe (configuration des bobines de Helmholtz) et pas côte-à-côte, ça marche beaucoup mieux !