

Induction électromagnétique

Niveau : 2e année CPGE

Pré-requis :

- Définition du champ magnétique
- électrocinétique
- Equations de Maxwell

Bibliographie :

- Physique tout-en-un PCSI , Dunod
- Physique tout-en-un PC , Dunod

Introduction

Simulation Experience de Faraday

https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law_en.html

Ou (de préférence)

Spire + Résistance et voltmètre (ou oscillo) à bord de R ou ampèremètre en série
+ aimant qui rentre et sort dans la spire.

Deux causes possibles que l'on étudiera dans cette leçon : soit le circuit est plongé dans un champ magnétique variable soit c'est le circuit lui-même qui se déplace dans un champ magnétique constant.

I. Le phénomène d'induction : Neumann

- A. Cadre
- B. Modélisation
- C. Loi de lenz

II. Couple inductif

- A. Auto-inductance
- B. Inductance mutuelle

Manip

III. Applications

- A. Transformateur
- B. Courants de Foucault et freinage par induction

Manip aimant dans tube + video "un frein magnétique - Unisciel"

Ou II.B) application : Transformateur

III. Courants de Foucault

A) Modélisation B) freinage par induction C) chauffage par induction

Questions sur la Manip

Q: L'induction a été présentée avec deux formes, Lorentz et Neumann, mais a-t-on une loi plus générale qui regroupe les deux cas ?

R: Oui, c'est la loi de Faraday, la fem est l'opposée de la dérivée du flux magnétique à travers le circuit par rapport au temps.

Lorentz est l'induction « motionnelle » (mouvement du circuit dans le champ) et Neumann l'induction liée à la dépendance temporelle du champ B. Les deux se retrouvent dans l'expression de la force électromotrice $e = -d\phi/dt$. La force électromotrice e_{AB} aux bornes d'un circuit étant obtenue par la circulation de A à B du champ E. Le champ électromoteur s'écrit de façon générale : $\vec{E}_m = \partial \vec{A} / \partial t + \vec{v} \wedge \vec{B}$ avec A potentiel vecteur et v vitesse de déplacement du circuit. Si on calcule par le flux du champ magnétique à travers un circuit, il faut toujours donner un sens conventionnel au courant dans le circuit qui implique le sens de la normale au circuit (ou du vecteur $d\vec{S}$). Le choix du sens conventionnel n'a pas d'effet sur le résultat final.

Q: Quelle hypothèse fait-on ici ?

R: Celle de l'ARQS, réponse instantanée du circuit, on néglige le temps de propagation des ondes Em.

Q: Question sur l'introduction: $\Phi = Li$, expression générale ?

R: Φ et I à définir, ici cette expression décrit surtout le cas de l'auto-induction. Par exemple pour les inductances mutuelles on a $\Phi_2 = Li_2 + Mi_1$

Q: Comment fonctionne le teslamètre ? Pourquoi un semi-conducteur ?

R: On plonge un conducteur dans un champ magnétique. Lorsqu'une tension est appliquée au borne du conducteur, les électrons sont mis en mouvement et atteignent une vitesse longitudinale stationnaire v_x . En présence d'un champ magnétique transverse B_z ils subissent une force de Lorentz dans la direction transverse y d'amplitude $q v_x B_z$. Dans le régime transitoire, la xz dérive latérale des électrons dans le conducteur conduit à leur accumulation sur les faces normales à la direction y, ce qui provoque l'apparition d'une différence de potentiel entre ces faces. En régime permanent, cette différence de potentiel est associé à un champ électrique de Hall E_H et les électrons subissent la force électrostatique additionnelle qE_H qui compense exactement la force de Lorentz. Ainsi la tension de Hall mesurée est proportionnelle à l'amplitude du champ magnétique appliqué. On notera que la tension de Hall est d'autant plus importante que la vitesse des électrons est importante. Comme la densité de courant $j = qn v_x$ elle est inversement proportionnelle à la densité de porteurs n , ce qui explique pourquoi on privilégie les semiconducteurs pour mesurer l'effet Hall et non les métaux.

Sonde à effet Hall: un courant passe dans la sonde (semi-conducteur), les électrons sont alors déviés par le champ magnétique, ce qui va induire en régime permanent un champ électrique qui va s'opposer à cette déviation, correspondant donc à une tension que l'on peut mesurer et qui est proportionnelle au champ magnétique appliqué.

On utilise un semi-conducteur car la tension de Hall est inversement proportionnelle à la densité de porteur de charge, donc dans un métal conducteur elle serait trop faible.

Q: Ordre de grandeur de L dans la vie courante ?

R: Le Henry est une grande unité: en général plutôt du mH (les inductances de fuite sont de l'ordre du mH dans les modèles de transformateur). On peut obtenir en TP une inductance de l'ordre de 1 H avec une bobine d'environ 1000 spires avec un noyau de fer. Voir le cours d'électronique de Jérémy Neveu pour modélisation des bobines à haute fréquence.

Q: Exemples d'application des inductances ?

R: Des exemples d'applications sont les transformateurs, l'utilisation du phénomène de surtension (dans des portails par exemple) etc.. Bobine aussi utile en électronique pour lisser un signal (comme la tension est la dérivée du courant).

Q: Pourquoi la mesure de L2 au RLC-mètre avec le fer doux ne fonctionnait pas ?

R: Car le circuit 1 était encore branché donc il y avait encore une influence du circuit 1 via la mutuelle !

Q: Pourquoi un noyau de fer ? Quel est son effet ?

R: Le terme de canalisation des lignes de champ est peu explicite. Comme, la perméabilité magnétique du milieu entre les bobines augmente fortement (même si le comportement n'est pas linéaire on peut prendre comme valeur de μ_r celle à l'origine de la courbe B(H)), cela augmente le champ magnétique (théorème d'Ampère) et par conséquent L (expérimentalement on passait de 8 à 18 mH) et donc M.

Q: Pourquoi fer "doux" ?

R: Cycle d'hystérésis d'aire faible : voir par ex. le BFR électromagnétisme 4 sur les différents matériaux (fer doux ou durs avec les valeurs de la perméabilité relative). Le fer doux perd son aimantation quand on arrête de lui appliquer un champ magnétique (faible champ coercitif, au contraire on utilisera des fers durs pour la fabrication d'aimants). Il y a aussi un intérêt énergétique dans toutes les applications de type transformateur afin de limiter les pertes par hystérésis (2 types de perte : pertes par hystérésis et pertes par courants de Foucault).

Q: Relation linéaire entre v2 et i1 ?

R: Attention relation linéaire entre leurs AMPLITUDES.

Q: Pourquoi $M < \sqrt{L_1 L_2}$?

R: On peut le retrouver en posant les équations couplées et en écrivant la conservation de l'énergie magnétique.

Q: Comment avoir $\theta=1$?

R: Dans le solénoïde Jeulin, il y a deux solénoïdes l'un sur l'autre, ce qui donne un coefficient de couplage très fort (à mesurer pour vérifier).

Q: Comment fonctionne un LCR mètre ? L'appareil propose plusieurs fréquences, laquelle choisir ? Incertitude du LCR mètre ?

R: Via la détection Synchrone, technique de mesure d'impédance en régime sinusoïdal forcé. Il faut se mettre à faible fréquence car $Z = wL$, on veut L grand donc w petit. Il faut regarder la notice, c'est un peu plus compliqué que seulement le dernier DIGIT

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

Question : Dans l'expérience introductive, la tension varie rapidement, peut-on observer un signal ?

Fonction single de l'oscilloscope en faisant attention à bien régler le trigger, le calibre de la base de temps, et le décalage temporel.

Question : Comment définir le vecteur surface à un élève de CPGE de première année ?

Orthogonal au plan de la spire et de norme égal à la surface. Pour une spire qui n'est pas dans un plan, on peut choisir n'importe quelle surface géométrique Σ reposant sur la spire, et calculer la surface \vec{S} totale de la spire en intégrant les éléments de surfaces $d\vec{S}$ de Σ . On peut montrer que la surface \vec{S} de la spire ne dépend pas de la surface géométrique Σ choisie.

Question : Comment calculer le champ créé par un solénoïde, comment le calculer avec le programme de CPGE ?

Théorème d'ampère avec deux rayons différents → + invariances et symétries, etc.

Question : Que vaut le champ sur l'axe dans la tranche au bout d'un solénoïde semi infini ?

Le champ sur l'axe à l'extrémité d'un solénoïde demi-infini ne dépend que du sens de l'enroulement de courant, puisque le champ magnétique circule dans un seul sens dans le solénoïde. On peut alors décomposer un solénoïde infini en deux solénoïdes semi-infinis, qui génèrent exactement le même champ sur l'axe à leur jonction. Par linéarité, ce champ doit être le même que celui à l'intérieur d'un solénoïde infini. On a donc $B_1 = B_0/2$.

Question : Quelle est la définition de la fem ? D'où vient-elle ?

$$\mathcal{E} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\phi}{dt}$$

→ je ne sais pas changer les équations, mais la définition de la fem se fait par la circulation du champ électrique sur le circuit. Le fait que la fem soit égale à l'opposé de la variation de flux magnétique est le résultat du théorème de Faraday, mais n'a rien à voir avec la définition de la fem. C'est comme définir le rotationnel de E en disant que c'est l'opposé de la dérivée temporelle de B . C'est une grosse erreur ! Il faut définir les grandeurs de façon intrinsèque, avant de les évaluer à d'autres grandeurs.

Question : On parle de deux types d'induction en CPGE, lesquels ?

Induction de Neumann et de Lorentz, Neumann variation dans le temps et Lorentz dans un champ indépendant du temps → c'est typiquement une réponse fautive car insuffisamment précise. Neumann, c'est un circuit fixe dans un champ magnétique variable dans le temps, Lorentz c'est un circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire.

Question : D'où vient la loi de Faraday ?

Ce n'est pas une loi fondamentale, on peut la démontrer avec Neumann ou alors avec Lorentz dans un circuit fermé → à partir des équations de Maxwell et de la force de Lorentz.

Question : Dans la donnée du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde, pourquoi on utilise la même équation quand le champ varie et en magnétostatique ?

Car approximation des régimes quasi stationnaires

Question : Comment on -on pu prévoir que B2 s'oppose à B1 ?

Par la loi de Lenz

Question : Comment calculer la fem si la bobine se déforme sous l'effet du champ magnétique ?

Il faut écrire $\mathcal{E} = - d(Li)/dt$, à partir du théorème de Faraday. En effet, la forme $\mathcal{E} = - L di/dt$ suppose que L est une constante dans le temps.

Question : Si bobine en aluminium plutôt qu'en cuivre est-ce que L change ?

Non, L ne dépend que des caractéristiques géométriques du circuit, pour des milieux non-magnétiques.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Points positifs :

Plan cohérent, discussions plutôt bien menées, schémas clairs, grandeurs bien définies, leçon ancrée dans la vraie vie avec plaques à induction, histoire des sciences, chargeurs à induction et transformateurs.

Faire attention :

Le temps consacré aux questions est très long, il faut bien s'y préparer.

Il ne faut pas dire qu'il y a proportionnalité si on observe seulement que B est croissant avec I

Eviter la notation $M1$ et $M2$ en inductance mutuelle et préférer $M12$ et $M21$.

Indispensable d'évoquer l'**induction de Neumann et de Lorentz** ainsi que la **loi de Lenz**

Faire un traitement beaucoup plus complet des expériences utilisées. Même si l'on fait des mesures qualitatives, il faut être précis et montrer ce qu'on voit dans chaque partie du circuit dans l'expérience de Faraday. En changeant le sens du courant, voir ce qu'il se passe etc. Et faire des liens très clairs entre les modèles et les expériences. Dans tous les cas, ne pas manipuler de façon brouillonne, sans prendre le temps de visualiser correctement le signal étudié à l'oscilloscope.

La première partie sur l'étude de différents champs magnétiques était plutôt hors sujet, et l'on aurait pu se contenter de rappeler la formule du champ magnétique dans un solénoïde fini, tout en se référant aux pré-requis. Cela aurait permis de gagner du temps, et de faire une exploitation plus poussée de ce qui a été abordé.

Il faut privilégier **une** application, comme le transformateur ici, mais ne pas faire catalogue.

On peut faire une leçon en CPGE en utilisant le programme de classes différentes, si on le justifie. On aurait pu ici par exemple supposer qu'on connaissait le théorème d'Ampère.

Autres options (non exhaustives) de plan :

- Introduction de la loi de Faraday, et lien plus explicite avec l'électrocinétique, par modèles électromagnétique de bobines, et calculs directs d'inductances propres et mutuelles
- Application à la conversion électromécanique de puissance, alternateur
- Application au transformateur

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

Présenter et analyser l'expérience historique de Faraday

Présenter en justifiant les choix pédagogiques la résolution d'un exercice avec un haut-parleur numérique

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

- 1) Pourquoi avoir mis cette leçon en CPGE2 étant donné que les programmes actuels incluent l'induction en 1ère année? La leçon effectuée était hors du programme de prépa. Conseil : Se mettre dans le programme de prépa.
- 2) Quand on démontre la loi de Faraday avec les équations de Maxwell dans quel cadre (Neumann ou Lorentz) est-on ? Dans quel référentiel se place-t-on? La démonstration n'a été faite que dans le cas Neumann, où elle est très simple. L'argument de dire que cela revient à se mettre dans le référentiel de la bobine n'est pas satisfaisant. D'une part, cela suppose que la bobine est un circuit indéformable, puisqu'on serait contraint de prendre en compte des effets inductifs « de Lorentz ». D'autre part, car une transformation des champs électromagnétiques pour un changement de référentiel autre que Galiléen implique un cadre relativiste qui n'est pas du tout évident a priori.
- 3) Quand les équations de Maxwell sont utilisées, dans quel cadre est-on ? ARQS magnétique
- 4) Cela rend-il la démonstration générale ? Non
- 5) Pourquoi la loi de Faraday a-t-elle été introduite avec une dérivée partielle ? Dérivée droite suffit car le flux ne dépend pas de l'espace
- 6) Le flux dépend-il de la position et du temps ? Temps uniquement. En pratique, le repérage spatiale de la bobine peut dépendre de l'espace. Mais le flux défini par rapport à cette bobine, même déformable, ne dépend que du temps.
- 7) Le flux ne dépend pas du choix de la surface reposant sur le circuit, pourquoi ? Du à $\text{div}(\mathbf{B}) = 0 \rightarrow$ cela implique que le flux de \mathbf{B} sur une surface fermée est nul. En introduisant une surface totale formée par le collage de deux surfaces reposant sur le circuit, on retrouve ce résultat.
- 8) La fem est-elle en convention générateur ou récepteur ? Générateur
- 9) Quel cadre de théorie physique permet de passer à Neumann à Lorentz ? La transformation de Lorentz, les transformations galiléennes ne sont pas correctes pour les champs \mathbf{E} et \mathbf{B} . Seulement pour des translations rectilignes uniformes, sinon il faut faire de la relativité générale.
- 10) Pourquoi le champ à l'infini d'un solénoïde infini est analogue à celui d'un dipôle mag à grande distance ? Ce n'est pas le cas. Faire tendre une ou plusieurs dimensions caractéristique d'une distribution de charges ou de courant vers l'infini change a priori le comportement à grande distance.
- 11) Y a-t-il d'autre façon de montrer que le champ à l'extérieur d'un solénoïde infini est nul? Oui à partir du solénoïde fini, dont on fait tendre la longueur vers l'infini.
- 12) Comment savoir si le champ mag à l'intérieur du solénoïde infini est positif selon \mathbf{e}_z ? Il faut garder un champ algébrique dans le calcul, il apparaît positif naturellement (naturellement, je ne sais pas, mais on retrouve le bon signe en fonction de l'orientation relative de \mathbf{z} par rapport au sens de rotation du courant, qui n'est pas forcément positif).
- 13) Quelles sont les limites de l'approximation du solénoïde infini ($L \gg R$) ? A quelques rayons de l'extrémité, l'approximation est valable
- 14) Quel est l'ordre de grandeur du champ sur l'axe pile à l'endroit où le solénoïde s'ouvre ? Moitié du champ du solénoïde infini. Ce n'est pas un ordre de grandeur, mais un résultat exact qu'on peut montrer par le principe de superposition.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Attention pas d'induction en CPGE2, uniquement en CPGE1 avec loi de Faraday, force de Laplace, et exemples simples dans les cas Neumann et Lorentz. → essayer de toujours regarder rapidement le programme de CPGE et les chapeaux des parties. C'est assez rapide avec un ctrl+F sur les pdf, et permet de se faire une bonne idée de l'approche attendue.

On peut a priori supposer que le champ du solénoïde infini est supposé déjà connu par les étudiants, dans tous les cas, ne pas passer 15 minutes à refaire la démo dans une leçon sur l'induction, car cela sera probablement considéré comme hors sujet.

Problème de structure : On ne voit pas la chronologie de la leçon (passage de Faraday à de l'autoinduction). Il manque un fil rouge. Idéalement on cherche à poser une question à laquelle on doit répondre durant la leçon. Cette question va typiquement faire le lien entre les connaissances déjà acquises, et celles que l'on veut introduire. Si possible, elle devrait s'appuyer sur une approche expérimentale. Cela permet de mieux présenter et délimiter ce que l'on va présenter dans la leçon.

Exemple de plan : Rail de Laplace. On déplace le rail sous tension dans un champ magnétique, et on voit apparaître une fem supplémentaire, qu'on va essayer d'expliquer en introduisant l'induction → Lorentz

Autre exemple : On fait passer un courant continu dans une bobine macroscopique (pas une boîte AOIP). On voit qu'elle se comporte en résistance, comme attendu. On impose une tension variable dans le temps, et on n'observe plus un simple comportement de résistance. Pourquoi a-t-on une tension supplémentaire ? On peut par ailleurs observer qu'à forme du signal envoyé, elle change avec la fréquence. Peut-on l'expliquer ? → Neumann.

Le lien entre Neumann et Lorentz existe il faut changer de référentiel mais pour passer de l'un à l'autre il faut faire de la relativité, le mieux est de ne pas attirer le jury sur ces notions. En tout cas, être conscient de la subtilité, et ne pas supposer qu'on peut effectuer simplement cette transformation des champs.

Conseil de Erwan : Essayer de se ramener dans un cadre de CPGE première année. Cela permet de s'affranchir du passage Neumann/Lorentz → on ne fait jamais vraiment le passage Neumann/Lorentz à l'agrég ! Cela permet de s'affranchir de la démonstration de la loi de Faraday, qui est quelque chose de difficile, et ne tient pas vraiment dans un format de leçon de 40 minutes.

Attention : par définition les dérivés partielles s'appliquent à des grandeurs qui varient selon plusieurs paramètres.

Les schémas doivent être faits en grand

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon