**Titre** : Induction électromagnétique

**Présentée par** : Martin Bouillard **Rapport écrit par** : Rémi Metzdorff

**Correcteur** : Jérémy Neveu **Date** : 13/12/2019

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Bibliographie de la leçon :** | | | |
| **Titre** | **Auteurs** | **Éditeur** | **Année** |
| Electromagnétisme, Fondements et applications | Pérez | Dunod |  |
| Tout en un Physique, PC-PC\* | Sanz | Dunod |  |
| Cours d’électromagnétisme | J. Neveu |  |  |
| Electromagnétisme | Bertin, Faroux, Renault |  |  |
|  |  |  |  |

|  |
| --- |
| **Plan détaillé** |
| Niveau choisi pour la leçon : L3  Pré-requis :   * Electrocinétique ; * Magnétostatique ; * Forces de Laplace ; * Equations de Maxwell ; * Potentiels scalaires vecteurs ;   Les encadrés bleus sont les expériences, verts les slides, oranges les transitions et rouges les remarques    Induction mise en évidence par faraday au XIX siècle. Experience : oscilloscope branché sur la bobine, aimant permanent. On bouge aimant devant la bobine ce qui change la tension observée.  Slide 1 : bobine alimenté par pile (haut droite) tension mesurée par un galvanomètre de une AUTRE bobine.  Variation de flux de champ magnetique.  Montrer slide applications, moteurs, micros, transformateur.    On s’interese à un conducteur filiforme dans un champ magnetique, on l’oriente (TRES IMPORTANT TOUT LE LONG DE LA LEÇON ). Le sens de parcours du courant oriente aussi la surface. Ce conducteur est animé d’une vitesse vfil.  Ce qui mettre en mouvement les éléctrons c’est la force de Lorentz. Or la vitesse v de l’expression de la force de Lorentz est la composition de la vitesse des éléctrons dans le circuit et la vitesse du circuit !  On exprime le cmap E en fonction des potentiels gradient et vecteur.    On se limite au cas d’un circuit indéformable. On définit le chamo electromoteur.    Dans le cadre de l’électromagnetisme on vas s’interesser à la circulation des champs.  L’integration le long d’un contours fermé d’un gradient est nul.  Le therme en derivé de A est inchangé  Le therme qui depend de la vitesse des eléctrons est nul car circuit fliforme, donc vitesse est colineaire au vecteur déplacement dans le circuit que on utilise pour integrer.    (seul v circuit est à prendre en compte pour les 2 vitesses, on notera cette vitesse v par la suite. Attention aux notations).  On a donc 2 types d’inductions qui se dégagent de l’expression, Newman et Lorentz.    On travaille sur Newman dabord, et on utilise la formule de Stokes pour transformer la circulaton en un flux de rotationel, attention a l’orientation de dS dans la formule ! On perumet les differentielles car agissent sur vaiables independantes. Circuit indeformable, donc on sorts la derivée del’integrale.    On peut faire la même chose pour l’induction de Lorentz. On utilise stokes pour faire apparaitre un rotationel et on utilise les formules d ; analyse vectorielle (div et grad). Div B est toujours nul. Caractère indeformable nous permet de sortir l’operateur v.grad. On retrouve le vlux à travrs le circuit à nouveau.    Finalement, la fem est la somme des 2, on reconnait (ou on introduit) la derivée totale.    Le flux de B s’exprime en weber (wb), le phénomène d’induction de rammène a des calcules de flux magnétique.    Signe – viens d’une loi de moderation.    Loi de Lenz est une loi empirique.  Loi de Lenz : les effets de l’induction s’opposent aux causes qui leurn ont donné naissance.  Discussion de la chute de l’aimant dans un tube : <https://www.youtube.com/watch?v=xOXwk6XtabE>. (dure 1 minute)  (plaques de plexiglass et d’aluminium (non magnetique)).  Que ce passe t’il ? l’aimant en chutant dans le tuyau crée un champ magnétique variable. Ce champ magnetique variable crée des courants à l’interieur du tube d’aluminium. Ces courants, d’après la loi de moderation créent alors un champ magnetique qui s’oppose au champ variable ce qui ralentis l’aimant (à mieux comprendre, voir video).  On vas s’interesser de plus près à l’induction de Newman.    On commence par s’interesser à une bobine avec N spires sur une longueur l parcouru par un courant i varable qui crée génère un champ magnetique lui aussi variable. **Dessiner la bobine ou la projeter.**  Pour simplifier les calcu ls on suppose que le champ magnetique crée est celui du solenoide infini. (le solenoidie fini est traité dans la leçon dipoles electrocinetiques).  Donner directement la valeur du champ B : qui est uniforme sur la section. **Ce calcul est fait dans le dunod**.  Le flux propre, c.a.d le flux qui traverse la bobine s’exprime comme : Psi = N\*B\*S où S est la surface d’une spire.  On définit alors l’inductance propre comme L = Psi/i =  On peut alors calculer la fem : e = -L\*di/dt, forme connu pour la bobine !  -Dans un circui éléctrique on peut remplacer la bobine par une source de tension idéale ! Or le sens de cette tension (fem) impose le sens du courant. D’où l’importance de la convention générateur/recepteur dans les crcuits étudiées precedement. Passer au moins une minute à expliquer ceci.      Discuter de la modération. Si le courant augmente dans le circuit (utiliser le schéma de la bobine), alors le champ B augmente. Or l’auto-induction de la bobine crée alors un courant dans le sens opposé à celui qui parcours la bobine ce qui diminue ainsi le courant total (montrer ceci dans le schéma des circuits).  Dire en 2 mots à la fin que l’énergie stocké par la bobine est trouvée à partir de la formule de la puissance émise par la fem qui lui est associée :    Le signe – vient du fait qu’on est en convention générateur, dans nos circuits éléctriques on se place en convention recepteur ce qui change le signe.  Revenons sur l’experience de Faaday. Cette fois-ci nous avons 2 bobines ce qui nous ammène à introduire un nouveau concept, l’inductence mutuelle.      Schéma :    L’inductance mutuelle est définit comme le flux du champ magnetique crée par une bobine à travers l’autre bobie divisé par le courant divisé par la première bobine.  Par exemple le flux du champ crée par la deuxième et traversant la premiere divisé par le courant de la deuxième : L12 = Psi1-2/i2.  Le problème est symétrique entre les 2 bobines, on peut aussi définir alors L21 de la même manière et par symétrie il sera égal a L12.  On note la mutuelle inductance M.  On peut coupler deux circuits éléctriques en utilisant deux bobines liées par le phénomène d’inductance. (couplage car le premier circuit agis sur le deuxième et vice-versa). Alors on ecrit la loi des mailles pour l’un des crcuits :    Les variations de courant dans le deuxiem circuit vont imposer des variations de courant dans le premier circuit. Dd’où le nouveau therme du à l’inductance mutuelle.  Rq. Cette inductance mutuelle peut aussi être exprimé comme une fem.  Parler du transformateur comme application, C.F dunod PC p. 1084. **Montrer slide du transformateur**.  *Cette explication est facultative :*  On suppose un milieu ferro idéal (permeabilité infinie sans sources de pertes). Deux bobinages avec un nombre de spires différents.  On aplpique le théroème d’Ampère le long d’une ligne de courant (rq on utilise H qui est nul dans notre contour du à nos hypotèses).    *Ceci semble un peu en dessus du niveau attendu. On peut si non repartir du calcul du dunod PC p. 1084-1085 qui donne la relation u1/u2=N1/N2, puis utiliser la conservation de l’énergie qui implique P1/P2=1 pour remonter à i1 et i2 ce qui n’a pas un grand interet à mon avis.*  On peut par contre donner le résultat principal des transformateurs : U1/U2 = N1 / N2 et le commenter.  Ce resultat est utilisé dans les microondes ! CF slide 4 image de transformateur de gauche.  **Parler des pertes par effet joule !**    O s’interesse à present à l’inducatnce de Lorentz. On etudiera alors un problème classique, les rails de Laplace.  Faire le schéma. Pas de frottements et présence d’un champ B permanent. Faire le schéma éléctrique equivalent.  Le barreau métallique bouge ce qui modifie la surface du circuit et par conséquent le flux qui traverse le circuit donc génération d’une fem. NE PAS OUBLIER l’INTENSITÉ DANS LES 2 CIRCUITS et le champ B qui n’est pas dessine mais qui normalement viens vers nous..    On établis les équations mécaniques et éléctriques. Le sens du courant est aussi le sens de l’intégrale.    On etablis l’équation éléctrique avec la loi des mailles : e = Ri  e est donné par la circulation du champ éléctromoteur :    On exprime i en fonction des autres variables dans l’équation éléctrique et on la reinjecte dans l’’equation mécanique. On reconnait une EDF du premier ordre et un temps caracteristique associée.    D’où :    On peu discuter de ce resultat avec laloi de Lenz :  - si un opérateur bouge le barreau vers la droite, la surface du circuit augmente, donc le flux de B qui traverse le circuit augmente. L’induction s’oppose à cet effet. Pour cela in crée un curant  e = -vBl, qui a tendance à attenuer le champ magnetique existant. D’où le signe -, ce qui fait que le barreau sera ralentis.  On peut traiter le problème par une aproche energetique :  On multiplie par v l’équation mécanique et (9), et on multiplie l’équation éléctrique (8) par i.    On retrouve l’énergie cinétique et les pertes joules. Ce que nous venons de calculer est la puissance des forces de Laplace et la puissance de la force éléctromagnetique liée à l’induction. Ces puissances sont égales en valeur absolus et nulles si on fait l’addition.  Ceci veut dire que nous avons un cuplage idéal entre l’énergie electromagnetique et l’énergie mecanique. Pas de dissipations, pas de pertes. Aussi on a conversion d’énergie cinétique en énerge electromagnetique et vice-versa.  Le freinage par induction que nous avons vu ici est utilisé dans les vehicules. Montrer slide de freinage par induction.  L’axe est liée à l’essieux sur lequel sont montés les roues. Le phénomène d’induction crée des courants qu’on appelle courants de Foucault. Ces courants dissipent de l’énergie par effet joule. L’énergie cinétique qui crée les courants de foucault est ainsi dissipé ce qui ralentis le disque et donc les roues.  Il est utilisé pour le freinage des camions et trains.  On a un slid sur les roues de Barlow mais je prèfère ne pas rentrer la dessus.    On peut parler des générateurs mais lire le poly de Jeremy avant.  On peut aussi dire que les courants de foucault sont aussi utilisées pour chauffer. Chauffage par induction. |

|  |
| --- |
| **Questions posées par l’enseignant** |
| **Lors de l'approche historique avec l'expérience de Faraday, vous avez parlé de galvanomètre : qu'est-ce que c'est ?**  Il s'agit d'un instrument permettant de mesurer de faibles courants électriques.  L'aiguille de l'appareil est liée à des spires parcourue par le courant à mesurer, spires placées dans un champ magnétique constant et homogène.  Le dipôle magnétique formé par les spires est alors soumis à un couple qui dévie l'aiguille.  **Lors de l'introduction des lois de l'induction, vous avez introduit trois ingrédients : force de Lorentz, E = - grad V – dA / dt et v × B : Commenter ces termes.**  La force de Lorentz permet d'expliquer comment le champ électromagnétique peut mettre en mouvement ou dévier des particules chargées.  On repart des équations de Maxwell pour exprimer E en fonction des potentiels vecteur et scalaire.  **Que représentent V et A ?**  Voir le cours d'électromag de Jérémy pour des discussions plus poussées.  On ne peut pas mesurer directement ni l'un ni l'autre.  On a seulement accès à des différences de potentiel ou à la circulation de A.  Dans le cas d'un solénoïde parfait avec une spire autour, le champ B est nul au niveau de la spire pourtant il est possible de créer une fem dans la spire en faisant varier le courant dans le solénoïde (le champ B est bien nul mais pas A au niveau de la spire).  Une autre expérience mettant en évidence le rôle de A dans la compréhension d'effets subtils est celle d'Aharonov-Bohm.  **Comment pourrait-on préciser l'introduction de la force électromotrice e ?**  Lien entre le travail et la ddp (le travail de la force de lorentz permet d'introduire la ddp)  **Dans la force de Lorentz, que représente v ?**  C'est la vitesse des porteurs de charge.  **Quel est le référentiel dans lequel est défini v ?**  **Vitesse du circuit = vitesse des charges ?**  Ici il faut utiliser la composition des vitesses : v = v\_{circuit} + u, où v\_{circuit} est la vitesse du circuit dans le référentiel du laboratoire et u est la vitesse des électrons dans le référentiel lié au circuit.  Quand on considère l'effet d'un champ magnétique sur les électrons, on peut alors considérer le cas d'un conducteur filiforme : la vitesse u étant alors toujours colinéaire avec le conducteur, seule la vitesse des électrons liée au mouvement du circuit donne lieu à une circulation non nulle (u × B est toujours orthogonal au conducteur).  Dans le cas d'un conducteur ayant une section finie, le déplacement des électrons le long du circuit donne, en présence d'un champ magnétique l'effet Hall qui est très faible dans les conducteurs en raison de la densité importante de porteurs de charge.  **Comment évolue la vitesse de chute de l'aimant en fonction du matériau du tube ?**  Plus le matériau est conducteur, plus le freinage est efficace, donc la chute longue.  **Justifier l'approximation du solénoïde infini pour les bobines ?**  Cette approximation est sans doute discutable car : les bobines utilisées sont de section carrée et la dimension de la section est comparable à la longueur de la bobine.  Cependant, même dans le cas d'une simple spire, le champ créé en dehors de l'axe est compliqué à calculer.  Les résultats obtenus lors des expériences étant en accord raisonnable avec le modèle simple d'un champ uniforme, on peut ici justifier l'utilisation de cette approximation.  **Pourquoi sommer les champs B ?**  On peut appliquer le principe de superposition associé à la linéarité des équations de Maxwell.  **Pourquoi se placer en convention générateur ?**  Dans le cas de l'induction présenté ici, la bobine est la source de la force électromotrice.  Il s'agit d'un générateur qui justifie l'emploi de la convention associée.  **Puissance stockée dans la bobine. Pourquoi i × U\_L et pas e × i ?**  Lié à la convention choisie : en convention générateur, on considère l'énergie cédée par la bobine au circuit.  En convention récepteur, on s'intéresse à l'énergie reçue par la bobine.  **Manip : Quelle est la valeur de la résistance de la bobine et justifier le choix de la résistance ?**  (dépend du nombre de spires de la bobine) Il faut que la résistance de la bobine reste faible devant la résistance placée en série avec la bobine.  De plus, on fait en sorte que la fréquence de coupure du passe base soit de l'ordre de 10 kHz.  **D'où viennent les incertitudes sur la mesure ? Comment sont calculées les erreurs ?**  Lors de la mesure de la fréquence de coupure, l'incertitude vient de l'ajustement des données expérimentales par le modèle analytique.  La déduction de L dépend aussi de la valeur de la résistance R+r qui est mesurée précisément avec l'ohmmètre numérique et une mesure à quatre points.  Cette incertitude est donnée par la notice de l'appareil.  **Est-il possible de rajouter des erreurs sur les points acquis à l'oscilloscope à la main ?**  Oui en se référant à la notice de l'instrument mais elles sont petites venant de l'oscilloscope.  **Pourquoi avoir choisi de mesurer L d'après le diagramme de Bode ?**  Essentiellement car il faut une mesure quantitative dans la leçon docteur.  Autres méthodes : umax/2, temps de montée, etc.  Justifiée par une approche pédagogique.  **Valeur d'inductance comparée à quoi ?**  A celle mesuré au RLC-mètre, à la valeur annoncée par le constructeur, à la valeur attendue compte tenu du modèle.  **D'où vient l'incertitude sur l'inductance théorique ?**  Principalement de l'inhomogénéité du champ B dans toutes les spires et sur toute la surface d'une même spire.  **Inductance mutuelle ? pourquoi mettre des dérivées rondes ?**  (petite erreur)  **Une seule équation : couplage de 1 vers 2. Qu'est ce qui se passe dans l'autre sens ?**  Le problème est symétrique.  **L'inductance mutuelle est-elle la même de 12 ou 21 ?**  Oui.  **Équivalence des puissances de Laplace et induit ?**  Oui car sinon on casse la physique.  **Roue de Barlow pour générer du courant ?**  Oui pour les forts courants de certaines électrolyses, non pour la production électrique actuelle (alternateurs). |
| **Commentaires donnés par l’enseignant** |
| Débit de parole important. Faire quelques pauses.  Bien expliqué  Point noir de la leçon : comment amener les lois de l'induction ?  On peut écrire que la vitesse des électrons est la composition des électrons dans le circuit + la vitesse du circuit.  Une autre possibilité serait de faire l'approche historique entière et introduire le d phi/dt directement.  Bonne utilisation des couleurs, mais défaut de diction : pas dire mon/ma tout le temps (mesurer mon inductance...)  Bq d'applications : bien  Faire des pauses, poser des questions ouvertes, pendant l'écriture du titre tu te tais.  A n'est pas mesurable car il y a une jauge près mais ddp mesurable et la circulation de A aussi. |
| **Partie réservée au correcteur** |
| **Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)**  Bon plan (classique…) il faut cependant beaucoup réfléchir à comment aboutir à la formule du champ electromoteur E\_m, en respectant un programme ou des pré-requis raisonnables, car tout l’enjeu de la leçon est ici.  **Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates**  Champ électromoteur, cas de Neuman et Lorentz illustrés pas des exemples et applications concrètes  **Expériences possibles (en particulier pour l’agrégation docteur)**  Mesure d’inductance, loi de Lenz (mais pas très quantitatif),  **Bibliographie conseillée**  Croiser plusieurs livres de prépa de différentes programmes pour l’introduction du champ électromoteur (vieux livre bleu PC Mauras, livre récent PCSI, Pérez…) |