

LP20 : INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE (L2)

Prérequis

- équations de Maxwell

Idées directrices à faire passer

- loi de Lenz
- vaste domaine d'application

Commentaires du jury

- définir soigneusement les orientations et les conventions de signe
- les applications doivent occuper une large place
- il n'est pas nécessaire de traiter en détail les deux inductions, mais montrer leur équivalence

Bibliographie

- [1] Hprépa électromagnétisme 2e année, Brebec, Hachette
- [2] Physique PC-PC*, Olivier, Tec & Doc
- [3] Magnétisme : statique, induction et milieux, Garing, Ellipses

Introduction

La présentation de l'induction implique un choix méthodologique. La théorie étant phénoménologique, il faut partir ou des équations de Maxwell, ou de la loi de Faraday. Si historiquement la loi de Faraday a été proposée en premier, on choisit ici de partir des équations de Maxwell dans leur forme générale pour plus de rigueur.

I Cadre de l'étude

1 Motivation [1]

- l'objectif est de motiver l'étude par une série d'expériences introductives du phénomène
- manipulation n°1 : aimant fixe, bobine mobile
- manipulation n°2 : aimant mobile, bobine fixe
- bien poser chaque manipulation (ce qui est fixe, ce qui bouge...)
- discuter le résultat + nommer induction de Lorentz, de Neumann
- on constate que l'effet est équivalent. C'est d'ailleurs nécessaire puisque les lois de la physique doivent être invariante par changement de référentiel galiléen, le mouvement n'a de sens que relativement donc ! L'un des buts de cette leçon est de mettre en évidence cette équivalence
- manipulation n°3 : balancier dans l'entrefer d'un aimant : on constate un freinage
- énoncer la loi de Lenz, puis l'utiliser pour interpréter l'expérience n°3

2 Champ électromoteur et force électromotrice [2]

- définir le champ électromoteur \vec{E}_m : "c'est, dans un référentiel, la composante de \vec{E} qui n'est pas conservative (qui ne dérive pas d'un potentiel)
- apparition de courants induit associés -> loi d'Ohm locale généralisée
- fem d'induction : sur un circuit **filiforme**, obtenir la loi d'Ohm en dégagant la fem d'induction
- elle est non nulle sur un contour fermée car non conservative !

3 Equations locales de l'électromagnétisme dans l'ARQS magnétique [2]

- définir l'ARQS et son critère de validité + ODG dans des cas classiques (pour montrer que ce n'est pas critique)
- montrer la négligeabilité du courant de déplacement et donner les équations de Maxwell

II Phénomènes d'induction

1 Induction de Neumann [1]

- cadre de l'étude, position du problème
- équation de Maxwell-Faraday
- introduire le potentiel vecteur
- on a alors l'expression $\vec{E} = -\vec{\text{grad}} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$
- identifier $\vec{E}_m = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$
- calcul de la fem associée sur un contour fermé : loi de Faraday
- calcul de la fem e pour un exemple standard. Donner ODG permet de montrer que l'effet n'est pas négligeable !
- interpréter plus finement l'expérience de la chute de l'aimant dans tube cuivre (expérience n°3), sans faire de calcul

2 induction de Lorentz [2]

- cadre de l'étude, position du problème
- objectif : obtenir \vec{E}_m , partie non conservative du champ électrique dans le référentiel du conducteur en mouvement dans B permanent
- force de Lorentz invariante par changement de référentiel galiléen (pourquoi ??)
- obtenir alors \vec{E}_m
- dire un mot sur les limites du modèle : en fait il faudrait un traitement relativiste du problème. L'électromagnétisme ne peut s'interpréter dans une théorie galiléenne
- loi de Faraday (sans démonstration, en cas de questions, la démo est p178 du Hprépa)

3 Equivalence et cas général [1]

- reprendre l'explication p180 du Hprépa, en étant clair sur le message à faire passer
- de toute évidence la variation de flux est la même dans les deux cas
- la fem donnée par Neumann est identique à celle donnée par celle de Lorentz
- les lois trouvées sont en accord avec le résultat expérimental
- dire que dans un cas général, il faut additionner les deux champ électromoteurs (pas de réf.)

III Conséquences et applications

1 Conséquence macroscopique : auto-induction et inductance mutuelle [2]

1.1 Inductance propre

- reprendre l'explication du Olivier
- variation de i -> variation du flux
- ce rapport est linéaire par Biot-Savart -> $\phi = Li$
- donner les propriétés essentielles (dépendance à la géométrie de la bobine)
- en déduire la loi électrocinétique du dipôle

1.2 Inductance mutuelle

- manipulation : montrer l'effet du couplage : bobines couplées : on alimente l'une, on constate l'apparition d'une tension aux bornes de l'autre
- reprendre l'explication du Olivier
- schéma de situation
- variation de i_1 -> variation de flux dans la seconde bobine
- toujours linéaire par Biot et Savart
- donner les propriétés essentielles (entre autre $M_{1 \rightarrow 2} = M_{2 \rightarrow 1}$)
- introduit un couplage entre les circuits électriques

- en déduire la loi électrocinétique faisant apparaître un couplage

2 Effet de peau [3]

- utiliser le problème 5.8 du Garing p177 (fait dans le cas d'un conducteur cylindrique. même si les calculs sont plus délicats, le contenu physique est bien plus intéressant, et ce qui nous intéresse c'est plutôt les ODG ici)
- présenter la situation
- donner une expression de la conductivité complexe
- avant tout calcul expliquer le phénomène avec les mains (loi de Lenz !)
- équations de Maxwell avec les approximations utiles
- donner l'équation de propagation du champ : c'est une équation de diffusion !
- donner l'idée de la résolution en coordonnées cylindriques : donner l'équation et la solution
- identifier l'épaisseur de peau et expliquer ce qu'elle représente : profondeur de pénétration du champ
- donner des ODG
- conclure : l'induction interdit la pénétration des OEM dans les conducteurs
- donner l'expression de la résistance résultante et expliquer le problème que cela pose pour la transmission haute fréquence

3 Induction et effet Joule

- on cherche à interpréter quantitativement ce que l'on a observé en introduction
- application 7 p223 du Hprépa
- suivre la démarche (traiter rapidement avec transparent)
- expliquer le chauffage par induction (plaque chauffante mais aussi technique industrielle de soudure
- freinage de certain poids lourds

Conclusion :

- bilan : rappeler la chaîne d'idée : champ B variable -> fem d'induction -> courant induit dans un conducteur -> champ B
- ouverture : parler des applications pour les moteurs (mais cela fait l'objet d'une leçon à part entière). donner le principe de fonctionnement

Q/R

1. Qu'est-ce que l'ARQS électrique ? Cas classique d'application.
2. La loi d'Ohm généralisée est elle valable dans tout référentiel ?
3. Les formules utilisées pour la transformation des champs sont elles toujours valables ? Pourquoi la force de Lorentz est invariante par changement de référentiel galiléen ?
4. Quelle est la formule générale de l'inductance propre ?
5. Dans quel cas l'écriture $j = I/S$ est elle valable ?
6. Lien entre potentiel retardé et courant de déplacement négligé.
7. Comment optimiser le chauffage par induction ?
8. Donner une signification physique de l'ARQS.
9. Existe-il des frottements dans le rail de Laplace ?
10. Dessiner les lignes de champ magnétique d'un aimant.