Electromagnétisme Chap.8 – ARQS magnétique – Phénomène d'induction

1. ARQS magnétique

1.1. Définition de l'ARQS

1.2. ARQS magnétique : nullité du courant de déplacement

1.3. Deux conséquences de l'ARQS magnétique

2. Lois générales de l'induction dans l'ARQS magnétique

2.1. *(Rappel)* Loi de Faraday PCSI (circuits filiformes fermés)

2.2. *(Rappel)* Loi de Lenz : une loi de modération

2.3. *(Rappel)* Cas d'une spire fixe en présence d'un champ dépendant du temps

2.4. *(Rappel)* Cas d'une spire mobile dans un champ stationnaire

2.5. Loi de Faraday PCSI = équivalent intégral de MFaraday

3. Auto-induction – Induction mutuelle (cadre ARQS)

3.1. *(Rappel)* Modélisation simplifiée d'un bobinage

3.2. *(Rappel)* Proportionnalité entre le champ magnétique et le courant qui le crée

3.3. *(Rappel)* Auto-induction : coefficient d'inductance propre

3.4. *(Rappel)* Mutuelle inductance : coefficients d'inductance mutuelle

3.5. Energie magnétique stockée par un circuit isolé

3.6. Energie magnétique stockée par un ensemble de deux circuits couplés par mutuelle

3.7. Exemples de couplage magnétique (parfait ou partiel)

3.8. Transformateur idéal : réalisation d'un couplage parfait

4. Retour sur les actions de Laplace

4.1. Dispositif des rails de Laplace : interaction de deux tiges

4.2. Couple de Laplace sur un cadre rectangulaire

Intro : On peut observer qu'un aimant en mouvement à l'intérieur d'une bobine génère une différence de potentiel à ses bornes, voire un courant si la bobine est connectée à un circuit fermé : *c'est le* ***phénomène d'induction***, décrit en PCSI. On approfondit l'étude de ce phénomène dans ce chapitre, en revenant notamment sur les méthodes classiques pour étudier l'induction en exercice.

1. ARQS magnétique

1.1. Définition de l'ARQS

Comme en première année (étude des circuits électriques), les ***régimes lentement variables***, appelés aussi ***régimes quasi-stationnaires*** ou *quasi-permanents*, caractérisent les situations où la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique peut être considérée comme infinie.

Lors d'une modification en un point d'un circuit électrique, cette modification ne se fait pas ressentir instantanément en tout point du circuit. L'information est propagée par une onde électromagnétique. Dans le cadre de l'ARQS, on ***néglige la durée de propagation de cette onde*** d'un bout à l'autre du circuit ***devant la durée caractéristique du régime variable*** (ex : la période, si les signaux sont harmoniques).

En régime sinusoïdal, c'est équivalent à négliger la dimension du circuit devant la longueur d'onde de l'onde électromagnétique.

1.2. ARQS magnétique : nullité du courant de déplacement

ARQS magnétique

L'Approximation *des RQS 'magnétique' revient* ***à négliger le courant de déplacement*** *dans l'équation de M-A :*

$$\overrightarrow{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{j}$$

❖ En notant L la longueur du circuit, T la période d'évolution des champs, et sachant que $c^2 \varepsilon_0 \mu_0 = 1$, montrer par analyse dimensionnelle (ou « raisonnement par ordre de grandeur », comme en mécanique des fluides) que le terme de courant de déplacement de l'équation de Maxwell-Ampère est négligeable devant le rotationnel de B dans le cadre de l'ARQS magnétique.

On notera que l'ARQS « magnétique » suppose que le champ électrique est essentiellement créé par les variations temporelles du champ magnétique : ce ne sont pas les charges électriques qui sont les sources du champ.

Cela implique que l'ARQS magnétique n'est pas applicable dans l'espace inter-armature d'un condensateur par exemple. Il existe pour ce type de situation une autre ARQS, « l'ARQS électrique ».

1.3. Deux conséquences de l'ARQS magnétique

1e conséquence de l'AROS

Les lois de la magnétostatique se généralisent aux cas des régimes lentement variables, car ***le Théorème d'Ampère est valide****.*

2e conséquence de l'AROS

La ***loi des nœuds est valide*** *dans le cadre de l'ARQS*

❖ Démontrer cette deuxième conséquence (même démonstration que l'établissement de l'équation locale de conservation de la charge à partir des équations de Maxwell, cf. chapitre 1)

L'ARQS magnétique est un cadre théorique important car valide pour de nombreuses applications, industrielles notamment : définition des inductances propres et mutuelles, transformateurs, effets inductifs dans les circuits électriques, freinage par courants de Foucault, machines électriques (moteurs et alternateurs), etc.

2. Lois générales de l'induction dans l'ARQS magnétique

2.1. *(Rappel)* Loi de Faraday PCSI (circuits filiformes fermés)

Loi de Faraday PCSI

On considère un ***circuit filiforme fermé****, ou dont l'ouverture est très étroite devant la longueur du circuit.*
S'il est plongé dans un champ magnétique dont le ***flux Φ à travers le circuit*** *varie avec le temps,*
il est alors le siège d'une ***force électromotrice e*** *telle que :*

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

où $\Phi = \iint \vec{B} \cdot \overrightarrow{dS}$ *est le flux du champ magnétique* ***à travers la surface délimitée par le circuit fermé***
où ***e*** *est (pour l'instant) assimilable à la fém d'une source idéale de tension (cf. circuit équivalent ci-dessous)*

Schéma équivalent d'un conducteur ohmique soumis à l'induction

Après avoir orienté le courant qui le traverse*, un circuit filiforme fermé (ou quasi-fermé)*
est modélisable par le ***schéma électrique équivalent*** *suivant :*

sa résistance ***R, en série*** *avec une* ***source idéale de tension e (****orientée en* ***convention générateur****).*

- En déduire ce qu'on appelle parfois « la loi d'ohm généralisée » aux bornes A-B d'un circuit quasi-fermé soumis à l'induction (convention récepteur) :

$$u_{AB} = R_{AB} i_{AB} - e_{AB}$$

Il est préférable de ne pas apprendre cette formule par cœur, car elle dépend de la convention d'orientation du dipôle formé par le circuit. Il vaut mieux la retrouver à chaque fois à l'aide du schéma équivalent précédent.

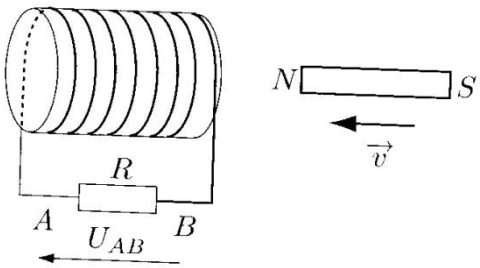
Les 3 situations simples où l'on peut utiliser Faraday et le schéma équivalent

Circuit fixe dans un champ uniforme variable dans le temps
Circuit mobile dans un champ permanent non-uniforme
Circuit déformable dans un champ permanent et uniforme
On peut bien-sûr imaginer la situation générale où le circuit est mobile et se déforme dans un champ quelconque

Remarque : Si un tronçon de conducteur *non-fermé* est en mouvement par rapport aux lignes de champ magnétique, l'induction existe toujours et une f.é.m. apparaît tout le long du tronçon. Cette f.é.m. n'est par contre plus calculable par la loi de Faraday que l'on a vue. Il faut faire appel à la notion de « champ électromoteur » (hors nouveaux programmes) ou à la notion de « flux coupé » (hors programme depuis longtemps).

Exo pour se familiariser avec les conventions d'orientation et les signes :

On déplace un barreau aimanté à vitesse constante vers l'intérieur d'une bobine. On rappelle que le champ magnétique créé par un aimant sort de l'aimant par le pôle nord, et y entre par le pôle sud. Localement au niveau du pôle nord, le champ est colinéaire au barreau.



- Quel est le signe de la différence de potentiel U_{AB} ?

2.2. *(Rappel)* Loi de Lenz : une loi de modération

Loi de Lenz

Les ***conséquences*** *de l'induction* ***tendent à s'opposer aux causes*** *qui lui ont donné naissance.*

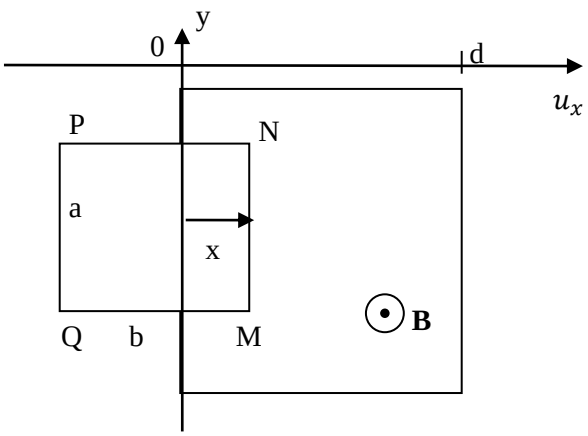
2.3. *(Rappel)* Cas d'une spire fixe en présence d'un champ dépendant du temps

Soit une spire circulaire de rayon a, horizontale, plongée dans un champ magnétique vertical, uniforme et variable dans le temps : $\vec{B} = B_0 \cos(\omega t)\, \vec{e_z}$

- Déterminer la fém induite dans la spire.
- La résistance totale de la spire vaut R. En vous appuyant sur un schéma électrique équivalent de la spire, en déduire l'intensité du courant induit dans la spire.
- Déterminer qualitativement la direction et le sens du champ magnétique créé par le courant circulant dans la spire. Que remarque-t-on ?

2.4. *(Rappel)* Cas d'une spire mobile dans un champ stationnaire

Un cadre métallique rectangulaire mobile de côtés a et b, de résistance R, est en translation parallèlement à Ox.
Il traverse une zone de longueur d > b dans laquelle règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$.



En dehors de cette zone on admet que le champ est nul. On néglige l'effet de la pesanteur sur le cadre.
La vitesse du cadre avant qu'il ne pénètre dans la zone est $\vec{v}_0 = v_0 \vec{u_x}$.

- Expliquer qualitativement ce qu'il se passe pour le cadre lorsqu'il pénètre dans la zone magnétique
- Phase de pénétration : déterminer l'équation différentielle vérifiée par $v(t)$ en posant $\alpha = B^2 a^2 / mR$
- En déduire celle vérifiée par $v(x)$. La résoudre et montrer que $v(x)$ est une fonction affine.
- On note v_1 la vitesse du cadre lorsqu'il a entièrement pénétré dans la zone. Quelle valeur limite doit prendre v_o pour que le cadre puisse effectivement pénétrer dans la zone ?

- Pendant la phase de pénétration, déterminer la puissance des forces de Laplace agissant sur le cadre
- Déterminer aussi la puissance fournie par la f.é.m. au circuit. Conclure.

La puissance fournie aux électrons par la f.é.m. d'induction est opposée à la puissance mécanique reçue par la barre soumis aux forces de Laplace. Ce résultat est général et traduit la ***conversion électro-mécanique****.*

Une façon de se souvenir intuitivement de ce résultat est de remarquer que :
- lorsque les forces de Laplace tendent à ralentir un conducteur, la f.é.m. tend à créer/amplifier le courant
- lorsque les forces de Laplace tendent à accélérer un conducteur, la f.é.m. tend à diminuer le courant

2.5. Loi de Faraday PCSI = équivalent intégral de MFaraday

- Dans le cas d'un circuit fixe, démontrer la loi de Faraday PCSI à partir de l'équation de MF.
- Peut-on encore affirmer que le champ électrique est un champ de gradient ?

3. Auto-induction – Induction mutuelle (cadre ARQS)

Tout ce qui concerne l'auto-induction et l'induction mutuelle sera étudié dans le cadre de l'ARQS.

3.1. *(Rappel)* Modélisation simplifiée d'un bobinage

Tout ce qui suit est valable pour les circuits filiformes fermés, mais les coefficients d'inductance prennent des ***valeurs non-négligeables en présence de bobinages***, dont la géométrie amplifie les effets de l'induction.

*Sauf indication contraire, on modélisera toujours une couche de bobinage comme **une succession de spires** jointives planes parcourues par le même courant. Les espaces inter-spires seront négligés.*

3.2. *(Rappel)* Proportionnalité entre le champ magnétique et le courant qui le crée

Dans tous les exemples traités en magnétostatique, les champs magnétiques créés étaient proportionnels au courant qui leur donnait naissance. Cela se voit bien dans l'équation de M-Ampère en magnétostatique. Dans le cadre de l'ARQS, cette propriété reste donc valide.

3.3. *(Rappel)* Auto-induction : coefficient d'inductance propre

Un circuit traversé par un courant variable $i_{propre}(t)$ ***crée à travers lui même*** un champ magnétique 'propre'. Le flux de ce champ propre à travers le circuit est proportionnel à $i_{propre}(t)$ et est appelé flux propre Φ_{propre} : c'est l'***auto-induction***.

Définition de l'inductance propre
(ou coefficient d'auto-inductance)

$$\Phi_{propre} \overset{\text{def}}{=} \boldsymbol{L} \times i_{propre}$$

où Φ_{propre} est le flux propre, créé par le circuit à travers lui-même.
$\boldsymbol{L \geq 0}$ *et ne dépend que de la **géométrie** du circuit.*

*Sa définition traduit simplement une **relation de proportionnalité** entre le flux et le courant qui le crée.*

- Etablir l'expression de l'inductance d'un solénoïde de longueur ℓ, de section S, constitué de N spires, assimilé (uniquement pour le calcul du champ) à un solénoïde infini : $L = \mu_0 N^2 S / \ell$

- Démontrer l'expression $u = L\frac{di}{dt}$ admise jusqu'à présent en électrocinétique dans le cas d'un bobinage dont on néglige la résistance des fils

3.4. *(Rappel)* Mutuelle inductance : coefficients d'inductance mutuelle

Soient deux circuits C_1 et C_2 parcourus par les courants $i_1(t)$ et $i_2(t)$.
Le champ magnétique généré par C_1 crée dans C_2 un flux $\Phi_{1\to2}$, proportionnel à $i_1(t)$ dans le cadre de l'ARQS.
Le champ magnétique généré par C_2 crée dans C_1 un flux $\Phi_{2\to1}$, proportionnel à $i_2(t)$ dans le cadre de l'ARQS.

Définition des deux coefficients d'inductance mutuelle

$$\Phi_{1\to2} \overset{\text{def}}{=} \boldsymbol{M_{1\to2}} \times i_1$$
$$\Phi_{2\to1} \overset{\text{def}}{=} \boldsymbol{M_{2\to1}} \times i_2$$

*Ils ne dépendent que de la **géométrie** de chaque circuit et de leur **disposition relative** l'un par rapport à l'autre.*
*Ils sont **algébriques** (comme les flux), leur signe dépend de l'orientation (arbitraire) des surfaces.*
*Leur définition traduit simplement une relation de **proportionnalité entre le flux et le courant qui le crée**.*
Même unité que L : Henry (H)

Propriété *(admise)*

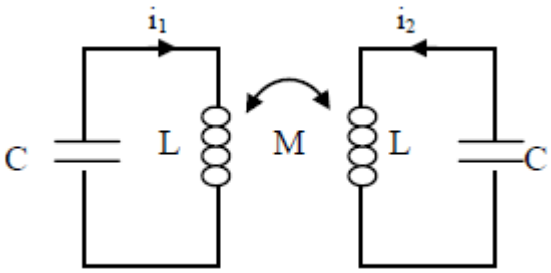
$$\boldsymbol{M_{1\to2} = M_{2\to1}}$$

- En tenant compte des inductances propres et des inductances mutuelles, exprimer le flux magnétique total Φ_1 à travers le circuit C_1 en fonction de i_1 et i_2. Idem pour le flux magnétique dans C_2.

Deux schémas équivalents possibles d'un bobinage en présence de mutuelle induction

Soit on modélise le bobinage par une ***inductance propre + une fém de mutuelle induction***
Soit on modélise le bobinage par ***une fém « totale »*** *regroupant l'induction propre et mutuelle.*

Exemple : Circuits couplés par mutuelle, deux bobines face-à-face
On considère les circuits ci-contre dans lequel les deux bobines et les deux condensateurs sont identiques ; les deux circuits sont dits couplés par leur coefficient d'inductance mutuelle M.



- Déterminer les équations différentielles vérifiées par $i_1$et i_2.
- Faire leur somme et différence pour les découpler.
- Négliger les résistances des bobinages, et déterminer la forme mathématique de $i_1$et i_2
- Faire le lien avec les orbitales moléculaire (levée dégénérescence)

3.5. Energie magnétique stockée par un circuit isolé

On considère l'établissement du courant dans un circuit isolé de toute influence magnétique extérieure. La résistance du circuit est R et son inductance propre L. Ce circuit est relié à une source idéale de tension $E_1(t)$.

- Dessiner un schéma équivalent de ce circuit (modéliser l'induction propre par une fém)
- Par un bilan de puissance, déterminer l'expression de l'énergie magnétique emmagasinée par le circuit.

- Dans le cas d'un solénoïde (supposé infiniment long pour établir l'expression du champ), montrer que l'expression de l'énergie magnétique volumique du chap.1 permet bien de retrouver l'expression de l'énergie magnétique stockée par la bobine.
- En déduire une conséquence sur le signe de l'inductance propre du solénoïde

Energie stockée par un seul circuit
(généralement un bobinage)

$$E_{mag} = \frac{1}{2} L i^2$$

Ce résultat est général, valable pour toute géométrie du circuit (pas uniquement solénoïde).

3.6. Energie magnétique stockée par un ensemble de deux circuits couplés par mutuelle

On considère l'établissement du courant dans deux circuits C_1 e C_2 couplés par mutuelle inductance.
On tient aussi compte des inductances propres de chaque circuit. Le premier circuit est alimenté par une source idéale de tension $E_1(t)$, et le deuxième par une autre source $E_2(t)$.

- Dessiner un schéma équivalent des deux circuits (modéliser l'induction par une fém).
- Par deux bilans de puissance incluant les deux circuits, établir l'expression de l'énergie magnétique emmagasinée par l'ensemble des deux circuits.

Energie stockée par un ensemble de deux circuits couplés
(généralement deux bobinages)

$$E_{mag} = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2$$

$$M^2 \leq L_1 L_2$$

Egalité lorsque le couplage est ***parfait*** : toutes les lignes de champ créées par un circuit traversent le 2e

❖ Démontrer cette inégalité en invoquant :
  - que l'énergie magnétique E_{mag} est nécessairement positive ou nulle (cf. expression intégrale)
  - que son expression est valide quelque soient les valeurs des courants i_1 et i_2 (faire apparaître un polynôme en $x = i_1/i_2$ et dire que le discriminant est négatif ou nul)

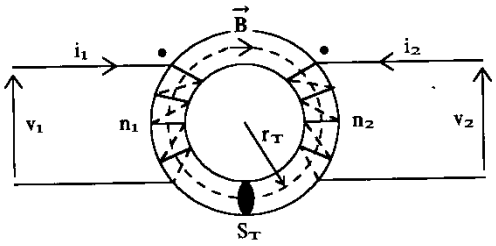
3.7. Exemples de couplage magnétique (parfait ou partiel)

Voici quelques configurations particulières de couplage entre deux bobines identiques disponibles en TP. La valeur expérimentale de l'inductance mutuelle est précisée dans chaque cas :
- deux bobines intriquées réalisent un couplage parfait (une spire de l'une succède à une spire de l'autre) $M \sim L$
- deux bobines mises l'une contre l'autre, axes confondus : $M \sim L/5$
- deux bobines mises l'une contre l'autre, axes orthogonaux : $M \sim L/20$
- deux bobines couplées par l'intermédiaire d'un « circuit ferromagnétique » réalisent un couplage quasi-parfait. C'est un des intérêts majeurs des matériaux ferromagnétiques (cf. schéma ci-dessous) : $M \sim 0{,}9\ L$

3.8. Transformateur idéal : réalisation d'un couplage parfait

Le cas du transformateur idéal est un exemple de dispositif réalisant un couplage magnétique parfait. Ce couplage total entre les deux bobinages est réalisé grâce à un tore ferromagnétique, qui canalise les lignes de champ.

Le transformateur constitué de deux bobinages, l'un de n_1 spires dit « primaire », l'autre de n_2 spires dit « secondaire », enroulés sur un tore ferromagnétique.



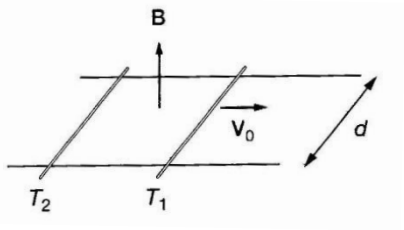
On suppose que le transformateur est idéal :
- on néglige les résistances des enroulements
- le matériau ferromagnétique canalise parfaitement les lignes de champ : le flux de $\vec{B}$ est identique à travers chaque spire
- on néglige la présence de courants de Foucault dans le ferromagnétique

❖ Calculer v_1 et v_2 en fonction de n_1, n_2, et Φ le flux de $\vec{B}$ à travers une spire. En déduire le rapport $\frac{v_2}{v_1}$
❖ Les deux bobines ont des coefficients d'inductance propre L_1 et L_2 et un coefficient d'inductance mutuelle M. Ecrire v_1 et v_2 en fonction de i_1, i_2, L_1, L_2 et M
❖ En déduire que le couplage est parfait : $M^2 = L_1 L_2$

4. Retour sur les actions de Laplace

4.1. Dispositif des rails de Laplace : interaction de deux tiges

Deux tiges T_1 et T_2 identiques (de masse m) sont mobiles sans frottements sur deux rails parallèles (distance d) situés dans un plan horizontal. Un champ magnétique permanent uniforme et vertical règne en tout point.
A l'instant initial, la tige T_1 est animée d'une vitesse $\overrightarrow{v_0}$, tandis que T_2 est immobile. La résistance électrique de chaque tige est égale à R/2 et on néglige la résistance des rails.



1. Par une analyse qualitative, expliquer pourquoi la tige T_2 va se mettre en mouvement, tandis que T_1 va ralentir.

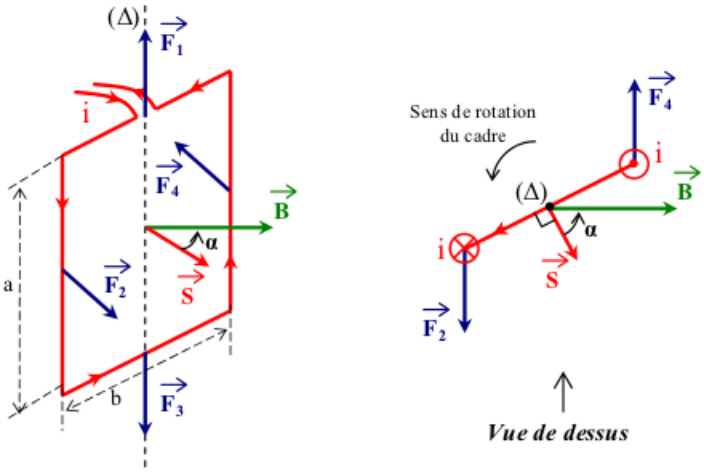
2. Déterminer l'expression de l'intensité du courant induit dans le circuit. Etablir alors les deux équations différentielles vérifiées par les vitesses v_1 *et* v_2 de chacune des tiges.

3. Déterminer l'évolution temporelle de $(v_1 + v_2)$ et de $(v_1 - v_2)$. En déduire l'évolution temporelle de chacune des vitesses. Interpréter les résultats obtenus.

Un bilan de puissance mécanique et électrique mettrait en évidence le même résultat que celui trouvé au paragraphe 2.4 : la puissance mécanique reçue par les barres soumises aux forces de Laplace est égale à la puissance fournie par la f.é.m. d'induction aux porteurs de charge. On retrouve le principe de la conversion électromécanique de puissance.

4.2. Couple de Laplace sur un cadre rectangulaire

On considère le dispositif représenté sur la figure ci-contre. Un cadre rectangulaire, traversé par un courant i car branché à une alimentation, est placé verticalement dans un champ magnétique horizontal et uniforme.



On souhaite montrer que le moment résultant est un couple qui peut s'écrire :

$$\vec{\Gamma} = \vec{\mathcal{M}} \wedge \vec{B}$$

avec

$$\vec{\mathcal{M}} = i\vec{S}$$

- ✪ Expliquer pourquoi la résultante des forces est nulle
- ✪ Expliquer pourquoi le couple résultant s'exerce sur les deux côtés verticaux du cadre
- ✪ En remarquant que le bras de levier de chaque force élémentaire est le même, calculer simplement le couple résultant à partir des deux forces de Laplace s'exerçant sur les côtés verticaux

Manip possibles :

- *Freinage courant de Foucault : oscillations « camembert » métallique dans l'entrefer d'un électroaimant*
- *Foucault : chute ralentie d'un aimant dans un tube en cuivre + effet d'une fente verticale dans le cuivre*
- *Mesure d'inductances mutuelles dans qq configurations particulières avec bobines de TP*

	Relier l'équation de Maxwell-Faraday et la loi de Faraday.
5.4.3. Approximation des régimes quasi-stationnaires magnétique	
Équations de propagation des champs électrique et magnétique dans le vide.	Établir les équations de propagation des champs électrique et magnétique dans le vide. Expliquer le caractère non instantané des interactions électromagnétiques.
ARQS magnétique.	Discuter l'approximation des régimes quasi-stationnaires. Simplifier et utiliser les équations de Maxwell et l'équation de conservation de la charge dans l'approximation du régime quasi-stationnaire. Étendre le domaine de validité des expressions des champs magnétiques obtenues en régime stationnaire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1.7.3. Lois de l'induction	
Flux d'un champ magnétique Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.	Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
Loi de Faraday Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit.	**Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.**
Loi de modération de Lenz.	Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
Force électromotrice induite, loi de Faraday.	Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.

La partie **1.7.4** « **Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps** » aborde le phénomène d'auto-induction puis le couplage par mutuelle inductance entre deux circuits fixes. Elle traite du modèle du transformateur de tensions.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1.7.4. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps	
Auto-induction Flux propre et inductance propre.	Différencier le flux propre des flux extérieurs. Utiliser la loi de modération de Lenz. Évaluer et citer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur. **Mesurer la valeur de l'inductance propre d'une bobine.**
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.
Cas de deux bobines en interaction Inductance mutuelle entre deux bobines.	Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en « influence totale ». **Mesurer la valeur de l'inductance mutuelle entre deux bobines et étudier l'influence de la géométrie.**
Circuits électriques à une maille couplés par le phénomène de mutuelle induction en régime sinusoïdal forcé.	Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante. Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.
Transformateur de tension.	Établir la loi des tensions.
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie.

La partie **1.7.5** « **Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire** » est centrée sur la conversion de puissance. Des situations géométriques simples permettent de dégager les paramètres physiques pertinents afin de modéliser le principe d'un moteur à courant continu ou un dispositif de freinage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1.7.5. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire	
Conversion de puissance mécanique en puissance électrique. Rail de Laplace. Spire rectangulaire soumise à un champ magnétique extérieur uniforme et en rotation uniforme autour d'un axe fixe orthogonal au champ magnétique.	Interpréter qualitativement les phénomènes observés. Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. Effectuer un bilan énergétique. Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.
Freinage par induction.	Expliquer l'origine des courants de Foucault et en citer des exemples d'utilisation. **Mettre en évidence qualitativement les courants de Foucault.**
Conversion de puissance électrique en puissance mécanique Moteur à courant continu à entrefer plan.	Analyser le fonctionnement du moteur à courant continu à entrefer plan en s'appuyant sur la configuration des rails de Laplace. Citer des exemples d'utilisation du moteur à courant continu.