PROGRAMME DE COLLE DE PHYSIQUE
Semaine du 29/03 au 03/04

EM7 - Induction : circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire (cours+exercices)

– Rail de Laplace : conversion électromécanique.
– Cas où un opérateur exerce une force $\vec{F}_{\text{op}}$ sur la tige : équation électrique (E.E.), équation mécanique (E.M.) ; équation vérifiée par v et i ; bilan énergétique. Le cas où le système fonctionne en moteur a été traité en exercice.
– Généralisation :

Lorsqu'un circuit mobile est plongé dans un champ magnétique **stationnaire**, il est le siège d'une conversion de puissance électromécanique vérifiant la relation :

$$\mathcal{P}_{\mathbf{Lap}} + \mathcal{P}_{\mathbf{fem}} = 0$$

avec
– $\mathcal{P}_{\mathbf{Lap}}$ la puissance de la force de Laplace
– $\mathcal{P}_{\mathbf{fem}}$ la puissance fournie par la fem induite par le champ magnétique extérieur $e = -\frac{\mathrm{d}\phi^{\text{ext}}}{\mathrm{d}t}$

- Si $\mathcal{P}_{\mathbf{fem}} > 0$ alors on a un **générateur électrique** ($\mathcal{P}_{\mathbf{Lap}} < 0$, la force de Laplace s'oppose au mouvement. L'opérateur doit donc fournir de l'énergie pour maintenir le mouvement et produire ainsi un courant électrique).

$$\text{énergie mécanique} \Longrightarrow \text{énergie électrique}$$

- Si $\mathcal{P}_{\mathbf{Lap}} > 0$ alors on a un **moteur électrique**.

$$\text{énergie électrique} \Longrightarrow \text{énergie mécanique}$$

Méthode générale :

- ▷ Commencer par analyser le comportement du dispositif étudié en s'appuyant sur la loi de Lenz
- ▷ orienter le circuit
- ▷ en déduire le sens de la normale au circuit par la règle du tire-bouchon (ou de la main droite)
- ▷ établir l'équation électrique (E.E.)
- ▷ établir l'équation mécanique (E.M.)
- ▷ découpler les équations pour obtenir soit une équation en v, soit une équation en i
- ▷ faire le bilan énergétique $\begin{cases} (\text{E.M.}) \times v \\ (\text{E.E.}) \times i \end{cases}$ et éliminer le terme de couplage entre les deux équations.

– Courants volumiques dans un conducteur mobile : freinage par courants de Foucault.
– Haut-parleur : modélisation à l'aide du dispositif des rails de Laplace. Mise en équation. Étude en régime sinusoïdal permanent. Impédance motionnelle. Géométrie d'un haut parleur réel.

Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire	
Circuit en translation rectiligne dans un champ magnétique stationnaire. Rail de Laplace	Interpréter qualitativement les phénomènes observés dans le cas du rail de Laplace. Établir les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. Établir et interpréter la relation entre la puissance de la force de Laplace et la puissance électrique. Effectuer un bilan énergétique.

EM 8a -Ondes électromagnétiques dans le vide (cours exercices simples)

– Force de Lorentz ; Équations de Maxwell.
– Forme intégrée de l'équation de Maxwell-Faraday : on montre, dans le cas d'un circuit fixe placé dans un champ magnétique variable, que l'on retrouve la loi de Faraday $e = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}$.
– On montre également que l'équation de conservation de la charge $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}\,\vec{\jmath} = 0$ est une conséquence des équations de Maxwell.
– Densité volumique d'énergie électromagnétique w_{em} et vecteur flux d'énergie électromagnétique $\vec{\Pi}$.
– Expression locale de conservation de l'énergie électromagnétique. **Dans le vide** ($\rho = 0$, $\vec{\jmath} = 0$) :

$$\frac{\partial w_{\mathrm{em}}}{\partial t} + \mathrm{div}\,\vec{\Pi} = 0$$

– On déduit des équations de Maxwell dans le vide, les expressions :

$$\vec{\Pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \qquad \text{et} \qquad w_{\mathrm{em}} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

– Définition de l'opérateur laplacien vectoriel :

$$\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,(\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{A}) = \overrightarrow{\mathrm{grad}}\,(\mathrm{div}\,\vec{A}) - \vec{\Delta}\vec{A}$$

En coordonnées cartésiennes : $\vec{\Delta}\vec{A} = \Delta A_x \vec{u}_x + \Delta A_y \vec{u}_y + \Delta A_z \vec{u}_z$ avec $\Delta = \nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$ l'opérateur laplacien scalaire.
– Établissement de l'équation d'onde. Dans le vide ($\rho = 0$, $\vec{\jmath} = 0$), $\vec{E}$ et $\vec{B}$ vérifient l'équation d'onde

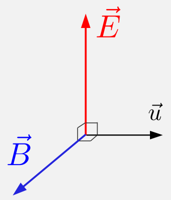
$$\vec{\Delta}\vec{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0} \qquad \vec{\Delta}\vec{B} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \vec{0} \qquad \text{avec} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

– Les ondes planes progressives, de la forme $\vec{E}\left(t - \frac{\overrightarrow{OM}.\vec{u}}{c}\right)$ ou $\vec{E}(\overrightarrow{OM}.\vec{u} - ct)$, se propageant à la vitesse c dans la direction $\vec{u}$, sont solutions de cette équation.
– OEM Plane Progressive Harmonique. Expression en notation complexe : $\underline{\vec{E}}(\vec{r}, t) = \underline{\vec{E}}_0\, e^{j(\omega t - \vec{k}.\vec{r})}$ avec $\vec{k} = k\vec{u}$ représente une onde de pulsation ω se propageant dans le sens de $\vec{u}$ à la vitesse c telle que $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$.
– Intérêt de la notation complexe : si on pose $\underline{\vec{E}}(\vec{r}, t) = \underline{\vec{E}}_0\, e^{j(\omega t - \vec{k}.\vec{r})}$ alors $\vec{\nabla} = -j\vec{k}$ et $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$.
– On établit les propriétés suivantes :

Une onde électromagnétique plane progressive dans le vide se propageant dans la direction $\vec{u}$ a une structure transverse

$$\vec{u}.\vec{E} = 0$$
$$\vec{u}.\vec{B} = 0$$

et $(\vec{u}, \vec{E}, \vec{B})$ forme un trièdre direct où : $\vec{B} = \frac{\vec{u} \wedge \vec{E}}{c}$



qui peut également s'écrire pour une OEMPP harmonique :

$$\vec{B} = \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega}$$

– Onde électromagnétique plane progressive harmonique polarisée rectilignement OEMPPHPR : savoir reconnaître la direction de polarisation et la direction de propagation de l'onde à partir de l'expression de $\vec{E}$. Inversement, savoir exprimer $\vec{E}$ connaissant la direction de propagation et la direction de polarisation (voir cours V.2.) .

– Aspect énergétique :
On établit pour une OEMPPHPR, l'équipartition entre l'énergie électrique et l'énergie magnétique : $w_{\text{el}} = w_{\text{mag}}$ avec $w_{\text{el}} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$ et $w_{\text{mag}} = \frac{1}{2\mu_0}B^2$.

On établit la relation :

$$\langle w_{em} \rangle = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E_0^2$$

et, pour une onde se propageant dans la direction $\vec{u}_x$:

$$\langle \vec{\Pi} \rangle = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c}\vec{u}_x$$

où $\langle\ \rangle$ désigne la moyenne temporelle et où E_0 correspond à l'amplitude du champ électrique.

– Observations de différents états de polarisation sur des animations (seule la polarisation rectiligne est au programme).
– Action d'un polariseur ; Loi de Malus.
– Spectre des ondes électromagnétiques.

Propagation des ondes électromagnétiques	
Propagation des ondes électromagnétiques dans le vide	Énoncer les équations de Maxwell dans le vide. Interpréter qualitativement le lien entre l'équation de Maxwell-Faraday et la loi de Faraday. Établir l'équation de propagation des champs dans le vide.
Équation locale de Poynting	Décrire un bilan d'énergie électromagnétique dans le cas du vide et définir le vecteur de Poynting. Citer des ordres de grandeur de flux énergétiques moyens (Laser, flux solaire, etc.) Utiliser le flux du vecteur de Poynting à travers une surface orientée pour évaluer la puissance rayonnée.
Onde plane, onde plane progressive, onde plane progressive harmonique.	Définir une onde plane, une onde plane progressive et une onde plane progressive harmonique. Expliquer la pertinence et les limites de ces modèles.
Onde plane progressive monochromatique polarisée rectilignement.	Décrire la structure d'une onde plane progressive harmonique monochromatique polarisée rectilignement. Expliquer la pertinence de ce modèle. Décrire la propagation de l'énergie des ondes planes progressives harmoniques polarisées rectilignement. **Mettre en œuvre un protocole expérimental illustrant la polarisation rectiligne d'une onde électromagnétique.**
Spectre des ondes électromagnétiques	Citer les domaines du spectre des ondes électromagnétiques et leur associer des applications.