PROGRAMME DE COLLE DE PHYSIQUE
Ondes électromagnétiques

EM 8a -Ondes électromagnétiques dans le vide

– Force de Lorentz ; Équations de Maxwell.

– Forme intégrée de l'équation de Mawxell-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 $\vec{k} = k\vec{u}$, correspond à une onde de pulsation ω se propageant dans le sens de $\vec{u}$ à la vitesse c telle que

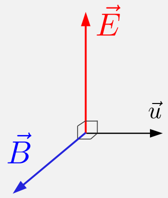
$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

– 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 déduit des équations de Maxwell 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 : $\vec{B} = \dfrac{\vec{u} \wedge \vec{E}}{c}$



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 V.2.)

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

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

avec E_0 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.

EM 8b Réflexion sous incidence normale d'une onde plane progressive monochromatique polarisée réctilignement sur un plan conducteur parfait

– Modèle du conducteur parfait : la résistivité $\rho \to 0$ et la conductivité $\gamma \to \infty$.

– Dans un conducteur parfait :

$$\vec{E} = \vec{0} \qquad \vec{B} = \vec{0} \qquad \vec{\jmath} = \vec{0} \qquad \rho = 0$$

– Relations de passage pour le champ électrique et le champ magnétique :

$$\vec{E}_2 - \vec{E}_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\vec{n}_{1\to 2} \qquad \vec{B}_2 - \vec{B}_1 = \mu_0 \vec{\jmath}_s \wedge \vec{n}_{1\to 2}$$

– Conséquences des relations de passage à la surface d'un conducteur parfait :

▷ la composante tangentielle du champ électrique est nulle à la surface d'un conducteur parfait $\vec{E}_{//} = \vec{0}$.

▷ la composante normale du champ magnétique est nulle à la surface d'un conducteur parfait $\vec{B}_{\perp} = \vec{0}$.

– Détermination de l'onde réfléchie sous incidence normale : l'onde incidente, supposée polarisée rectilignement , ne permet pas à elle seule de vérifier les conditions aux limites. On lui superpose une onde réfléchie, de même pulsation, de même direction de polarisation, se propageant dans la direction opposée, dont on détermine les caractéristiques à l'aide des conditions aux limites.

– Champ résultant : onde stationnaire. Nœuds et ventre de vibration pour le champ $\vec{E}$ et pour $\vec{B}$. Le plan conducteur parfait coïncide avec un nœud de vibration pour le champ électrique. Les nœuds du champ électrique coïncident avec les ventres du champ magnétique.

– Vecteur de Poynting associé à l'onde résultante. Moyenne temporelle du vecteur de Poynting : $\langle \vec{\Pi} \rangle = \vec{0}$.

– Détermination de la densité surfacique de courant à la surface du conducteur parfait, à partir de la condition aux limites pour le champ magnétique.

– Cavité résonnante : détermination des modes propres d'une cavité constituée de deux plans conducteurs parfaits infinis parallèles distants de L par résolution de l'équation de d'Alembert sous forme d'une fonction à variable séparée : $\vec{E}(x,t) = f(x)g(t)\vec{u}_y$.

– Analogie avec la corde de Melde : on peut retrouver les fréquences des modes propres par application de la condition :

$$L = n\frac{\lambda_n}{2}$$

Propagation des ondes électromagnétiques	
Réflexion sous incidence normale d'une onde plane, progressive et monochromatique polarisée rectilignement sur un plan conducteur parfait. Onde stationnaire	Exploiter la nullité des champs dans un métal parfait. Établir l'expression de l'onde réfléchie en exploitant les relations de passage fournies. Interpréter qualitativement la présence de courants localisés en surface. Reconnaître et caractériser une onde stationnaire.
Applications aux cavités à une dimension. Mode d'onde stationnaire	Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique, dans le domaine des ondes centimétriques.