

- 1) Équations de Maxwell en cours et en exercices
- 2) Ondes électromagnétiques dans le vide. Réflexion sur un métal parfait. Onde stationnaire. Cours et exercices.
- 3) En question de cours uniquement : électromagnétisme dans les métaux et les plasmas.

## ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LE VIDE.

### Suite du cours

### III. Cas des OPPS électromagnétiques

- Définition. Représentation complexe associée. Vecteurs amplitudes complexes  $\vec{E}_m$  et  $\vec{B}_m$ .

$$\vec{E}(M, t) = \vec{E}_m \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)] \text{ et } \vec{B}(M, t) = \vec{B}_m \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)]$$

- Règles de calcul avec les représentations complexes.
- Transposition des équations de Maxwell dans le vide dans le domaine complexe. Application : transversalités électrique et magnétique de l'onde ; relation de structure de l'OPPS électromagnétique :

$$\vec{k} \cdot \vec{E} = 0 \quad ; \quad \vec{k} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{et} \quad \vec{B} = \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega} = \frac{\vec{u} \wedge \vec{E}}{c}$$

- OPPS électromagnétique polarisée rectilignement : vecteur polarisation  $\vec{u}_p$ .

$$\vec{E}(M, t) = E_m \vec{u}_p \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi)$$

- OPPS électromagnétique polarisée circulairement : polarisations circulaires gauche et droite.
- Énergie d'une OPPS électromagnétique :  $u_e = u_m$ . Vecteur de Poynting.

### IV. Réflexion sur un métal parfait

- Définition d'un métal parfait. Conséquences sur les grandeurs électromagnétiques.
- Relations de passage métal - vide.
- Réflexion d'une OPPS polarisée rectilignement sur un métal parfait : onde réfléchie.
- Onde résultante stationnaire. Définition générale d'une onde stationnaire. Nœuds et ventres de vibration.
- Vecteur de Poynting.
- Calcul du courant surfacique  $\vec{j}_S$  à la surface du métal.

## ÉLECTROMAGNÉTISME DANS LES MÉTAUX ET LES PLASMAS

### I. Électromagnétisme dans un conducteur

- Conducteur ohmique. Loi d'Ohm locale.
- Équation différentielle temporelle vérifiée par la densité volumique de charge électrique (équation de relaxation). Conséquence : nullité de  $\rho$ .
- Comparaison courant de déplacement / courant de conduction. Équation de Maxwell - Ampère modifiée.
- Équations de diffusion pour  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ .
- Résolution dans un cas particulier sinusoïdal : effet de peau. Longueur de peau  $\delta$ . Absorption de l'onde.
- Vecteur d'onde complexe : pseudo-OPPS. Propriétés, atténuation, vitesse de phase et règles de calcul.

### II. Électromagnétisme dans un plasma

- Définition d'un plasma.

- Modèle. Force magnétique négligeable, interactions entre particules du plasma négligeables. Expression des vitesses des électrons et des ions, densité de courant complexe, conductivité complexe.
- Relation entre  $k$  et  $\omega$ . Discussion : propagation sans atténuation si  $\omega > \omega_p$ . Atténuation sans propagation si  $\omega < \omega_p$  : onde stationnaire évanescence.

### QUESTIONS DE COURS

1. Vérifier que  $s(x, t) = f(x-vt) + g(x+vt)$  est solution de l'équation de d'Alembert unidimensionnelle pour une onde plane scalaire dont les plans d'onde sont orthogonaux à  $Ox$ .
2. Définir une onde plane progressive sinusoïdale (OPPS). Expliciter la double périodicité temporelle et spatiale. Relation entre  $\lambda$ ,  $T$  et  $v$ .
3. Opérations dans le domaine complexe. Application : montrer les transversalités électrique et magnétique de l'OPPS électromagnétique dans le vide et obtenir la relation de structure.
4. Définir une OPPS EM polarisée rectilignement. Dans le cas où une OPPS EM se propage selon  $+\vec{e}_z$ , indiquer ce qu'est une polarisation circulaire. Étudier les deux cas (polarisations circulaires gauchet et droite) selon le déphasage  $\Phi$  de la composante  $E_y$  par rapport à la composante  $E_x$  de  $\vec{E}$ .
5. Une OPPS incidente  $\vec{E}_i$  polarisée rectilignement arrivant de  $-\infty$  sur un plan métallique parfait situé en  $x = 0$ , déterminer le champ électrique  $\vec{E}_r$  de l'onde réfléchie. Déterminer les champs magnétiques  $\vec{B}_i$  et  $\vec{B}_r$ , puis les champs résultants  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ .
6. Établir l'équation différentielle temporelle d'évolution de la densité volumique de charges dans un métal ohmique. Solution, constante de temps et conséquences.
7. Justifier la simplification de l'équation de Maxwell - Ampère dans un milieu conducteur ohmique. Établir les équations de diffusion pour  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ .
8. Établir la solution  $\vec{E}(x, t) = \text{Re}[\underline{E}(x) \exp(-i\omega t) \vec{e}_y]$  du champ électrique dans un métal réel occupant le demi espace  $x > 0$  et vérifiant  $\vec{E}(0, t) = E_m \cos(\omega t) \vec{e}_y$  en  $x = 0$ .
9. Définir un plasma et établir la relation constitutive reliant  $\vec{j}$  et  $\vec{E}$  (en notation complexe et en régime sinusoïdal forcé) avec toutes les hypothèses. En déduire l'expression de la conductivité complexe  $\underline{\gamma}$ .
10. Partant de la relation  $k^2 = \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{c^2}$ , discuter de la propagation ou non d'une pseudo-OPPS dans un plasma selon les cas  $\omega < \omega_p$  et  $\omega > \omega_p$ . Dans le cas de la propagation expliciter la vitesse de phase  $v_\Phi$  et la représenter en fonction de  $\omega$ .