




Ondes électromagnétiques dans le vide

-  Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
-  Difficulté technique et calculatoire ;
-  Exercice important.

Flasher ce code pour
accéder aux corrigés



Questions de cours

Seuls les étudiants du groupe de TD PT* seront interrogés en colle sur les questions marquées d'une étoile, car elles sont plus techniques et/ou moins essentielles ... mais tous les étudiants sont bien sûr invités à les travailler !

18.1 - Établir l'équation de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide pour le champ électrique ou magnétique, au choix de l'interrogateur. Identifier dimensionnellement la célérité c .

18.2 - Établir la relation de dispersion dans le cas particulier d'une OPPH se propageant dans le sens des x croissants en utilisant, au choix de l'interrogateur, les champs réels ou les champs complexes.

18.3 - Établir les écritures complexes des équations de Maxwell dans le cas particulier d'une OPPH de la forme

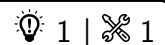
$$\vec{E} = \underline{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{OM})} \vec{e}_y.$$

En déduire la relation de structure.

18.4 - Sur un exemple de champ électrique donné par l'interrogateur (coordonnées cartésiennes uniquement), identifier la direction et le sens de propagation, l'état de polarisation de l'onde, puis en déduire le champ magnétique et le vecteur de Poynting.

(★) **18.5** - Rappeler sans démonstration l'équation de Poynting sous forme locale et en déduire (= démontrer) la forme intégrale. Interpréter physiquement chacun des termes.

Exercice 1 : Onde sphérique



- ▷ OPPH ;
- ▷ Vecteur de Poynting.

On considère un émetteur d'ondes électromagnétiques que l'on assimile à une source ponctuelle : il peut s'agir d'un émetteur de radio, d'un satellite, d'une étoile qui rayonne, etc. L'onde émise est sphérique, de la forme en coordonnées sphériques

$$\vec{E}(M, t) = E_0(r) \cos(\omega t - kr) \vec{e}_\theta \quad \text{avec} \quad k = \frac{\omega}{c}.$$

Le milieu de propagation est assimilé au vide.

- 1 - Par analogie avec une onde plane, identifier le vecteur d'onde \vec{k} de l'onde sphérique.
- 2 - On admet qu'une telle onde vérifie localement la même relation de structure qu'une onde plane. En déduire l'expression du champ magnétique associé.
- 3 - Exprimer le vecteur de Poynting et sa moyenne temporelle.
- 4 - Exprimer la puissance moyenne \mathcal{P} rayonnée à travers une sphère de rayon r . Justifier par un argument physique que cette puissance est indépendante de r . En déduire que $E_0(r) = A/r$ avec A une constante à déterminer.

Exercice 2 : Un exemple d'OPPH

💡 1 | ✂ 3



- ▷ OPPH;
- ▷ Vecteur de Poynting.

On étudie une onde électromagnétique dont le champ électrique est de la forme

$$\vec{E} = E_x \vec{e}_x + E_y \vec{e}_y \quad \text{avec} \quad E_x = E_0 \exp \left[i \left(\frac{K}{3} (2x + 2y - z) - \omega t \right) \right].$$

L'onde se propage dans le vide et sa longueur d'onde est $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$ m.

- 1 - Calculer la fréquence de l'onde. Identifier le domaine du spectre électromagnétique auquel elle appartient.
- 2 - Exprimer le vecteur d'onde \vec{k} en fonction de la constante K , puis calculer la valeur numérique de K .
- 3 - Établir l'équation cartésienne d'un plan d'onde.
- 4 - À partir de l'équation de Maxwell-Gauss, exprimer E_y en fonction de E_x .
- 5 - Exprimer le champ magnétique de cette onde en fonction de E_x et c .
- 6 - Exprimer la densité moyenne d'énergie électromagnétique associée à cette onde. Commenter.
- 7 - Exprimer la moyenne temporelle du vecteur de Poynting de cette onde. Commenter.

Exercice 3 : Loi de Malus

💡 2 | ✂ 1 | Ⓞ



- ▷ Polarisation;
- ▷ Vecteur de Poynting.

Sur un banc optique d'axe (Oz), on place successivement une source de lumière monochromatique de longueur d'onde λ ; un premier polariseur (P) d'axe passant \vec{u} ; un second polariseur (A) d'axe passant \vec{v} appelé analyseur; et un photodétecteur permettant de mesurer l'intensité de la lumière sortant de l'analyseur.

La lumière dans le dispositif est décrite comme une onde plane progressive harmonique. Les directions passantes \vec{u} et \vec{v} du polariseur et de l'analyseur forment un angle θ . On note \vec{u}_\perp (resp. \vec{v}_\perp) le vecteur unitaire tel que la base $\mathcal{B}_P = (\vec{u}, \vec{u}_\perp, \vec{e}_z)$ soit orthonormée directe (resp. $\mathcal{B}_A = (\vec{v}, \vec{v}_\perp, \vec{e}_z)$).

- 1 - Faire un schéma du montage.
- 2 - Donner l'expression dans la base \mathcal{B}_P du champ \vec{E}_P ayant traversé le polariseur en fonction de z , t et λ .
- 3 - Exprimer \vec{E}_P dans la base \mathcal{B}_A . En déduire l'expression du champ \vec{E}_{PA} ayant traversé successivement le polariseur et l'analyseur puis celle du vecteur de Poynting $\vec{\Pi}_{PA}$.

L'intensité lumineuse mesurée par le photodétecteur est définie comme étant la valeur moyenne (spatiale et temporelle) du flux du vecteur de Poynting sur toute la surface S du photodétecteur,

$$I = \left\langle \frac{1}{S} \iint_S \vec{\Pi} \cdot d\vec{S} \right\rangle$$

où le vecteur $d\vec{S}$ est normal au photodétecteur.

- 4 - Montrer que l'intensité peut s'écrire sous la forme $I = I_0 \cos^2 \theta$: cette relation est appelée **loi de Malus**.

Exercice 4 : Absorption par l'atmosphère

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2 | Ⓞ



- ▷ OPPH;
- ▷ Vecteur de Poynting;
- ▷ Bilan d'énergie électromagnétique.

Considérons une onde monochromatique émise par le Soleil, se propageant selon \vec{e}_x dans l'atmosphère assimilée à du vide avec une polarisation selon \vec{e}_y .

- 1 - En notant E_0 l'amplitude de l'onde, donner l'expression de \vec{E} sous forme exponentielle. Donner alors \vec{B} et la valeur moyenne du vecteur de Poynting.

Sous l'effet de phénomènes d'absorption et de diffusion par les molécules présentes dans l'atmosphère, l'onde perd progressivement en intensité : $E_0 = E_0(x)$. Toutes ses autres propriétés sont inchangées. La puissance volumique perdue par l'onde s'écrit $P = \alpha E_0^2$.

2 - Effectuer un bilan énergétique sur une tranche d'atmosphère de longueur dx et de surface S . En déduire une équation différentielle et une longueur caractéristique ℓ .

3 - Déterminer la nouvelle expression de \vec{E} .

4 - Pourquoi peut-on regarder le Soleil lorsqu'il se couche, mais pas lorsqu'il se trouve au zénith ? Pourquoi le Soleil apparaît-il rouge au lever ou au coucher, mais jaune-blanc au zénith ?

Exercice 5 : Bilan de puissance d'un conducteur

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2 | ⚡



▷ Bilan d'énergie électromagnétique.

Considérons un conducteur cylindrique de rayon R , infini, d'axe Oz , soumis à un champ électrique \vec{E} uniforme et stationnaire orienté suivant \vec{u}_z . On raisonne sur un tronçon de cylindre de longueur ℓ .

1 - Quel paramètre caractérise l'aspect conducteur d'un matériau ? Donner son unité et un ordre de grandeur.

2 - Calculer l'intensité traversant le cylindre. En déduire le champ magnétique créé par le cylindre.

3 - Déterminer la puissance dissipée par effet Joule.

4 - Exprimer la puissance rayonnée à travers les parois du cylindre.

5 - En déduire le bilan de puissance et le commenter.

Exercice 6 : Champs d'un laser

💡 3 | ✂ 1



▷ OPPH ;
▷ Vecteur de Poynting ;
▷ Résolution de problème.

Cet exercice est un exercice ouvert, de type résolution de problème, demandant de l'initiative dans le raisonnement mené. Pour aborder un tel exercice, il peut notamment être utile de faire un schéma modèle, d'identifier et nommer les grandeurs pertinentes, d'utiliser l'analyse dimensionnelle, de proposer des hypothèses simplificatrices, de décomposer le problème en des sous-problèmes simples, etc. Le candidat peut également être amené à proposer des valeurs numériques raisonnables pour les grandeurs manquantes ... mais toutes les valeurs données ne sont pas forcément utiles. Le tout est évidemment à adapter à la situation proposée !

Déterminer les amplitudes des champs électrique et magnétique créés par la diode laser que nous utilisons en TP.

Document 1 : Extrait de fiche technique



Diode laser rouge Classe II @635 nm version sur tige bas profil Ref : 203324



Caractéristiques techniques :

- Puissance : 1 mW (classe 2)
- Extrémité : fileté M20
- Maintien : tige D 10mm - L 130mm
- Dimensions tube : diamètre 25mm / longueur 90mm
- Longueur d'onde : 635 nm
- Type : diode laser
- Diamètre faisceau à 5m : 535 mm
- Divergence : 0.9 mRad
- Faisceau en sortie : 1mm
- Température d'utilisation : 10 à 40°C
- Polarisation : linéaire
- Transformateur (fourni) : 6-9V DC