

EM11.6. Ondes électromagnétiques transversales dans un plasma.

Un plasma est un gaz totalement ionisé constitué de cations de charge e et de masse m_i et d'électrons de charge $-e$ et de masse m_e . Au repos, les nombres volumiques d'électrons et de cations ont même valeur n_0 , de telle sorte que le plasma est localement neutre. On étudie la propagation dans ce plasma d'une onde électromagnétique plane progressive transversale se propageant dans la direction $\vec{u}_x$ et décrite par un champ électrique de la forme $\vec{E}(x,t) = E_0 \cos(\omega t - kx) \vec{u}_y$ et un champ magnétique $\vec{B}(x,t)$ de valeur moyenne temporelle nulle. Cette onde met en mouvement les charges: on note $\vec{v}_e(M,t)$ la vitesse de l'électron qui passe au point M à l'instant t et on suppose que la moyenne temporelle $\langle \vec{v}_e(M,t) \rangle$ est nulle en tout point M . On néglige toute autre force que les forces électromagnétiques.

1. Montrer que le plasma reste localement neutre en présence de l'onde; dans la suite on supposera que les nombres volumiques d'électrons et d'ions restent égaux à n_0 . Etablir l'expression du champ magnétique $\vec{B}$ en fonction de $\vec{E}$, k et ω . A quelle condition (C) sur le rapport de la vitesse des particules sur la vitesse de phase de l'onde peut-on négliger la force magnétique devant la force électrique? Cette condition est supposée vérifiée dans la suite, de telle sorte que le mouvement des particules a lieu dans la direction $\vec{u}_y$ du champ électrique.
2. Dans toute la suite, on néglige l'influence du mouvement des ions sur la densité de courants; justifier cette approximation. Justifier que l'accélération d'un électron qui passe au point d'abscisse x à l'instant t est égale à $\partial \vec{v}_e / \partial t$. En déduire en notation complexe la relation entre la densité de courants $\vec{j}$ et le champ électrique $\vec{E}$ et faire apparaître une conductivité complexe σ . Que peut-on en conclure sur la puissance moyenne cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charges ?
3. Etablir la relation de dispersion des ondes. En déduire qu'une OPP ne peut effectivement se propager que si ω est supérieure à une pulsation critique ω_c qu'on exprimera. Exprimer dans ce cas la vitesse de phase et la vitesse de groupe et commenter sachant que la théorie de la relativité interdit la propagation d'une information à une vitesse supérieure à la célérité c des ondes électromagnétiques dans le vide. La condition (C) introduite en 1) est-elle satisfaite ?
4. On admet que la relation de dispersion est valable pour des OPP* de pulsation $\omega < \omega_c$. Quelle est dans ce cas la nature de l'onde dans le plasma? Quelle est alors la puissance moyenne transmise à une interface vide-plasma ? Dans ce cas, l'onde incidente est réfléchiée : la réflexion des ondes hertziennes sur l'ionosphère est utilisée pour propager ces ondes en des points non reliés en ligne droite à l'émetteur, ce qui augmente considérablement sa portée : en déduire un encadrement de n_0 sachant que le procédé est utilisé pour des ondes longues ($\lambda = 1 \text{ km}$) et n'est pas utilisable pour les ondes courtes de la bande FM ($f = 100 \text{ MHz}$).