



BLAISE PASCAL  
PT 2024-2025

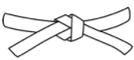
DM 14 – à rendre mercredi 12 mars

# Ondes électromagnétiques

Travailler avec vos cours et TD ouverts est **chaudement recommandé** : un DM est un entraînement, pas une évaluation. Réfléchir ensemble est une bonne idée, mais le travail de rédaction doit être individuel. En cas de besoin, **n'hésitez pas à me poser des questions**, à la fin d'un cours, par mail ou via l'ENT.



Flasher ou cliquer pour accéder au corrigé

Ceinture		Travail à réaliser
	Ceinture blanche	Questions 4 à 8
	Ceinture jaune	Questions 4 à 8
	Ceinture rouge	En entier
	Ceinture noire	En entier

## Communication avec un satellite

Pour communiquer depuis la Terre avec un satellite en orbite, les ondes électromagnétiques doivent traverser l'atmosphère. Celle-ci peut être assimilée au vide en ce qui concerne la propagation des ondes électromagnétiques, à l'exception d'une couche située entre 60 et 800 km : l'ionosphère.

Sous l'influence du rayonnement solaire, l'air présent dans l'ionosphère s'ionise et devient un plasma, contenant des cations (masse  $m_c$  et charge  $+e$ ) et des électrons (masse  $m_e$  et charge  $-e$ ) avec une même densité volumique  $n$ . Ces charges sont soumises à l'action de l'onde électromagnétique.

On considère une onde transverse de la forme  $\vec{E} = \underline{E}_0 e^{i(\omega t - kz)} \vec{e}_x$ , et on cherche à déterminer son devenir quand elle pénètre dans l'ionosphère.

1 - Dans quelle direction se propage cette onde ? Quelle est sa polarisation ? Exprimer le champ magnétique associé dans le vide.

2 - Exprimer la force de Lorentz subie par une charge  $q$  en mouvement à la vitesse  $\vec{v}$ . À quelle condition sur  $v$  est-il possible de négliger la composante magnétique devant la composante électrique ? On suppose cette condition remplie par la suite.

3 - On note respectivement  $\vec{v}_c$  et  $\vec{v}_e$  les vitesses des cations et des électrons. Partant du principe fondamental de la dynamique, montrer que

$$\frac{\partial \vec{j}}{\partial t} = ne^2 \left( \frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_c} \right) \vec{E}.$$

4 - Rappeler l'ordre de grandeur de la masse d'un proton, en déduire celle de la masse d'un cation. Comparer à la masse d'un électron. En déduire une simplification de l'expression précédente.

5 - Montrer que le champ électrique vérifie l'équation de propagation

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{\omega_p^2}{c^2} \vec{E},$$

avec  $\omega_p$  une pulsation caractéristique appelée pulsation plasma, à exprimer en fonction des données du problème.

**Remarque culturelle :** Cette équation, appelée équation de Klein-Gordon, apparaît dans de nombreux domaines : ondes de torsion sur une plaque, physique des particules élémentaires, etc.

6 - Établir la relation de dispersion du plasma.

**7** - Exprimer le champ électrique de l'onde si  $\omega < \omega_p$ . On introduira une longueur caractéristique  $\delta$ . L'onde peut-elle traverser l'ionosphère? Qu'en est-il si  $\omega > \omega_p$ ?

**8** - Les satellites GPS émettent dans deux étroites bandes de fréquences centrées sur 1227 MHz et 1575 MHz. Commenter ce choix sachant que la pulsation plasma de l'ionosphère est de l'ordre de  $10^7 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .