

## II La télégraphie sans fil

Le physicien italien MARCONI est considéré comme un des inventeurs de la transmission à grande distance de signaux électromagnétiques (la *T.S.F.*, télégraphie sans fil, ou radio). Il a reçu à ce titre le prix NOBEL de physique en 1909. On lui doit la réalisation de la première transmission radio transatlantique (1901) entre le nord-est du Canada et le sud-ouest de l'Angleterre, séparés par une distance à vol d'oiseau de 3 500 km.

### II.A Échos ionosphériques

Lors de la première série d'expériences, le récepteur se situait au niveau du sol et l'émetteur était porté par des cerf-volants dont l'altitude, limitée par la longueur du fil, ne dépassait pas  $h = 180$  m. On néglige tout phénomène de réflexion sur le sol, la portée d'un tel émetteur est donc limitée par la courbure de la Terre.

- – 16. Représenter sur un schéma les points d'émission E et de réception R du signal radio correspondant à cette transmission. Montrer qu'elle n'est possible que si la distance  $d = ER$  vérifie  $d < d_{\max}$  et exprimer  $d_{\max}$  en fonction de  $h$  et du rayon terrestre  $R_T$ .  
A.N. : calculer  $d_{\max}$  et conclure.

La propagation sur une grande distance d'ondes radio est en fait possible grâce aux *échos ionosphériques*, qu'on assimilera à des réflexions de l'onde électromagnétique sur la surface de

séparation entre la basse atmosphère (assimilée au vide) et la haute atmosphère (l'ionosphère qui forme un plasma). Une onde électromagnétique incidente plane, progressive, de pulsation  $\omega$ , polarisée rectilignement selon  $(Oy)$ , est émise en direction de ce plasma, dans une direction faisant l'angle  $\theta$  avec la verticale  $(Oz)$ . L'ensemble est représenté sur la figure 5.

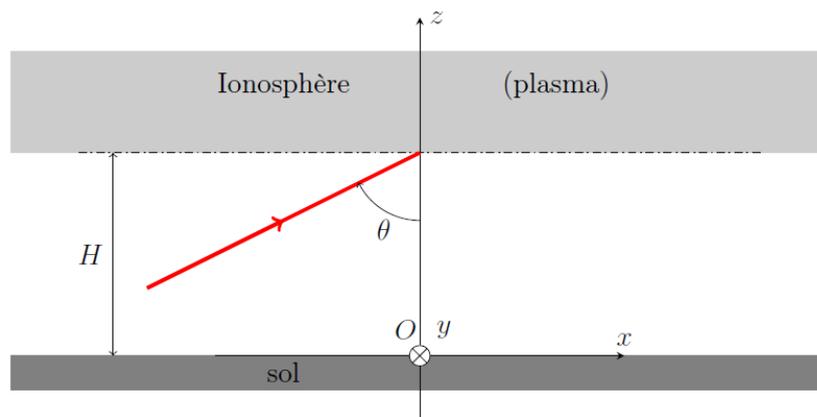


FIGURE 5 – Échos ionosphériques

- – 17. Exprimer la représentation complexe du champ électrique  $\overline{\vec{E}}$  de l'onde incidente d'amplitude  $E_0$  ; on prendra l'origine des phases au point origine  $O$ .

Le champ électrique dans le plasma étant recherché sous la forme  $\overline{\vec{E}}' = E_0' \vec{e}_y \exp \left[ i \left( \omega' t - \vec{k}' \cdot \vec{r} \right) \right]$ , on peut établir l'équation de dispersion (ED)  $\omega'^2 = \omega_p^2 + c^2 \vec{k}'^2$  où  $\omega_p^2 > 0$  est une constante qui ne dépend que des propriétés électromagnétiques locales de l'ionosphère. Par ailleurs, on admettra la continuité de toutes les composantes du champ électromagnétique à l'interface  $z = H$  entre le vide et ce plasma. Une onde électromagnétique réfléchie existe également mais sa prise en compte n'est pas utile dans les calculs qui suivent.

- – 18. Expliciter  $\omega'$  et les composantes  $k'_x = \vec{e}_x \cdot \vec{k}'$  et  $k'_y = \vec{e}_y \cdot \vec{k}'$  en fonction de  $\omega$ ,  $c$  et  $\theta$ .
- – 19. En déduire  $k'_z$  en fonction de  $\omega$ ,  $\omega_p$ ,  $c$  et  $\cos \theta$  et en déduire que l'onde transmise ne peut pas se propager dans le plasma si  $\omega < \omega_\ell$  et exprimer la pulsation limite  $\omega_\ell$  en fonction de  $\omega_p$  et  $\theta$ .
- – 20. *A.N.* : pour l'ionosphère on prendra  $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} \sim 1 \text{ MHz}$  et  $H \sim 175 \text{ km}$ . Calculer  $\cos \theta$  puis la fréquence limite  $f_\ell = \omega_\ell/2\pi$  dans le cas d'une transmission sur une distance totale  $d \sim 3500 \text{ km}$  (en négligeant l'influence de la courbure terrestre). Conclure.

## II.B L'ionosphère

On considérera que l'ionosphère forme un plasma peu dense qui contient une densité particulière uniforme  $n$  d'électrons par unité de volume, et autant d'ions (de forte masse donc presque immobiles) de sorte que la charge totale reste partout nulle. On étudie ici encore la propagation d'une onde plane progressive et monochromatique, de champ électrique complexe  $\vec{E}$  dans le plasma.

- – 21. Dans le cadre non relativiste, en justifiant les simplifications, expliciter l'équation du mouvement des électrons et en déduire la densité volumique de courant dans ce milieu sous la forme  $\vec{J} = \bar{\gamma}(\omega)\vec{E}$ ; préciser l'expression, le nom et la dimension de la grandeur complexe  $\bar{\gamma}(\omega)$ .
- – 22. Montrer que cette expression de  $\vec{J}$  permet d'obtenir une équation de dispersion (ED); préciser en particulier l'expression de la grandeur  $\omega_p$ .
- – 23. Que peut-on dire de la puissance moyenne dissipée dans ce milieu lors du passage de l'onde? Que devient la puissance incidente électromagnétique dans le cas d'un écho ionosphérique?

Les ondes électromagnétiques actuellement utilisées pour la transmission de signaux radio ou télévision vérifient  $\omega \gg \omega_p$ , au contraire des ondes des expériences historiques étudiées précédemment.

- – 24. Citez l'ordre de grandeur des fréquences utilisées actuellement pour ce type de signaux. Quels sont les avantages et les inconvénients d'une transmission à haute fréquence?

**FIN DE L'ÉPREUVE**