

## Correction influence de l'atmosphère

Q20. L'électron subit :

- son poids :  $\|\vec{P}\| = m_e g \approx 10^{-27} \text{ N}$
- la force électrique :  $\|\vec{F}_e\| = e \|\vec{E}\| \approx 10^{-13} \text{ N}$
- la force magnétique :  $\|\vec{F}_m\| = e \|\vec{v}_e \wedge \vec{B}\|$

$\|\vec{P}\|$  négligeable devant  $\|\vec{F}_e\|$

$$\left[ \frac{\|\vec{F}_m\|}{\|\vec{F}_e\|} = \frac{e \|\vec{v}_e\| \cdot \|\vec{B}\|}{e \|\vec{E}\|} = \frac{\|\vec{v}_e\|}{c} \ll 1 \right] \text{ par un électron non relativiste}$$

dans le vide par

une ODPH on a :  $\|\vec{B}\| = \frac{\|\vec{E}\|}{c}$ , on

suppose que cette relation reste vraie dans le plasma

Ainsi l'électron ne subit que la force électrique  $\vec{F}_e = -e \vec{v}_e$

Rq: la force de Lorentz est  $\vec{F} = \underbrace{-e\vec{E}}_{\text{partie électrique}} - e \underbrace{\vec{v}_e \wedge \vec{B}}_{\text{partie magnétique}}$

Q21. On applique la RFD à un électron :  $m_e \frac{d\vec{v}_e}{dt} = -e\vec{E}$

soit en notation complexe :  $m_e i\omega \vec{v}_e = -e \vec{E}$  d'où  $\boxed{\vec{v}_e = \frac{-e}{m_e i\omega} \vec{E}}$

On en déduit le vecteur densité de courant :  $\vec{j}_e = m_e (-e) \vec{v}_e$  (on néglige la contribution des cations)

d'où  $\vec{j}_e = \frac{m_e e^2}{m_e i\omega} \vec{E}$

On a d'après la loi d'Ohm locale :  $\vec{j}_e = \underline{\chi}_e \vec{E}$  soit par identification :  $\boxed{\underline{\chi}_e = \frac{m_e e^2}{m_e i\omega}}$

Le fait que  $\underline{\chi}_e$  soit imaginaire signifie que le champ électrique ne donne pas d'énergie aux électrons en moyenne au cours du temps.

Q22. Les équations de Maxwell s'écrivent :

$\text{div } \vec{E} = 0$  ( $\rho = 0$  dans un milieu neutre)  $\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

$\text{div } \vec{B} = 0$

$\text{rot } \vec{B} = \underbrace{\mu_0 \underline{\chi}_e \vec{E}}_{\vec{j}} + \mu_0 \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

On trouve l'équation de propagation en utilisant :

$\text{rot}(\text{rot } \vec{E}) = \text{grad}(\text{div } \vec{E}) - \Delta \vec{E}$

avec  $\text{rot}(\text{rot } \vec{E}) = \text{rot}\left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left( \mu_0 \underline{\chi}_e \vec{E} + \mu_0 \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = -\mu_0 \underline{\chi}_e \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$

On a donc :  $\Delta \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \chi_e \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$  équation de propagation de

On en déduit la relation de dispersion en remplaçant  $\vec{E}$  par l'expression proposée :  $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - k \cdot r)}$  dans l'équation de propagation :

(avec ici  $\frac{\partial}{\partial t} = i\omega$  et  $\nabla^2 = -k^2$ ) on a  $\frac{\partial^2}{\partial t^2} = -\omega^2$  et  $\Delta \cdot \vec{D} = -k^2 \vec{E}$ )

soit  $-k^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 (-\omega^2) \vec{E} - \mu_0 \chi_e i\omega \vec{E} = 0$

d'où  $k^2 = \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 - \mu_0 \chi_e i\omega = \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\mu_0 \epsilon_0 \chi_e \omega^2}{c^2}$

$\chi_e = \frac{\mu_0 \epsilon_0 \chi_e \omega^2}{\mu_0 \epsilon_0 \omega^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$

on a donc :  $k^2 = \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{c^2}$  avec  $\omega_p = \sqrt{\frac{\mu_0 \epsilon_0 N e^2}{m_e}}$

Q23 - A faible abtitude, il y a beaucoup de particules et donc le phénomène d'ionisation est important mais comme les particules ont beaucoup, elles entrent beaucoup en collision et les électrons se recombinent avec les ions donc le nombre d'électrons libres reste assez faible. A haute abtitude, il y a peu de particules donc peu d'ionisation donc peu d'électrons libres.

Q24 - AN:  $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N_0 \times (1.6 \cdot 10^{-19})^2}{9 \cdot 10^{-31} \times 8.85 \cdot 10^{-12}}} = 90 \text{ MHz}$

$k = \frac{\omega - \omega_p}{c}$  traduit que pour  $\omega > \omega_p$ ,  $k$  est réel donc il y a de la propagation sans absorption dans que pour  $\omega < \omega_p$ ,  $k$  est imaginaire donc il y a de l'absorption sans propagation. On que les ondes traversent l'atmosphère il faut donc  $f > f_p$

Q25 - On  $f > f_p$  on a :  $k = \frac{\sqrt{\omega^2 - \omega_p^2}}{c}$  or  $v_g = \frac{\omega}{k} = c \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 - \omega_p^2}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}}$

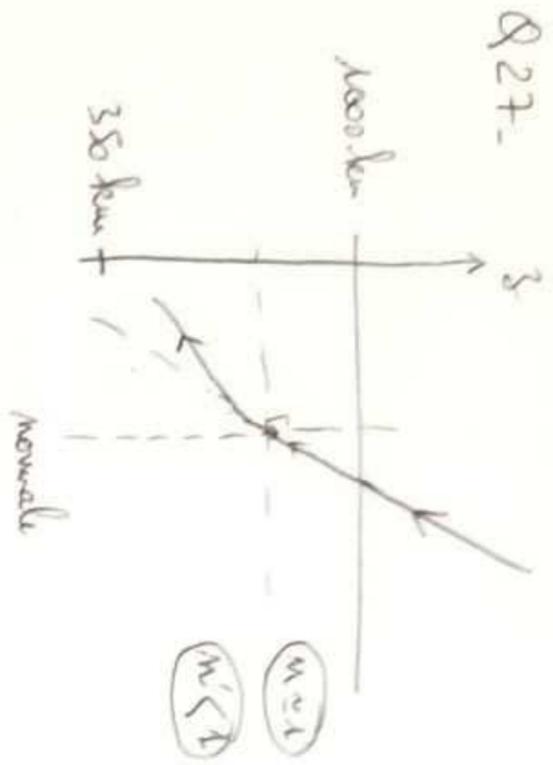
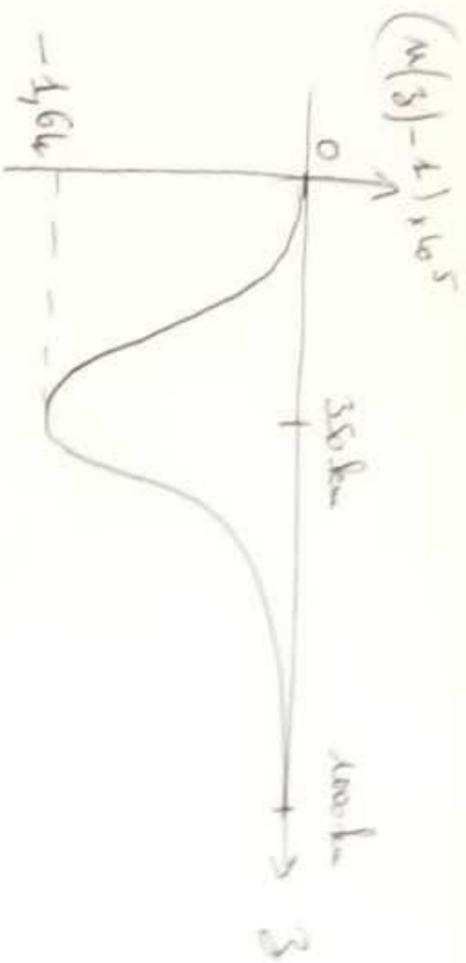
d'où l'indice du milieu :  $n = \frac{c}{v_g} = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} < 1$

Q26 - On  $f_1 = 1575 \text{ MHz}$  on a  $\frac{f_p}{f_1} \ll 1$  on peut donc faire un DL :

$n = \left(1 - \frac{f_p^2}{f_1^2}\right)^{1/2} \approx 1 - \frac{f_p^2}{2f_1^2} = 1 - \frac{\mu_0 \epsilon_0 N e^2}{2(2\pi)^2 m_e \epsilon_0 f_1^2} = 1 - \alpha \frac{m_e}{f_1^2}$

$n_{\text{max}} - 1 = -\alpha \frac{m_e}{f_1^2} = 0$   $n_{\text{max}} - 1 = -\alpha \frac{m_e}{f_1^2} = -4.64 \cdot 10^{-5}$

$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$   $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$   $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$   $f_1 = 1575 \cdot 10^6 \text{ Hz}$



Q27.   
 D'après ce graphique, on voit que dans une certaine mesure, l'air est plus dense (plus de molécules par unité de volume) à l'écart de la normale.   
 Cela correspond à la situation (a)   
 (en effet, entre 350 km et 1000 km d'altitude, l'indice réfringent est > 1)

Q28. L'onde qui se propage dans le vide se déplace à la vitesse constante  $c$  donc le temps de parcours  $t_{vide} = \frac{H_0}{c} = \int_0^{H_0} \frac{dy}{c}$ .

Dans l'atmosphère, la vitesse de propagation dépend de l'altitude, pour parcourir une distance  $dy$  à l'altitude  $y$ , l'onde met le temps :

$$dt = \frac{dy}{v_g(y)} \quad \text{d'où la durée de parcours de l'onde :}$$

$$t_{atmosphère} = \int_0^{H_0} \frac{dy}{v_g(y)} \quad (v_g < c \text{ donc } t_{atmosphère} > t_{vide})$$

On a donc un retard :  $\tau_r = t_{atmosphère} - t_{vide}$

$$= \int_0^{H_0} \frac{dy}{v_g(y)} - \int_0^{H_0} \frac{dy}{c}$$

$$\tau_r = \frac{1}{c} \int_0^{H_0} \left( \frac{c}{v_g(y)} - 1 \right) dy$$

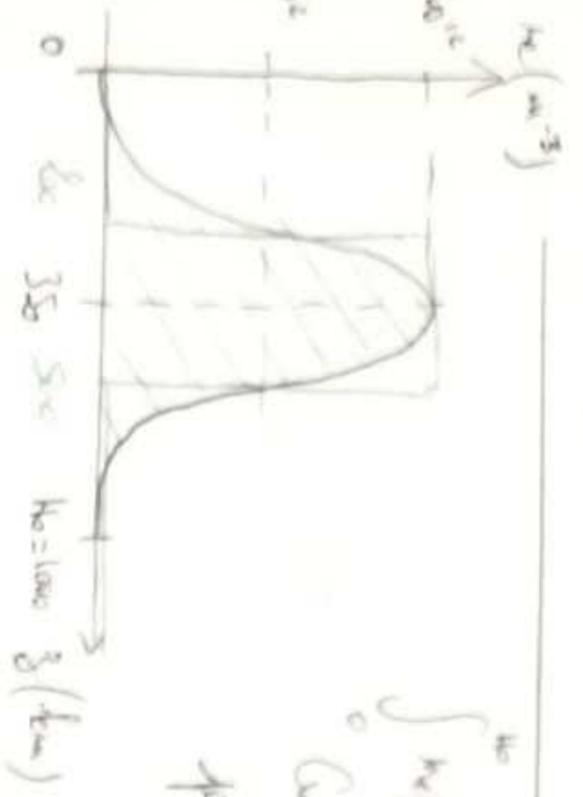
avec  $\frac{c}{v_g(y)} = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}$    
 on a  $\tau_r = \frac{1}{c} \int_0^{H_0} \left( 1 - \frac{f_p^2}{f^2} \right)^{-1/2} dy = \frac{1}{c} \int_0^{H_0} \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{f_p^2}{f^2} \right) dy$    
 d'où  $\tau_r = \frac{1}{c} \int_0^{H_0} \frac{f_p^2}{f^2} dy = \frac{1}{c} \int_0^{H_0} \frac{N^2(y)}{f^2} dy = \frac{1}{c} \int_0^{H_0} N^2(y) dy$    
 car on a  $\frac{f_p^2}{f^2} \ll 1$    
 " CET

donc

$$L_1 = C_T = \int_0^{H_0} \frac{\sigma}{f_1} dy = \frac{\sigma}{f_1} \int_0^{H_0} \sigma(y) dy = \frac{\sigma}{f_1} \left[ \frac{\sigma}{f_1} \right]$$

1/5

Q 29 -  $10^{12}$



$$\int_0^{H_0} \sigma(y) dy = \text{aire sous la courbe } \sigma(y)$$

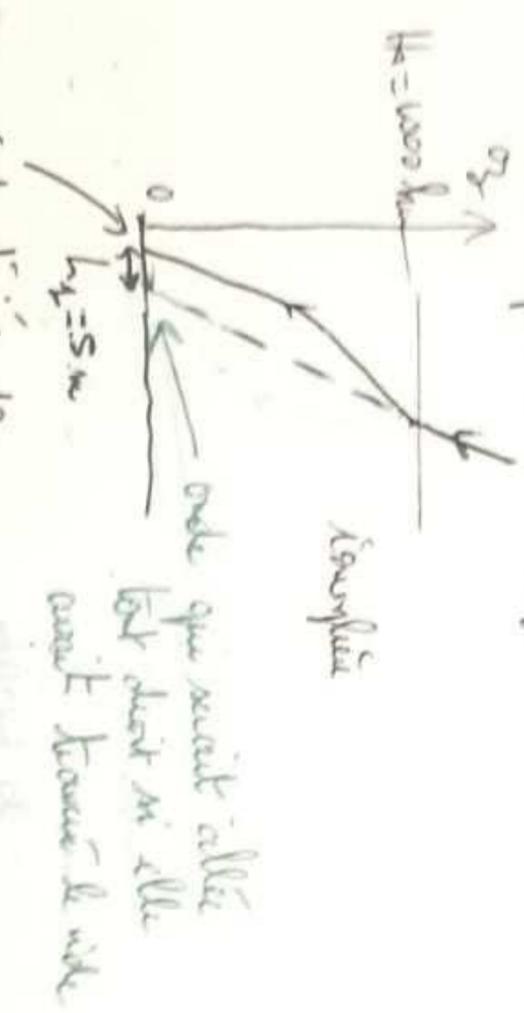
On peut approximer l'aire sous la courbe par l'aire du rectangle ci-dessus :

$$\int_0^{H_0} \sigma(y) dy = 10^{12} \times \left[ (100 - 200) \cdot 10^3 \right] = 3 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-2}$$

AN:  $L_1 = \frac{\sigma C_T}{f_1} = \frac{40,75 \times 3 \cdot 10^{17}}{(4,575 \cdot 10^9)^2} \approx 5 \text{ m}$

cette valeur de  $f_1$  est très faible par rapport à la distance parcourue par les neutrons

En reprenant la figure 2 (b) :



On déduit par l'exemple de l'indice variable en fonction de  $y$

Q 30 - D'après Q 28 -  $C_{\text{net}} = N_1 - N_2 = \frac{\sigma C_T}{c f_1} - \frac{\sigma C_T}{c f_2} = \frac{\sigma (f_1^2 - f_2^2)}{c f_1^2 f_2^2} C_T$

d'où  $C_T = \frac{c N_{\text{net}} f_1^2 f_2^2}{\sigma (f_1^2 - f_2^2)}$

AN:  $C_T = \frac{3 \cdot 10^8 \times 6,7 \cdot 10^{-7} \times (4,575 \cdot 10^9)^2 \times (4,228 \cdot 10^9)^2}{40,75 \left( (4,228 \cdot 10^9)^2 - (4,575 \cdot 10^9)^2 \right)}$

$C_T = 4,9 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$

cette valeur est très importante elle est causée par les fluctuations de densité  $n_0(y)$  de l'écran dans l'exemple

AN:  $L_1 = c \times C_T = 311 \text{ m}$

Q 31 - La carte est obtenue en temps réel grâce à différents récepteurs placés au sol qui mesurent l'azimut pendant de longues heures.

La CET est mesurée au minimum de l'équateur à -30° de longitude à 15h30 le 20 octobre 2019 puis mesurée au minimum de l'équateur à -60° de longitude à 19h55 le même jour.

La CET est d'ailleurs plus grande que la déviation d'électron et importante.

Les électrons sont fournis par l'ionisation des particules qui constituent

l'atmosphère grâce à l'énergie des rayons émis par le soleil.

Elle est effectivement plus de l'équateur que la Terre reçoit le plus d'énergie du soleil et au cours de la journée, la zone qui reçoit beaucoup d'énergie se déplace et est en fait à l'avant du mouvement de la Terre.