

Ionosphère

1. Caractéristiques

L'ionosphère est une couche de la haute atmosphère située entre en moyenne entre 60km et 540km d'altitude, contenant des particules ionisées due au rayonnement solaire. Le degré d'ionisation est plus important le jour que la nuit.

Le degré d'ionisation est donné par :

$$N(h) = N_{\max} - 17,36(h - h_{\max})^2 e^{-}/cm^3$$

$$N_{\max} = 10^{-4}(\text{nuit}) \text{ et } 10^{-6}(\text{jour}) e^{-}/cm^3$$

$$N_{\max} = N(h_{\max}) = 300 \text{ km}$$

2. Propagation dans l'ionosphère :

Les particules ionisées assimilées à des électrons, soumises à un champ électrique E porté par l'onde, subissent une accélération γ telle que : $q \cdot \vec{E} = m \cdot \vec{\gamma}$

où $m = 10^{-30} \text{ kg}$ (masse de l'électron)

et $q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$ (charge de e^-)

en raison des collisions entre particules et électrons en mouvement, l'équation dynamique devient : $q \cdot \vec{E} = m \cdot \vec{\gamma} + \mathcal{C} \cdot m \cdot \vec{v}$ (1)

où \mathcal{C} = nombre de collisions par seconde et v = la vitesse de déplacement des électrons telle que $\gamma = \frac{dv}{dt} = j\omega v$

Il résulte un courant de déplacement des électrons $J = N(h) \cdot q \cdot v$

l'équation (1) devient : $q \cdot E = m(j\omega v) + \mathcal{C} \cdot m \cdot v$ d'où $v = qE / (\mathcal{C} \cdot m + jm\omega)$

Les équations de Maxwell permettent de déterminer l'équation de propagation de l'onde dans l'ionosphère considéré comme le vide ($\mu = \mu_0$; $\epsilon = \epsilon_0$) chargé.

$$\text{rot} E = - \frac{\partial B}{\partial t} \text{ avec } B = \mu_0 H$$

$$\text{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \text{ avec } D = \epsilon_0 E \text{ et } J = N(h) q^2 E / (\mathcal{C} \cdot m + jm\omega)$$

$$\text{rot} H = j\omega \epsilon_0 E (1 + (N(h) q^2 / m \epsilon_0) (1 / (\mathcal{C} \cdot m + jm\omega))) = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r^* E$$

$$\text{avec } \epsilon_r^* = \epsilon_r - j\epsilon'$$

Donc l'ionosphère se comporte comme un milieu conducteur caractérisé par :

$$\text{une permittivité réelle : } \epsilon_r = 1 - N(h) q^2 / (m \epsilon_0 (\omega^2 + \epsilon'^2))$$

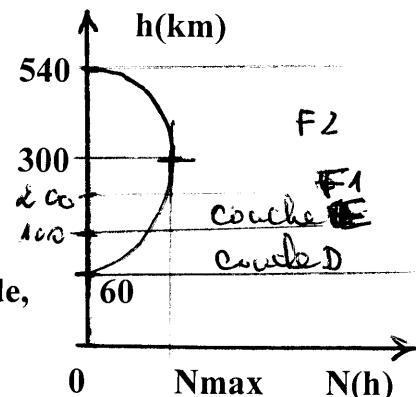
$$\text{une conductivité : } \sigma = N(h) q^2 \mathcal{C} / (m (\omega^2 + \epsilon'^2))$$

on définit $N(h) q^2 / m \epsilon_0 = \omega_p^2$ qui caractérise la fréquence du plasma (couche située à l'altitude h) d'où $f_p = 1/2 \pi \sqrt{N(h) q^2 / m \epsilon_0} = 9 \sqrt{N(h)}$

3. Réflexion et réfraction ionosphérique :

Indice de réfraction de l'ionosphère : $n(h) = \sqrt{\epsilon_r}$

On remarque plus on monte en altitude jusqu'à $h_{\max} = 300 \text{ km}$, plus $N(h)$ augmente donc $n(h)$ diminue d'où la réfraction atmosphérique qui permet à l'onde de retourner vers la terre mais au-delà de 300 km $N(h)$ diminue donc $n(h)$ augmente, l'onde remonte vers le ciel d'où une possible liaison spatiale pour une certaine fréquence.



Superréfraction : $dn/dh < 0$

Infraréfraction : $dn/dh > 0$

Réflexion ionosphérique : $h \leq 300\text{km}$

Loi de Snell-Descartes : $\cos\phi_0 = n(hq)$ pour un retour de l'onde à hq pour une fréquence f_{MUF} telle que $\cos\phi_0 = \sqrt{1 - (fp/f_{MUF})^2}$ qui donne : $f_{MUF} = fp / \sin\phi_0$.

L'onde retourne vers le sol dans l'ionosphère pour une fréquence $f \leq f_{MUFmax}$ $f_{MUFmax} = fp_{max}/\sin\phi_0$ avec $fp_{max} = 9\sqrt{N_{max}} = 9\text{Mhz}$.

Pour établir une liaison spatiale il faut que $f > f_{MUFmax}$, l'onde doit dépasser l'altitude $h_{max} = 300\text{km}$.

MUF = Maximum Utilisation Frequency

4. Atténuation ionosphérique :

Comme un milieu conducteur l'ionosphère atténue l'onde. Cette atténuation est due aux nombreuses collisions qui sont beaucoup plus importantes en couche D.

Coefficient d'atténuation : $\beta = -\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}\sqrt{\epsilon_r/2}\sqrt{-1 + \sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon_0\epsilon_r)^2}}$

Aux HF : $\omega \gg \sigma/\omega\epsilon_0\epsilon_r$ on a $\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon_0\epsilon_r)^2} \approx 1 + 1/2(\sigma/\omega\epsilon_0\epsilon_r)^2$

d'où $\beta = -\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}(\sigma/2\sqrt{\epsilon_r}) = -60\pi\sigma/\sqrt{\epsilon_r}$

avec $\omega \gg \epsilon_0$ on aura $\sigma = N(h)q^2\epsilon/m$. ω^2 et $\epsilon_r = 1 - N(h)q^2/m\epsilon_0\omega^2$

on remarquera que $\beta = K/\omega$ inversement proportionnel à la fréquence donc aux hautes fréquences l'atténuation ionosphérique est faible.

L'atténuation augmente quand f diminue d'où la LUF (Low Utilisation Frequency) pour limiter l'atténuation afin que le signal soit visible.

En région D l'atténuation est plus importante car $N_{\infty} = 10^{17}$

Atténuation à l'altitude h est $AdB = 20\log(1/e^{\beta h})$ et l'atténuation totale due à la traversée de l'ionosphère est $AtdB = \int_{300}^{540} AdB \cdot dh$ ce qui donne :

$$AtdB = -1,16 \cdot 10^{-3} / f^2 \int N(h) \cdot dh$$

Pour $f > 100\text{Mhz}$ $At < 0,2\text{dB}$

$$At = -2,2 \cdot 10^{15} / f^2 \sin\phi_0 \text{ dB}$$

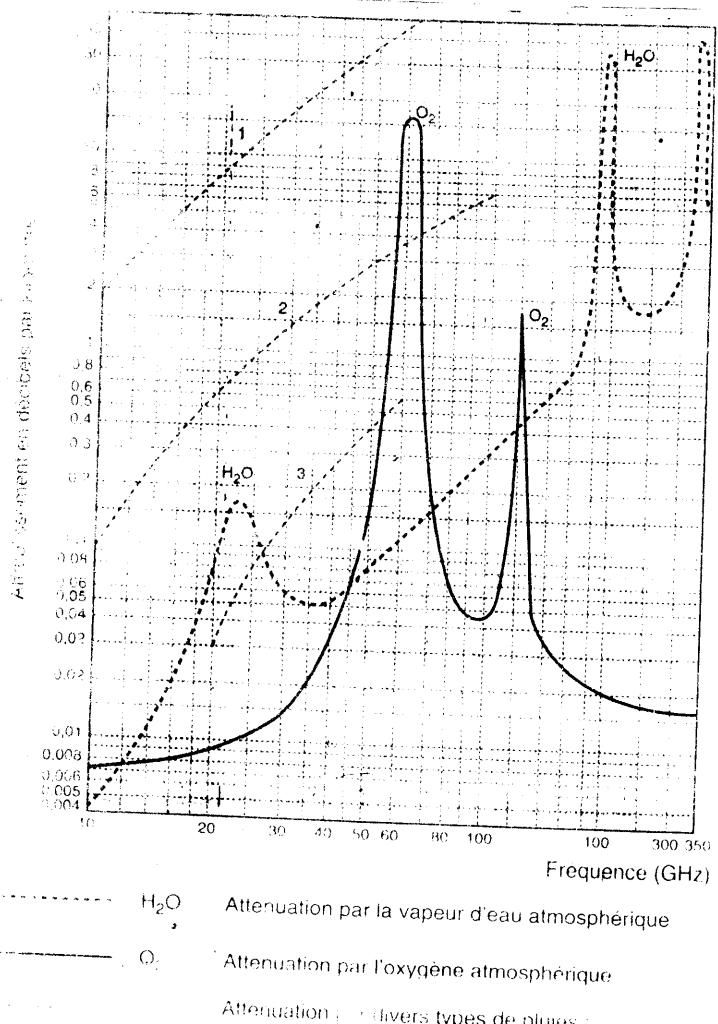


Figure 8.
Courbes d'atténuation atmosphérique
(d'après [35], p. 100):
 $p = 1\,013 \text{ mbar}$;
 $T = 20^\circ\text{C}$;
 $\rho = 7,5 \text{ g/m}^3$.

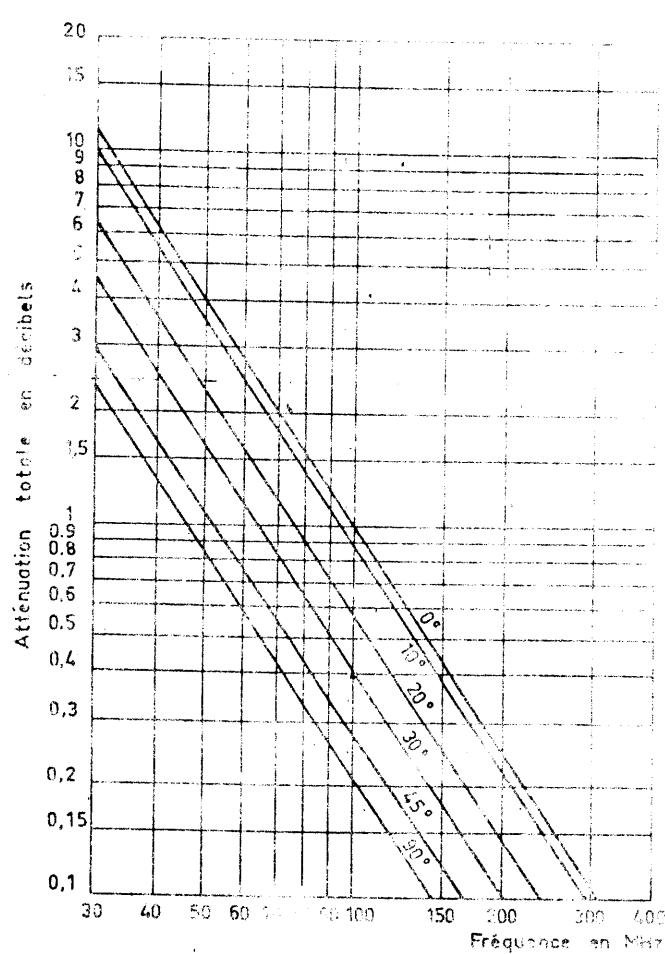


Fig. 9.5. Atténuation à la traversée de l'ionosphère (suite).
Un paramètre : l'angle d'élevation avec le sol.

Atténuation ionosphérique

$$\text{et } \beta = -60\pi\sigma/\sqrt{\epsilon r} = -(60\pi/\sqrt{\epsilon_0}) \left(\frac{Nq^2}{m}\right) \left(\frac{C}{\omega^2}\right)$$

car $\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \ll \epsilon r$ donc $\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon_0\epsilon r)^2} \approx 1 + \frac{1}{2}(\sigma/\omega\epsilon_0\epsilon r)^2$ où $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\text{ kV}$

~~Par conséquent~~

$$\text{et avec } \sqrt{\epsilon r} = \sqrt{1 - \left(\frac{N(h)q^2}{m\epsilon_0}\right)(1/(\omega^2 + C^2))} \approx 1 \text{ pour } \omega^2 \gg \omega_p^2 = \frac{N(h)q^2}{m\epsilon_0} \text{ et}$$

$$\omega \gg C$$

$$\text{on aura } \beta = -60\pi \left(\frac{Nq^2}{m}\right) \left(\frac{C}{\omega^2}\right)$$

on remarque qu'aux basses fréquences, β augmente donc l'atténuation aussi d'où la fréquence limite d'utilisation LUF (Low Utilisation Frequency) pour permettre au signal reçu d'être lisible. A noter que dans la région D (thermosphère) de l'ionosphère, l'atténuation est la plus importante car $N_C = 10^{17}$.

Atténuation ionosphérique totale : $\text{AdB} = -2,2 \cdot 10^{15}/f^2 \sin\phi$

Atténuation à l'altitude h de l'ionosphère :

$$\text{AdB}(h) = 20 \log e^{\beta h} = (20 \log e) \beta h = 8,68 \beta h \text{ avec } \beta = 60\pi \left(\frac{Nq^2}{m}\right) \left(\frac{C}{\omega^2}\right)$$

$$\text{et } N(h) = N_{\max} - 17,36(h - h_{\max})^2$$

Atténuation totale ionosphérique entre h1 et h2 : $\text{AdB} = \int_{h1}^{h2} \text{AdB}(h) dh$

$$\text{AdB} = -60\pi \left(\frac{q^2}{m\omega^2}\right) \int_{h1}^{h2} N(h) C dh$$

en prenant $C = C_{\text{moy}} = 10^4$ et $h = dh$ on aura $\text{AdB} = -$

$$60\pi \left(\frac{q^2}{m\omega^2}\right) C_{\text{moy}} \int_{h1}^{h2} N(h) dh$$

$$\text{ou } N(h) = N_{\max} - 17,36(h - h_{\max})^2$$

on obtient $\text{AdB} = -2,2 \cdot 10^{15}/f^2$ pour un trajet vertical $\phi = 90^\circ$

sinon $\text{AdB} = -2,2 \cdot 10^{15}/f^2 \sin\phi$

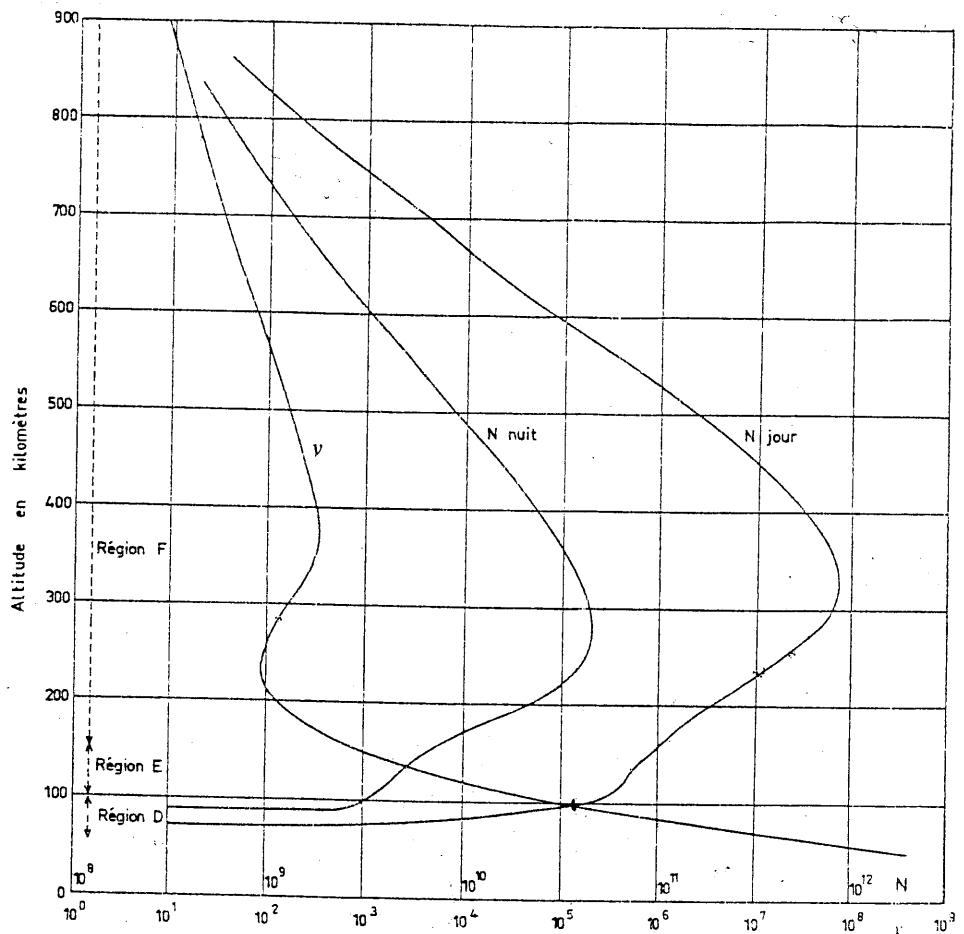


Fig. 9.1. Profil de l'ionisation N (el./m³) et de la fréquence des collisions ν (s⁻¹).
Exemple type pour des latitudes moyennes.

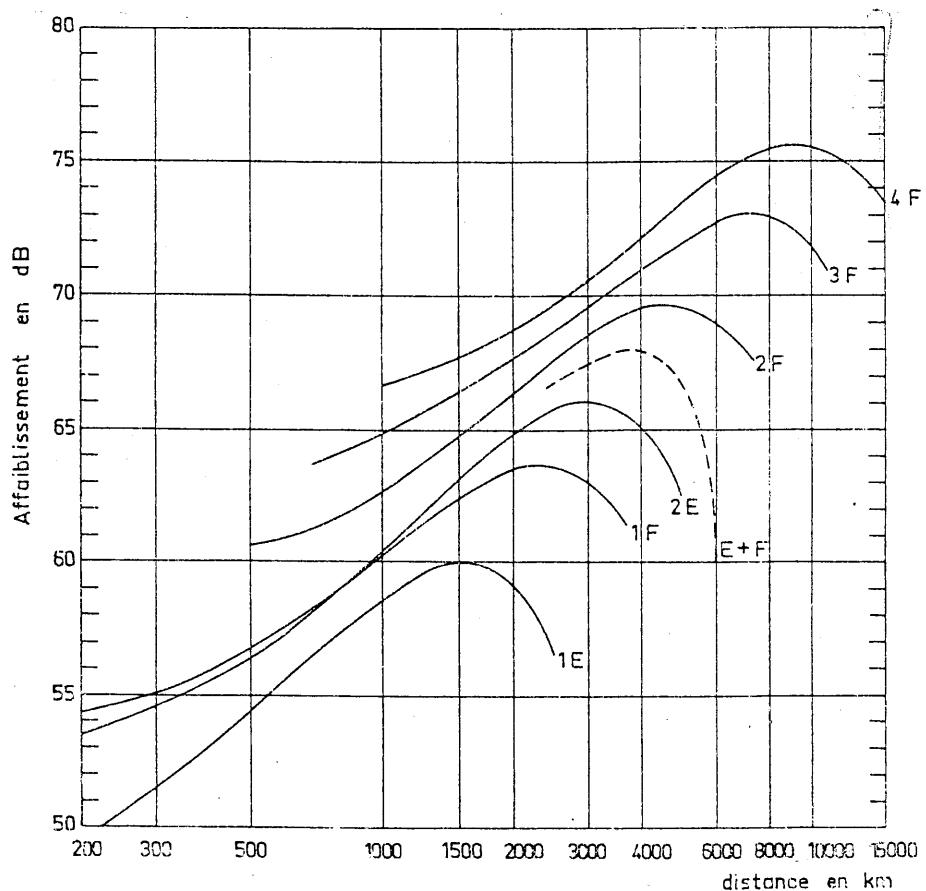


Fig. 9.11. Affaiblissement spatial ionosphérique.