

OEM3 Approche documentaire

Ionosphère et communications

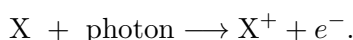
I L'ionosphère

L'ionosphère est la région la plus élevée de l'atmosphère, comprise entre 80 et 800 km d'altitude. Elle est soumise au rayonnement solaire direct qui provoque l'ionisation d'une partie des molécules et la formation du plasma ionosphérique.

On distingue trois couches dans l'ionosphère :

- entre 80 et 100 km la **couche D**, composée principalement de molécules de dioxygène et de diazote, partiellement ionisées,
- entre 100 et 150 km une zone de transition appelée **couche E**,
- au dessus de 150 km la *couche F* principalement composée d'oxygène atomique partiellement ionisé.

Le processus d'ionisation d'un atome ou d'une molécule X peut s'écrire :



Les photons mis en jeu sont principalement des photons du domaine ultraviolet dans les couches E et F et des photons X dans la couche D.

La densité électronique n_0 au sein de l'ionosphère dépend fortement du flux solaire. Elle présente donc des variations diurnes (elle est plus grande le jour que la nuit), saisonnières (elle est plus grande l'été que l'hiver) et elle dépend de l'activité solaire qui présente des cycles d'une période moyenne de 11 ans.

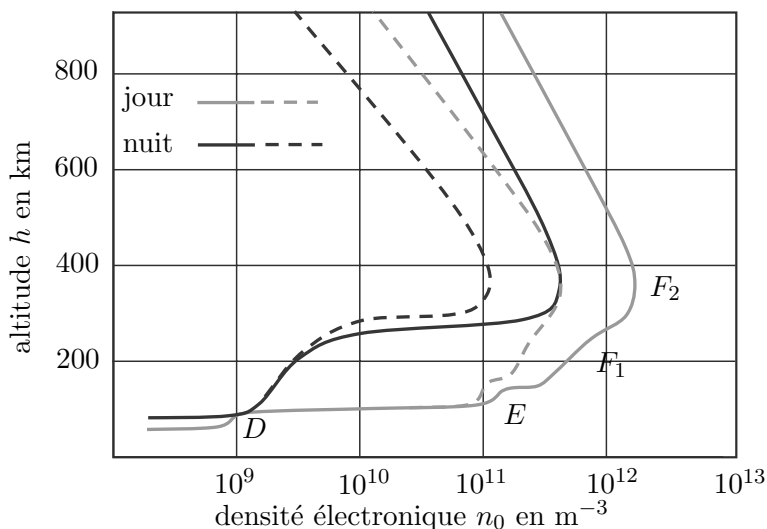


FIGURE 1 – Densité électronique n_0 en fonction de l'altitude z en un lieu de latitude moyenne, le jour (courbes gris clair) et la nuit (courbes gris foncé), pour une activité solaire maximale (courbes en trait plein) ou minimale (courbes en tireté).

La figure 1 montre des courbes typiques de variation de n_0 avec l'altitude z . Remarquer l'échelle logarithmique. Les ordres de grandeur sont :

- $n_0 \sim 10^9 \text{ m}^{-3}$ dans la couche D,
- $n_0 \sim 10^{10} \text{ m}^{-3}$ dans la couche E,
- $n_0 \sim 10^{11}$ à 10^{12} m^{-3} dans la couche F.

Remarque

La couche E n'existe que le jour et la couche F peut se diviser en deux couches F_1 et F_2 de jour pendant une période où l'activité solaire est maximale.

II Télécommunications à travers l'ionosphère

La communication avec un satellite situé au delà de l'ionosphère et les télécommunications par satellite nécessitent de faire propager des ondes à travers l'ionosphère. Or seule une onde de pulsation supérieure à la pulsation ω_P peut se propager dans un plasma. D'autre part la pulsation plasma augmente avec la densité électronique, puisque :

$$\omega_P = K\sqrt{n_e} \quad \text{où} \quad K = \frac{e}{\sqrt{m_e \epsilon_0}} = 56,3 \text{ USI},$$

c'est donc dans la couche F qu'elle est la plus grande. Ainsi, la pulsation de coupure de l'ionosphère est $(\omega_P)_{\text{couche } F} \sim 10^7 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ et sa fréquence de coupure :

$$f_{C,\text{ionosphère}} = (f_P)_{\text{couche } F} \sim 10 \text{ MHz} .$$



Il faut retenir cet ordre de grandeur.

Les communications entre un satellite et le sol se font à des fréquences de quelques centaines de mégahertz, ce qui correspond bien à des fréquences pouvant se propager dans l'ionosphère. La télévision par satellite utilise des fréquences de l'ordre de 10 GHz et le système GPS deux fréquences voisines de 11 GHz pour éliminer l'erreur due à l'ionosphère. Toutes ces fréquences sont largement supérieures à la fréquence de coupure.

III Influence de l'ionosphère sur les télécommunications terrestres

Une onde de fréquence inférieure à $f_{C,\text{ionosphère}}$ envoyée en direction de l'ionosphère ne peut la traverser ; elle est réfléchiée par la couche de plasma comme par un métal.

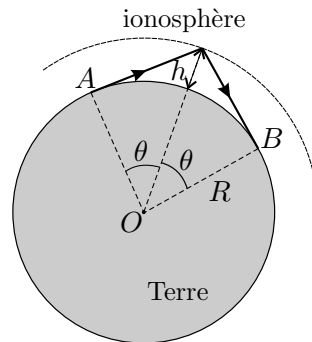


FIGURE 2 – Réflexion d'une onde sur l'ionosphère.

On utilise cette possibilité de réflexion pour augmenter la portée des émetteurs comme le montre la figure 2 : l'onde émise en A atteint le point B grâce à la réflexion sur une couche ionosphérique située à la hauteur h au dessus du sol. La portée est maximale si l'onde est émise horizontalement ; l'observation de la figure montre alors que : $\cos \theta = \frac{R}{R+h}$ où R est le rayon terrestre ; on en déduit la distance entre les points A et B à la surface de la Terre : $\widehat{AB} = 2R\theta = 2R \arccos \frac{R}{R+h}$. Pour une onde émise dans une direction faisant l'angle α avec le

sol, on trouve : $\widehat{AB} = 2R \left(\arccos \left(\frac{R}{R+h} \cos \alpha \right) - \alpha \right)$. Numériquement :

- avec une réflexion sur la couche E d'altitude $h_E = 100 \text{ km}$, la portée maximale théorique vaut environ 2200 km et pour $\alpha = \pi/8$ la distance atteinte est d'environ 450 km,

- avec une réflexion sur la couche F d'altitude $h_F = 300$ km, la portée maximale vaut environ 3800 km et pour $\alpha = \pi/8$ la distance atteinte est d'environ 1200 km.

Pour étudier plus précisément le phénomène on modélise l'ionosphère de manière très simplifiée en la supposant constituée par trois couches dans lesquelles la densité numérique des ions est uniforme. Les paramètres du modèle sont rassemblés dans le tableau ci-dessous ; ils sont choisis de manière à coller au plus près d'une courbe expérimentale (voir figure) correspondant à des mesures faites de jour avec une activité solaire maximale. Les caractéristiques de l'ionosphère évoluant constamment, ces valeurs sont seulement des valeurs typiques.

Couche	Altitude en km	Densité électronique en m^{-3}
D	$h_D = 50$	$(n_0)_D = 1.10^{10}$
E	$h_E = 100$	$(n_0)_E = 1,2.10^{11}$
F	$h_F = 300$	$(n_0)_F = 1,7.10^{12}$

Paramètres du modèle d'ionosphère.

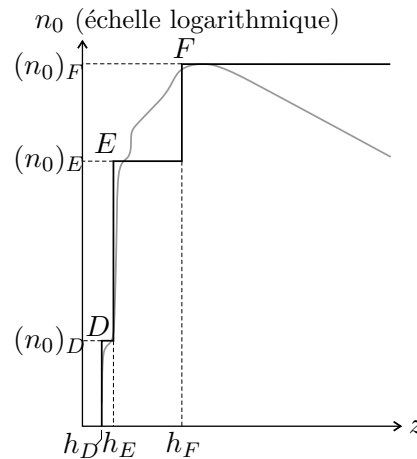


FIGURE 3 – Densité électronique en fonction de l'altitude : courbe expérimentale (en gris) et modélisation (en noir).

Les trois couches ont des densités électroniques telles que : $(n_0)_D < (n_0)_E < (n_0)_F$, donc des fréquences plasma telles que : $(f_P)_D < (f_P)_E < (f_P)_F$, donc des indices optiques tels que, lorsqu'ils sont définis : $1 > n_D > n_E > n_F$. Ainsi, une onde envoyée depuis la surface terrestre en direction de l'ionosphère est, à chaque changement de couche, soit réfractée, soit totalement réfléchié puisque l'indice de la couche suivante est plus faible. Elle ne peut être que réfléchié si sa fréquence est telle que la couche suivante ne la laisse pas se propager.

Intéressons-nous à une onde se réfléchissant sur la couche F . Cette situation est représentée sur la partie gauche de la figure 4. Pour simplifier les calculs on va l'étudier en ignorant la courbure de la surface terrestre, en s'appuyant sur le schéma donné sur la partie droite de cette figure. L'onde, émise dans une direction faisant l'angle α avec le sol, arrive sur la couche D avec un angle d'incidence $i = \pi/2 - \alpha$; elle est réfractée selon la loi de Descartes $\sin i = n_D \sin r_D$ (en prenant l'indice de l'air atmosphérique égal à 1) puis arrive sur la couche E avec un angle d'incidence $i_D = r_D$, subit une deuxième réfraction avec $n_D \sin i_D = n_E \sin r_E$ et arrive sur la couche F avec l'angle d'incidence $i_E = r_E$. Si la fréquence de l'onde est telle qu'elle peut se propager dans la couche F (c'est-à-dire si l'indice n_F est défini), la condition pour qu'elle soit totalement réfléchié est :

$$n_E \sin i_E > n_F \quad \Leftrightarrow \quad \sin i > n_F,$$

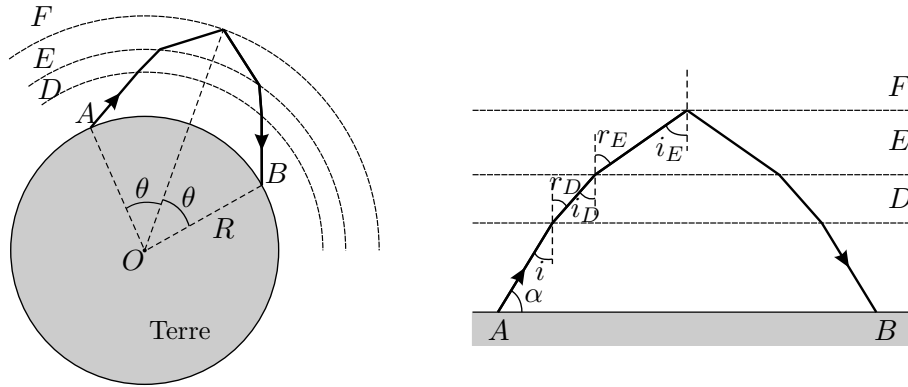


FIGURE 4 – Trajectoire de l’onde et modélisation simplifiée ne tenant pas compte de la courbure de la surface terrestre.

compte tenu des deux lois de Descartes précédemment écrites. Or : $\sin i = \cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}$ et $n_F = \sqrt{1 - \left(\frac{(f_P)_F}{f}\right)^2}$; la condition précédente s’écrit donc : $f < \frac{(f_P)_F}{\sin \alpha}$. Ainsi, pour « profiler » de la réflexion sur la couche F , il faut émettre à une fréquence inférieure à une fréquence maximale qu’il est d’usage d’appeler MUF, acronyme de l’expression anglaise *maximum usable frequency*. Si l’on tient compte de la courbure de la Terre, le calcul est plus compliqué et la condition devient : $f < \frac{(f_P)_F}{\sqrt{1 - \xi + \xi \sin^2 \alpha}}$ où $\xi = \left(\frac{R}{R + h_F}\right)^2$; avec les paramètres du modèle, $\xi = 0,91$.

La MUF est supérieure à la fréquence plasma de la couche F . Elle dépend du temps et du lieu ; de nombreux sites internet donnent la valeur de la fréquence $(f_P)_F$, appelée couramment F0F2 en n’importe quel point du globe en temps réel (ces valeurs sont fournies par des logiciels de prédiction). Avec les valeurs données plus haut et $\alpha = \pi/8$ on calcule une MUF de 31 MHz. Si l’on veut que l’onde se réfléchisse sur les couche E , il faut calculer la MUF avec la fréquence $(f_P)_E$ de cette couche. On peut ainsi régler régler la portée en modifiant la fréquence émise.

Dans la réalité, n_0 varie continument et la trajectoire de l’onde rayon est une courbe dont l’allure est schématisée sur la figure 5. L’altitude z_m du point le plus haut de la trajectoire est donnée par la condition : $\sin \alpha = n(z_m)$, où $n(z)$ est l’indice optique du plasma à l’altitude z . Ainsi, en faisant varier l’angle d’élévation α on modifie l’altitude de réflexion et par conséquent la portée de l’émission ; ceci est illustré sur la figure 5-C.

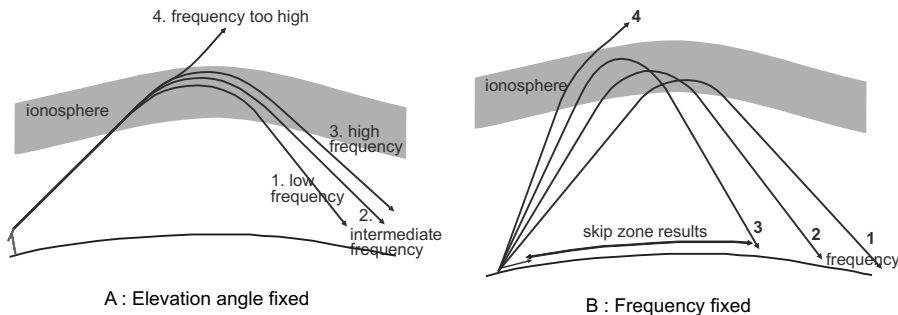


FIGURE 5 – A : trajectoires de l’onde de pour un angle d’élévation α fixé et différentes fréquences ; B : trajectoire de l’onde pour une fréquence fixée et une angle d’élévation variable.

Pour un trajet avec réflexion sur la couche F la fréquence doit non seulement être inférieure à la MUF, mais aussi supérieure à une fréquence appelée LUF pour *lower usable frequency*. Les raisons en sont les suivantes :

- l’onde doit pouvoir traverser la couche E ,

- les fréquences trop basses sont fortement absorbées par la couche D du fait des collisions nombreuses entre les électrons et les molécules dans cette couche.

La LUF dépend du taux d'affaiblissement maximum accepté.

IV Questions

1. Quel processus explique la diminution de la densité électronique la nuit ?
2. Comment justifier l'utilisation de l'optique géométrique dans ce document ?
3. Le sol est conducteur donc réfléchit les ondes électromagnétiques. Comment peut-on en tirer parti ?
4. Justifier l'influence de la fréquence sur la figure 5-A.
5. Pourquoi l'absorption est-elle la plus forte dans la couche D ?