

Comment ça marche ?

La réflexion ionosphérique (1)

Par le radio-club F6KRK

Dans les précédents "Comment ça marche", nous avons vu l'activité solaire et la formation de l'ionosphère. Celle-ci a la propriété de "réfléchir" certaines ondes électromagnétiques. Nous allons examiner ici ce mécanisme.

L'ionosphère (résumé).

- C'est la région la plus élevée de l'atmosphère terrestre (entre **80** et **1000** km).
- En dessous de 100 km, elle est composée principalement de **molécules d'oxygène et d'azote**. C'est là que se forme la couche **D**.
- Au dessus de 150 km, elle est composée principalement d'**oxygène atomique**. C'est là que se forme la couche **F**.
- Entre les deux se situe une **zone de transition** : la couche **E**.
- La composition et la densité de l'ionosphère sont propices à une **photo ionisation** par le rayonnement solaire dans l'**ultraviolet** pour les couches **E** et **F**, et le **rayonnement X** pour la couche **D**.

Photo ionisation

Le processus d'ionisation d'un atome est visualisé sur la figure 1.

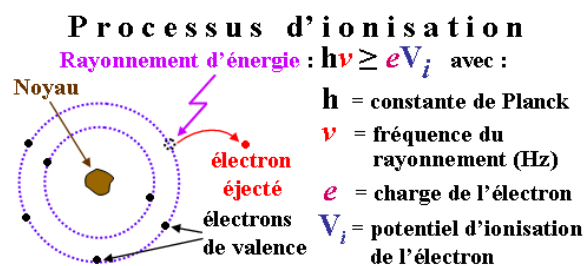


Figure 1.

L'énergie du rayonnement est transférée à l'électron sous forme d'énergie cinétique, d'autant plus élevée que la longueur d'onde (c/ν) est petite. Parallèlement à l'ionisation s'effectue un processus de recombinaison d'autant plus important que la densité atmosphérique est élevée. Sachant que le rayonnement est absorbé au fur et à mesure de sa pénétration dans l'atmosphère, il existe une région où les deux phénomènes s'équilibrent, et il se forme une couche avec l'ionisation qui diminue de part et d'autre d'un maximum.

Propriétés électriques de l'ionosphère.

- Elles sont proches de celles d'un **plasma** (électrons et protons dissociés).
- C'est un milieu **magnéto ionique** (influence du champ magnétique terrestre).

- C'est un milieu **anisotrope** (vitesse de propagation de l'énergie différente de la vitesse de propagation de phase, celle-ci dépendant de la direction de propagation).
- C'est un milieu **dispersif** (indice de réfraction dépendant de la fréquence).

Principaux paramètres de l'ionosphère.

- **Fréquence de plasma (F_N) :**

$$F_N = 18\pi \sqrt{N} \text{ (kHz)}$$
 N est le nombre d'électrons libres par cm^3 (densité d'ionisation).
- **Indice de réfraction (n) :**

$$n = \sqrt{1 - \frac{81N}{F^2}} \text{ (F en kHz)}$$
 L'indice de réfraction a une valeur comprise entre 0 et 1. Il augmente avec la fréquence et diminue avec la densité d'ionisation.
- **Vitesse de groupe (V_G) :**

$$V_G = c.n \text{ (} c = \text{vitesse de la lumière dans le vide} = 3.10^8 \text{ m/s).}$$
 La vitesse de groupe (vitesse de propagation de l'énergie) et la vitesse de propagation de l'onde (vitesse de phase) peuvent être confondues si $F \ll F_N$.
- **Fréquence critique (F_C) :**
 A incidence nulle (à la verticale), V_G devient nulle (réflexion) pour une densité électronique : $N = 1,24.10^4 \times F_C^2$ (F_C en MHz).

Réflexion ionosphérique

Nous avons sur la figure 2 un rappel de la loi sur la réfraction.

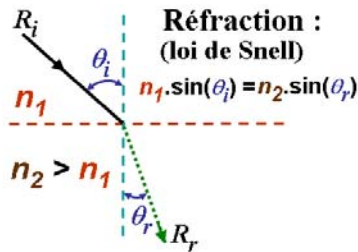


Figure 2.

Appliquée à l'ionosphère où l'indice de réfraction part de 1 (air), passe par un minimum (au maximum d'ionisation), pour revenir ensuite à 1 (vide), nous obtenons la figure 3 qui montre le mécanisme de la réflexion.

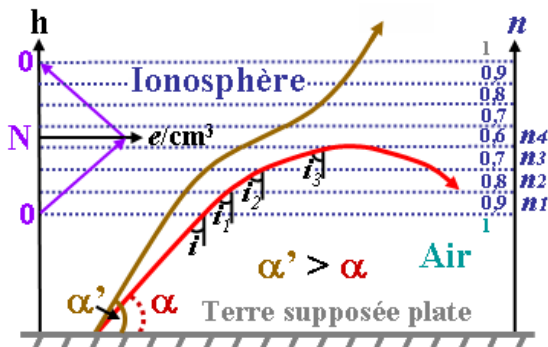


Figure 3.

Avec l'aide de cette figure, nous tirerons les conclusions suivantes :

- La loi sur la réfraction entraîne sur la figure 3 que $n \cos(i_n) = \sin(\alpha) = \text{constante}$.
- La réflexion a lieu dès que la direction de propagation devient horizontale
- Pour une fréquence donnée, la réflexion a lieu d'autant plus bas que N est élevé et α faible
- Pour un angle α et une densité N donnés, la réflexion a lieu d'autant plus bas que la fréquence est faible
- Pour une densité N donnée, la fréquence maxi de réflexion F_C' est d'autant plus grande que α est faible : $F_C' = F_C / \sin(\alpha)$. F_C' est appelée **FMU** ou **MUF** (**M**aximum **U**sable **F**requency)
- Lors de son passage dans l'ionosphère, l'onde subit un retard de propagation d'autant plus important qu'elle pénètre plus profondément (ce retard tend vers l'infini quand F se rapproche de la MUF)
- Quand la densité électronique est insuffisante pour obtenir la réflexion ($F > MUF$), l'onde traverse l'ionosphère et ressort avec la direction d'entrée, mais retardée et légèrement décalée spatialement (retard et décalage d'autant plus faibles que la fréquence est élevée) ⁽¹⁾.

Effets d'une Terre sphérique

Avec une Terre sphérique, quand l'angle α est nul, l'angle équivalent β au niveau du point de réflexion n'est pas nul. Il dépend de la hauteur de ce point, comme montré sur la figure 4.

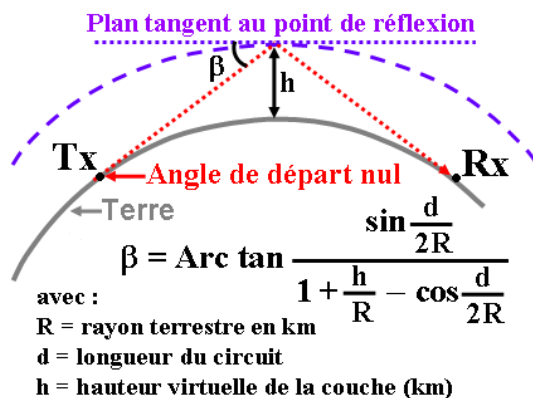


Figure 4.

Ainsi, la FMU ne peut tendre vers l'infini comme la théorie le laisserait supposer. Pour une réflexion sur la couche F, β est égal à 16° minimum. En conséquence, la FMU_F est égale au maximum à 3,6 fois la fréquence critique F. Pour une réflexion sur la couche E, β est égal à 11° environ. En conséquence, la FMU_E est égale au maximum à environ 5,2 fois la fréquence critique E.

Le rayon de Pedersen

En incidence verticale, la FMU est égale à la fréquence critique. En incidence oblique, la FMU augmente selon l'inverse du cosinus de l'angle α . Pour une fréquence comprise entre F_c et la FMU, il existe une incidence comprise entre la verticale et celle de la FMU pour laquelle la réflexion conduit au même lieu de réception. Cette deuxième réflexion se fait à un niveau plus élevé et est appelée "rayon haut" ou "rayon de Pedersen". Nous avons sur la figure 5 un exemple d'ionogramme ⁽²⁾ montrant les deux rayons.

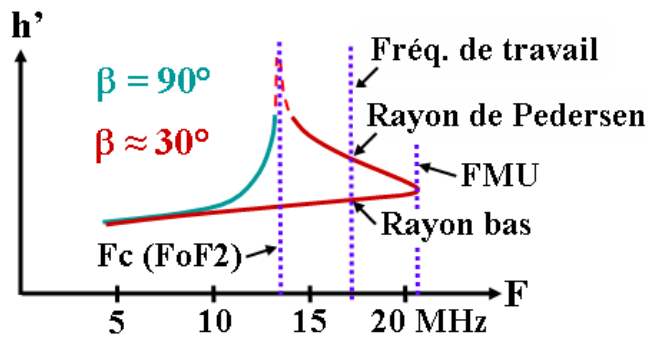


Figure 5.

Dans les prochains "Comment ça marche", nous verrons l'influence du magnétisme terrestre, les perturbations et la propagation ionosphériques.

La Rubrique "Comment ça marche" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@ref-union.org".

Notes.

- 1) *Ces effets sont encore sensibles à 1,5 GHz, fréquence du GPS, obligeant à appliquer des corrections à la réception.*
- 2) *L'ionogramme est un graphique obtenu avec un sondeur ionosphérique à incidence verticale. Il donne la hauteur virtuelle de réflexion (rapport entre le temps de retard de l'onde réfléchi et la vitesse de la lumière) en fonction de la fréquence.*