

Comment ça marche ?

La réflexion ionosphérique (2)

Par le radio-club F6KRK

Dans un précédent "Comment ça marche", nous avons vu le mécanisme de la réflexion des ondes dans l'ionosphère. Puis nous avons abordé le magnétisme terrestre. Nous allons voir maintenant son action sur la réflexion ionosphérique et nous terminerons avec les moyens utilisés pour connaître l'état de l'ionosphère.

Magnétisme et réflexion ionosphérique

Le champ magnétique terrestre est encore important au niveau de l'ionosphère et il a une influence sur les ions et les électrons. La force exercée sur la particule sera maximum pour une direction de propagation de l'onde perpendiculaire aux lignes de force du champ magnétique, et nul pour une direction parallèle. Pour une direction intermédiaire, le champ magnétique aura pour effet de communiquer à la particule un mouvement de rotation, comme montré sur la figure 1.

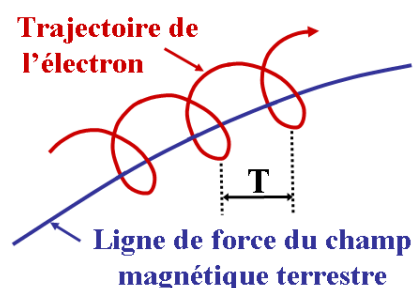


Figure 1.

La fréquence $F_H = 1/T$ est appelée "**gyrofréquence**". Elle est indépendante de la vitesse de la particule. Elle varie en fonction de la position géographique et de l'altitude de réflexion. Sa valeur moyenne est de **1,42 MHz**.

Polarisation caractéristique

Le mouvement des électrons excités par une onde électromagnétique traversant l'ionosphère est très complexe. Il peut être résolu en deux composantes (deux ondes) polarisées elliptiquement en sens inverse. Leurs trajectoires dans l'ionosphère sont indépendantes. Leurs polarisations dépendent de l'angle de propagation par rapport aux lignes de force du champ magnétique terrestre et de la densité électronique. Ainsi les polarisations changent au cours du trajet ionosphérique.

On appelle "**Polarisations caractéristiques**" les polarisations qu'auront les deux composantes à leur sortie de l'ionosphère. La polarisation caractéristique est uniquement fonction de l'angle de propagation de l'onde en ce point par rapport aux lignes de force du champ magnétique terrestre. Autrement dit, la polarisation de l'onde à la sortie de l'ionosphère est indépendante de la polarisation de l'onde à l'entrée ⁽¹⁾.

Ondes ordinaire et extraordinaires

Dans un milieu magnéto ionique comme l'ionosphère, pour $F > F_H$ (gyrofréquence), il existe trois fréquences de plasma pour lesquelles, à incidence verticale, l'indice de réfraction (n) s'annule.

$$F_{N_1} = \sqrt{F(F-F_H)}, \quad F_{N_2} = F, \quad F_{N_3} = \sqrt{F(F+F_H)}$$

La réflexion s'effectue à trois hauteurs croissantes correspondant aux densités électroniques N_1 , N_2 et N_3 . La composante correspondant à F_{N_2} est appelée "**Composante** (onde)

Ordinaire", et celles correspondant à F_{N_1} et F_{N_3} , "**Composante** (onde) **eXtraordinaire**".

Dans l'hémisphère **Nord**, l'onde **ordinaire** a une polarisation caractéristique "**circulaire gauche**". La composante extraordinaire F_{N_3} n'apparaît que dans les régions de hautes latitudes géomagnétiques (près des pôles).

Cas limites de propagation

En propagation longitudinale (dir. parallèle au champ magnétique terrestre), l'onde se dédouble en deux composantes de polarisations inverses.

En propagation transversale (dir. perpendiculaire au champ magnétique terrestre), l'onde se dédouble en deux composantes :

- Onde principale ordinaire (non influencée par le champ magnétique terrestre) à polarisation rectiligne ($\mathbf{E} //$ au champ magnétique), notée \mathbf{F}_o .
- Onde principale extraordinaire à polarisation mixte, notée \mathbf{F}_x . Si $\mathbf{F}_o \gg F_H$, alors $\mathbf{F}_x \approx \mathbf{F}_o - (F_H/2)$ (pour N donné).

Aux pôles géomagnétiques, la composante ordinaire liée à F_{N_2} disparaît et seules subsistent les composantes liées à F_{N_1} et F_{N_3} , à polarisations circulaires inverses.

Le sens de rotation des polarisations s'inverse dans l'hémisphère géomagnétique sud.

Mesure de l'ionosphère

Moyens d'observation de l'ionosphère :

- Observations du soleil dans différentes longueurs d'onde (Nbre de Wolf, éruptions chromosphériques, jets coronaux)
- Relevés magnétiques au sol ou par satellite (indice \mathbf{Am} , orage magnétique)
- Sondeurs ionosphériques au sol ou par satellite
- Riomètre
- Anomalies GPS
- Bilans de liaisons Radio (radioamateurs ?)

Sondeurs ionosphériques.

On distingue les sondeurs à incidence verticale qui donnent l'état de l'ionosphère en un point du globe (2D) et les sondeurs à incidence oblique qui donnent l'état de l'ionosphère dans une région (3D). Ils utilisent les propriétés de l'ionosphère dans la propagation des ondes électromagnétiques. L'ionosphère a les propriétés d'un plasma : absorption de certaines ondes, diminution de la vitesse de propagation et modification du rayon incident. Les effets sont

d'autant plus prononcés que l'ionosphère est dense, et pour une densité donnée, ils sont fonction de la fréquence de l'onde électromagnétique.

Sondeur à incidence verticale

C'est le principe du RADAR :

- Un émetteur envoie à l'instant T_0 un signal CW sous forme d'impulsion en direction du zénith (perpendiculairement à l'ionosphère).
- Un récepteur écoute, et si le signal revient, il note le temps écoulé
- On répète l'opération pour tout le spectre des fréquences pour lesquelles l'ionosphère modifie son comportement.

Le résultat obtenu est un ionogramme. Voir sur la figure 2 un ionogramme "générique".

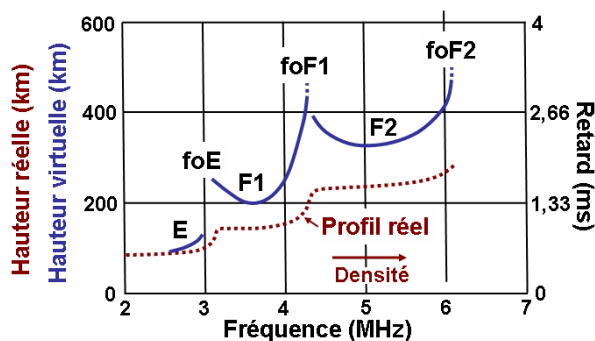


Figure 2.

foE , $foF1$ et $foF2$ sont les **fréquences critiques** pour les couches **E**, **F1** et **F2**. La **hauteur virtuelle** (Km) est égale à $300 \times (T/2)$ (T = retard en millisecondes). La hauteur réelle ⁽²⁾ et la densité s'obtiennent ensuite à l'aide de calculs complexes.

• Comportement de l'ionosphère en fonction de la fréquence d'une onde arrivant perpendiculairement :

- Pour les fréquences basses, l'onde est absorbée par la couche **D**
- Ensuite, il se produit une réflexion sur la couche **E**
- Plus la couche est dense, et plus l'onde est réfléchié bas
- Plus la fréquence augmente, et plus la réflexion a lieu haut
- Arrivé à une certaine fréquence, le temps de réflexion tend vers l'infini, puis au dessus, elle n'est plus réfléchié par cette couche
- Elle est alors réfléchié par la couche supérieure qui a une plus forte densité
- Et ainsi de suite jusqu'à la couche **F2**
- Pour les fréquences supérieures, l'onde ne revient plus sur Terre.

Le Riomètre

Il mesure l'absorption ionosphérique. Un récepteur étalonné mesure le bruit reçu de la galaxie, et le compare avec le bruit attendu ($F=30$ MHz). L'étalonnage est permanent grâce à une diode de bruit. Le bruit attendu est obtenu en prenant le maximum du bruit reçu durant les 15 derniers jours sidéraux (courbe sur la durée d'un jour). Le Riomètre permet de détecter les perturbations ionosphériques :

- **PIDB** (Perturbation Ionosphérique à **D**ébut **B**rusque = augmentation brusque du vent solaire, suite à une éruption chromosphérique (arrivée de l'onde de choc)
- **Absorption aurorale**, associée à un orage magnétosphérique
- **PCA** (Absorption dans la calotte polaire) suite à la sur ionisation de la couche **D** par l'arrivée d'un afflux de rayons **X**.

Voir sur la figure 3 les sorties graphiques données par le Riomètre.

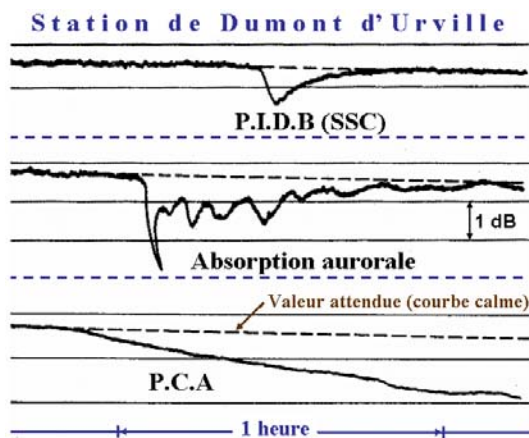


Figure 3.

Utilisation du GPS

Voir sur la figure 4 le principe du GPS.

Principe général du positionnement GPS

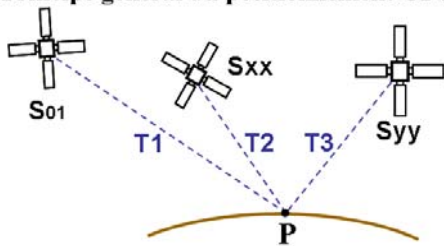


Figure 4.

Connaissant les positions exactes des satellites **S1**, **Sxx**, etc... par rapport au centre de la Terre, et les temps de propagation **T1**, **T2**, **T3**, etc... on peut calculer la position du point **P** par rapport au centre de la Terre. Les satellites donnent leurs coordonnées et sont synchronisés.

Le récepteur mesure les temps relatifs à l'arrivée et calcule sa position.

Principe de la mesure ionosphérique : Les signaux GPS traversent l'ionosphère et sont légèrement ralentis. Ce ralentissement est fonction de l'épaisseur et de la densité de l'ionosphère traversée et provoque des erreurs de positionnement. Si l'on connaît la **position exacte** du récepteur, les erreurs de position selon les trois axes permettent d'attribuer un **delta** de temps de propagation pour chacun des satellites, selon sa position.

En conjonction avec les autres observations de l'ionosphère et du magnétisme dans la région du récepteur, les données extraites des mesures **GPS** permettent de faire une carte en trois dimensions de l'ionosphère (calculs très complexes, nécessitant une grande maîtrise du dépouillement).

Bilans de liaisons

Ils donnent une information sur un circuit particulier. En analysant la réception d'une modulation spéciale et connue, on en déduit la fonction de transfert du canal ionosphérique et en association avec les autres méthodes de sondage, on obtient des informations complémentaires. On peut également analyser des bilans statistiques de propagation, qui là aussi viendront compléter les autres méthodes (reports de stations privées et de radiodiffusion).

Dans le prochain "Comment ça marche", nous aborderons la propagation ionosphérique.

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) *C'est pourquoi en propagation ionosphérique, les antennes émission et réception n'ont pas besoin d'avoir la même polarisation.*
- 2) *La hauteur réelle est plus faible que la hauteur virtuelle car l'onde se propage dans l'ionosphère à une vitesse plus faible que celle de la lumière (profil de vitesse difficile à calculer).*