

Comment ça marche ?

La propagation ionosphérique (1)

Par le radio-club F6KRRK

Après avoir vu la formation de l'ionosphère, le principe de la réflexion ionosphérique et l'influence du magnétisme terrestre, nous allons aborder maintenant la propagation ionosphérique, l'alliée de l'amateur de DX.

Résumé des épisodes précédents

- L'ionosphère est la région la plus élevée de l'atmosphère terrestre, entre 80 et 1000 km. Elle est constituée d'atomes ionisés par le rayonnement du soleil. Les atomes ionisés s'organisent en altitude selon trois couches principales : les couches **D**, **E** et **F**.
 - La couche **D** disparaît la nuit et peut être perturbée par des événements solaires provoquant des émissions de protons et de rayons **X**.
 - La couche **E** permet la circulation de courants électriques, cause de perturbations du magnétisme terrestre.
 - La couche **F** est la plus ionisée. Elle est fortement corrélée à l'activité solaire liée au cycle un décennal des taches (densité moyenne proportionnelle au sunspot). Elle subsiste la nuit grâce à la magnétosphère. Elle peut être perturbée par des événements solaires concernant la chromosphère et la couronne.
 - L'ionosphère a les propriétés du plasma, concernant le rayonnement électromagnétique.
 - Une réflexion ionosphérique a lieu dès que la densité ionosphérique permet un gradient d'indice de réfraction tel que la direction de propagation devient horizontale, ou que la vitesse de l'onde s'annule.
 - Pour une couche et un angle incident donnés, il existe une fréquence maximale pour laquelle la réflexion n'a plus lieu : La **MUF** (**M**aximum **U**sable **F**requency).
- Il existe également une fréquence minimale liée aux pertes par absorption ionosphérique : la **LUF** (**L**ower **U**sable **F**requency).

Absorption ionosphérique

Lors de la traversée de l'onde dans l'ionosphère, la trajectoire des électrons mis en oscillation va être perturbée par des collisions avec des particules ionisées ou neutres. Une partie de l'énergie cinétique des particules mises en mouvement par l'onde va se dissiper, et l'onde va subir une atténuation. Ce processus est appelé "**absorption ionosphérique**". Elle est proportionnelle à la densité ionique et au nombre de collisions entre ions et particules neutres. Elle est **inversement proportionnelle à la fréquence** et elle est maximum dans la partie inférieure de l'ionosphère.

La majeure partie de l'absorption se produit dans la couche **D**. Elle est directement proportionnelle au temps mis par l'onde pour traverser le milieu ionisé (absorption dite "non déviative").

Une autre absorption se produit lorsque l'onde subit de fortes déviations (**n** faible) ce qui est le cas pour une fréquence proche de la fréquence critique (absorption dite "déviative").

Comportement de l'ionosphère en fonction des longueurs d'ondes

- **ELF-ULF (0,3 à 3 kHz)** : Les ondes se réfléchissent sur les couches **D** le jour et **E** la nuit. L'ionosphère et le sol forment une sorte de guide d'onde qui permet des liaisons à grande distance avec des puissances élevées.
- **VLf-LF (3 à 300 kHz)** : Absorption quasi permanente.
- **MF (0,3 à 3 MHz)** : De jour, les ondes sont absorbées par la couche **D** et la nuit, elles sont réfléchies par la couche **E** résiduelle.
- **HF (3 à 30 MHz)** : Contribution de l'ionosphère pour toute la bande.
- **VHF (30 à 300 MHz)** : Réflexions sporadiques pour le bas de la bande.
- **UHF et au dessus** : Pas de réflexion.

Réflexion ionosphérique dans la bande HF

En un lieu de l'ionosphère, une réflexion se fera pour une fréquence inférieure à la **MUF** de ce lieu qui dépend de :

- La densité maxi de l'ionosphère selon le lieu géographique, l'heure locale, la saison et l'activité solaire (**Nombre de Wolf** ou **SunSpot Number**).
- L'angle à l'entrée de l'ionosphère qui détermine la distance de saut et la hauteur de réflexion.

Mais la fréquence devra être supérieure à la **LUF** du circuit qui dépend de :

- L'absorption ionosphérique, fonction de la durée du trajet dans l'ionosphère et des couches traversées.
- L'affaiblissement maximum tolérable pour, en fonction de la **PIRE** émission, obtenir un rapport **S/B** minimum à la réception (PIRE = puissance qui serait fournie à une antenne isotrope pour rayonner un champ identique dans la direction du circuit).

Tout ceci est montré sur la figure 1.

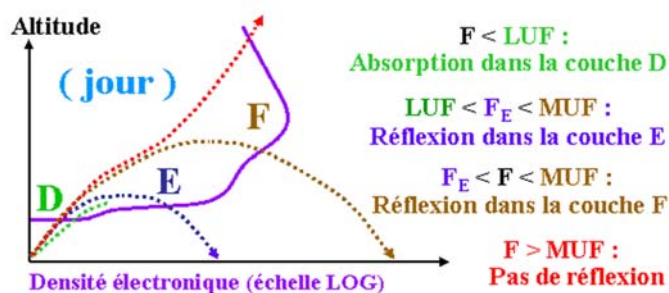


Figure 1.

Circuit de communication

Un circuit qualifie la possibilité d'une liaison radioélectrique entre deux points géographiques distants. Pour une fréquence de travail F_T donnée, un circuit est ouvert quand un ou plusieurs modes de propagations sont possibles compte tenu des caractéristiques de l'ionosphère sur le parcours ($F_T < MUF_{min}$) et des diagrammes des antennes aux extrémités. Il faut aussi que l'affaiblissement de propagation soit compatible avec la puissance de la station émettrice (bilan de liaison positif).

Modes de propagation

1) Une seule réflexion.

Considérons la figure 2.

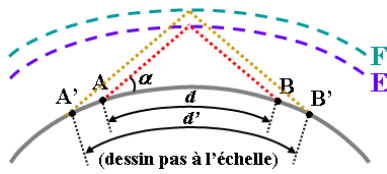


Figure 2.

La distance de saut d est maximum pour $\alpha = 0$ et augmente avec la hauteur de réflexion. Si celle-ci a lieu dans la couche **E** (mode **1E**), $d_{max} \approx 2400$ km. Si elle a lieu dans la couche **F₂** (mode **1F₂**), $d_{max} \approx 4000$ km.

L'affaiblissement de propagation est fonction de la longueur du trajet, des conditions de réflexion et de l'adaptation des aériens au circuit (diagrammes, polarisations).

2) Plusieurs réflexions.

L'affaiblissement de propagation sera augmenté des pertes de réflexion par le sol.

Considérons deux cas :

- Réflexions dans la même couche : Nous avons les modes nE et nF_2 (en pratique, $n = 2$ pour la couche **E** et de **2 à 6** pour la couche **F**).
- Réflexions mixtes : voir deux possibilités sur la figure 3.

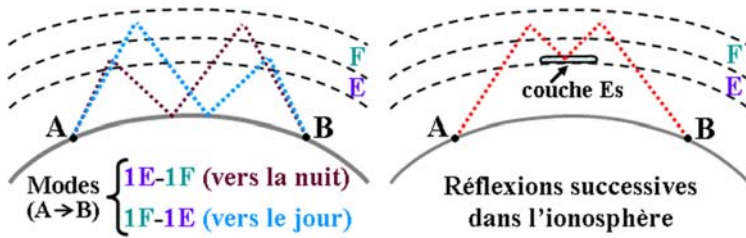


Figure 3.

3) Multi trajets.

Les multi trajets occasionnent du fading et de la distorsion.

- En élévation : Nous pouvons avoir une interférence entre le rayon bas et le rayon de Pedersen ou plusieurs modes ouverts simultanément comme sur la figure 4.

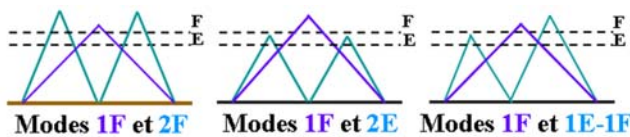


Figure 4.

La parade consiste, soit à utiliser une fréquence de travail plus proche de la **MUF**, soit à avoir l'angle correspondant au mode non désiré dans un creux du diagramme de rayonnement.

- En azimut : Nous pouvons avoir deux trajets par les deux arcs de cercle (stations quasi antipodales). La parade consiste à utiliser des antennes directives dans le plan **H**.

4) Zones de silence

Pour une fréquence comprise entre la fréquence critique et la **MUF**, il existe sur le trajet plusieurs zones où la réception est impossible. Ces zones sont appelées "zones de silence" et vont en rétrécissant avec le nombre de réflexions. Exemple sur la figure 5.

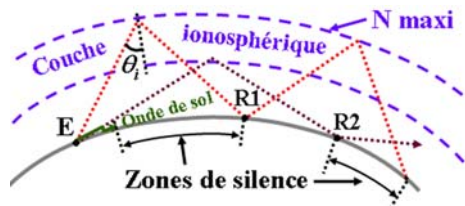


Figure 5.

Les zones de silence sont d'autant plus grandes que la fréquence de travail est proche de la **MUF** (angle de départ nul).

Bilan de liaison

Il consiste à calculer le niveau attendu du signal à la réception et à le comparer au niveau nécessaire pour une qualité acceptable. Il sera fonction de :

- La **PIRE** rayonnée dans la direction du circuit (site et azimut)
- **Moins** l'affaiblissement de propagation en espace libre
- **Moins** les pertes des réflexions successives, sol et ionosphère
- **Plus** le gain de l'antenne de réception pour l'angle d'arrivée

A comparer à la somme du bruit attendu (industriel et atmosphérique) et du rapport signal sur bruit (fonction du type de modulation). La liaison sera possible si le bilan de liaison est positif. Problème : Incertitude sur les valeurs qui oblige à prendre une marge d'environ **10 dB**. La **PIRE** est calculée dans la zone de Fraunhofer pour l'angle de départ correspondant au circuit, et ramenée au niveau de l'antenne. Elle est égale à : $P(\text{out}) \times G(\alpha, \theta)$, avec G = gain du système antenne dans la direction (α, θ) (par rapport à l'isotrope).

L'affaiblissement en espace libre est égal à :

$$A_{(\text{dB})} = 10 \text{ LOG} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

λ est la longueur d'onde et d la longueur du trajet (mêmes unités). On tient compte de la rotondité de la Terre et des hauteurs virtuelles de réflexion.

Le gain de l'antenne de réception est aussi calculé dans la zone de Fraunhofer pour l'angle d'arrivée du circuit (le même que l'angle de départ si le circuit est symétrique).

Pertes dues à l'ionosphère

Trois causes :

- 1) Partage entre l'onde ordinaire et l'onde extraordinaire : Il dépend du lieu géographique de l'entrée dans l'ionosphère, de l'angle qu'y fait la direction de propagation avec le champ magnétique terrestre et de la polarisation de l'antenne émission.
- 2) Absorption ionosphérique : Elle est proportionnelle à la densité résiduelle de l'atmosphère et à la durée du trajet dans l'ionosphère. Elle est inversement proportionnelle à la fréquence et augmente plus vite pour l'onde extraordinaire.
- 3) Polarisation de l'antenne de réception : La perte est de **3 dB** dans le cas général d'une polarisation caractéristique circulaire, mais elle peut augmenter ou diminuer dans le cas d'une polarisation caractéristique elliptique.

Pertes par réflexion sur le sol

L'onde qui se réfléchit sur le sol est le plus souvent composée de l'onde ordinaire et de l'onde extraordinaire à polarisations quasi circulaires inverses. Si la réflexion a lieu sur la mer, il n'y a pas de modification de polarisation, et la perte est faible, de l'ordre de **0,5 à 2 dB** (le coefficient de réflexion est proche de 1, quelle que soit la polar). Si la réflexion a lieu sur le

sol, les pertes seront d'autant plus grandes que le coefficient de réflexion sera faible (désert). Mais elles seront limitées pour la polarisation **H** et maxi pour la polarisation **V**. En conséquence, la polarisation de l'onde réfléchiée sera modifiée, ce qui entraînera un nouveau partage entre les ondes ordinaire et extraordinaire. En principe l'onde **X** serait favorisée. Ce phénomène est appelé **dépolarisation**, et peut amener **3 dB** de pertes, ajoutés aux **2 à 6 dB** de pertes de réflexion en polarisation **H**.

Bruits à la réception

Nous laisserons tomber les brouillages (**QRM**) pour nous intéresser aux bruits "naturels" que sont les bruits industriels (parasites), les bruits atmosphériques (**QRN**) et le bruit galactique. Pour des raisons de simplification, les sources de bruit sont considérées comme isotropes, bien que le bruit atmosphérique provienne surtout des régions tropicales (orages) et le bruit industriel des grandes métropoles. Celui-ci est aussi irrégulièrement réparti en altitude (plus faible près du sol). Avec un bruit isotrope, la puissance de bruit à l'entrée du récepteur est indépendante du gain du système antennaire.

Bruit atmosphérique

Il provient essentiellement des orages tropicaux. Il varie avec la fréquence, mais aussi selon la zone géographique, la saison et l'heure dans la journée. Des cartes mondiales de **FA** moyen (**F_{am}**) à **1 MHz** ont été dressées à 4 heures d'intervalle pour les quatre saisons. Nous avons un extrait sur la figure 6, ainsi que les courbes détaillées pour la France.

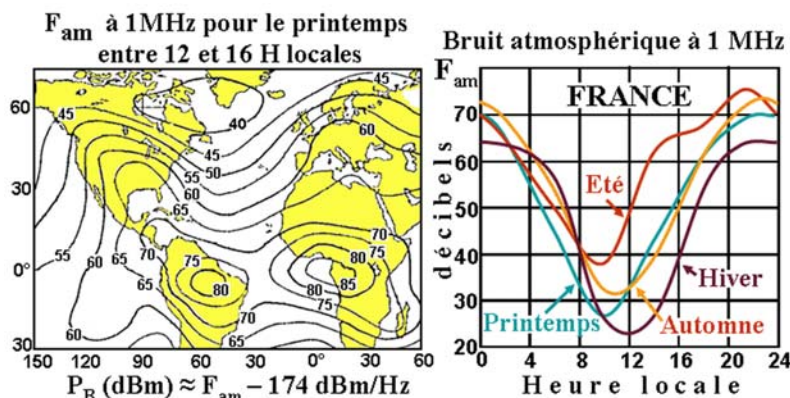


Figure 6.

FA est équivalent à un facteur de bruit généré par l'antenne. Pour avoir le bruit aux autres fréquences, on reporte les valeurs de la fig.6 sur l'échelle "1 MHz" de la figure 7.

Bruit industriel

On l'évalue pour trois types de zones, à savoir les zones urbaines, suburbaines et rurales. La puissance de bruit industriel (isotrope) est donnée par les courbes de la figure 7 (bruit moyen).

Bruit galactique

C'est le bruit radioélectrique en provenance des étoiles de notre galaxie. Il est maximum dans la direction de la voie lactée (écliptique de la galaxie). Dans le haut de la bande HF, le bruit galactique peut dépasser le bruit atmosphérique dans les régions "calmes", en particulier dans les minima des cycles solaires. Voir la figure 7.

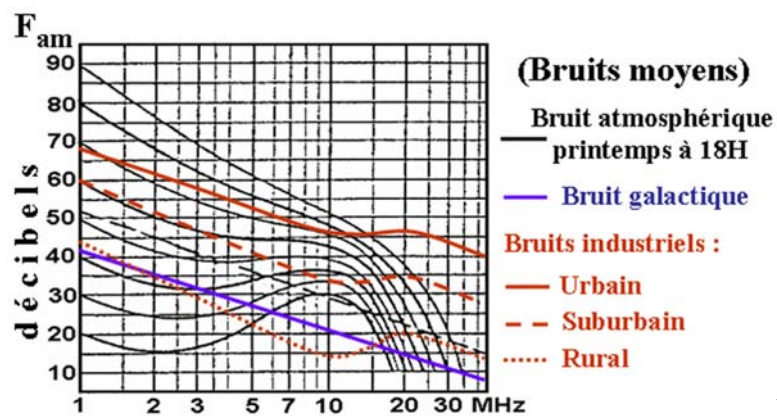


Figure 7.

Facteur de bruit (fb) du récepteur

Il est lié au bruit thermique généré par le récepteur. En **HF**, un facteur de bruit inférieur à **12 dB** n'est nécessaire qu'avec des systèmes antennaires à faible rendement, et dans les minima des cycles solaires.

A suivre dans le prochain "Comment ça marche".

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".