

Comment ça marche ?

Les transmissions radio-numériques

7 - Le canal de propagation

Par le radio-club F6KRR

Après avoir vu les parties émetteur et récepteur du canal de transmission, nous allons poursuivre avec le canal de propagation : bande de cohérence, multitrajets et brouillage.

Le canal de propagation

Par définition, un système de transmission radioélectrique permet de transformer un signal électrique émis en un signal électrique reçu par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Le canal de propagation correspond au système qui fait passer du signal émis au signal reçu et donc tient compte des interactions entre les ondes électromagnétiques et leur environnement.

La propagation idéale n'aurait comme conséquence qu'un retard du signal, indépendamment de son occupation spectrale. Or c'est loin d'être le cas. Nous allons rencontrer des problèmes "objectifs" : la largeur de la bande de cohérence et les multi trajets, et un problème "subjectif"⁽¹⁾ : le brouillage parasite (QRM), volontaire ou non.

La bande de cohérence

C'est la bande de fréquence dans laquelle il y a uniformité du déphasage et de l'affaiblissement. Pour la HF, la bande de cohérence est supérieure à 3 kHz pour toute propagation ionosphérique **normale**. Pour la bande des 160m, elle peut être dégradée par la largeur de bande d'une antenne très raccourcie (fouet ou boucle). Pour une propagation ionosphérique dans la bande HF, elle peut être dégradée de différentes manières :

- Fading dû à l'interférence entre le rayon bas et le rayon de Pedersen. Ceci se produit très ponctuellement en fréquence selon l'heure, la latitude et la direction de propagation.
- Multi réflexions au passage des zones aurorales (surfaces en formes d'anneaux ovales autour des pôles), dues à une répartition horizontale non homogène de l'ionosphère.
- Bruit d'amplitude et de phase importants pour une réflexion tropicale, dus à la diffusion ionosphérique (échos multiples) dans des zones orageuses en fin de journée locale.

La largeur de la bande de cohérence augmente avec la fréquence. Elle peut atteindre une centaine de kHz pour la bande des 10m. Pour les VHF et au dessus, la bande de cohérence n'est plus un problème pour des émissions radioamateurs.

Les multi trajets

Ils se manifestent avec l'arrivée au récepteur par des trajets différents de plusieurs ondes issues du même émetteur. Ces différentes ondes vont interférer entre elles, provoquant des

évanouissements sélectifs. En effet, selon le nombre de trajets et leurs différences de longueurs (donc de leur temps de propagation), leurs effets additifs et soustractifs (évanouissements) se produiront à des fréquences différentes.

Avec une propagation par réflexion ionosphériques nous avons un cas d'évanouissement (fading) lorsque les rayons hauts et bas reçus ont des amplitudes proches et des temps de trajet différents de quelques demi-ondes impaires (effet destructif).

En V-UHF, nous pouvons avoir du fading provoqué par l'interférence entre le rayon direct et une réflexion sur un aéronef (pour les OM qui sont proches d'un aéroport). De même pour un trajet direct et une réflexion par le sol lors d'une modification de l'indice de réfraction de l'atmosphère (pluie).

Mais les effets des multitrajets se font surtout sentir pour des liaisons V-UHF avec les mobiles en milieu urbain. La figure 1 montre les deux cas types de liaisons dans ce milieu.

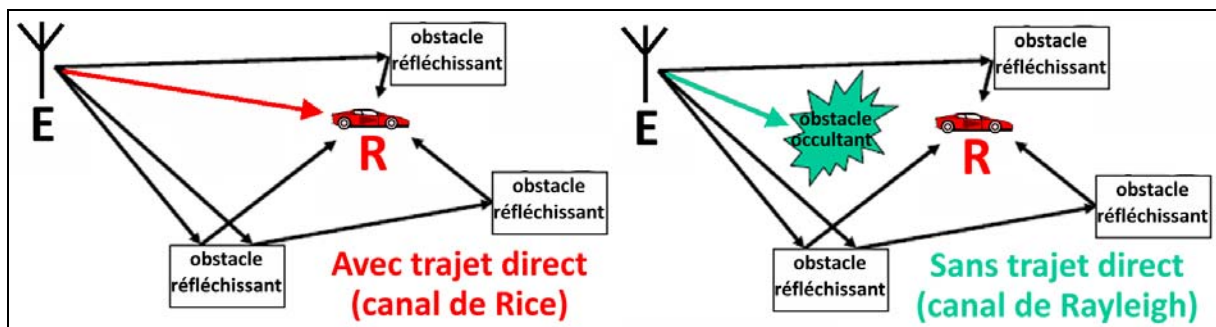


Figure 1 : Les deux cas de fading sélectif résultant de multi-trajets (dessin d'artiste)

Noter que la liaison est réciproque et que les effets se produisent identiquement dans les deux sens de transmission (canal de propagation linéaire).

Le fading de Rayleigh

C'est le plus pénalisant et c'est lui que l'on prend en compte dans les études de propagation en onde de sol. Il se manifeste par des évanouissements sélectifs en fréquence dues aux différences de phase entre les signaux d'arrivée. Les fréquences d'évanouissement changent d'autant plus vite que le mobile est rapide par rapport à la longueur d'onde. Voir sur la figure 2 un résultat de mesures en situation réelle (signal CW).

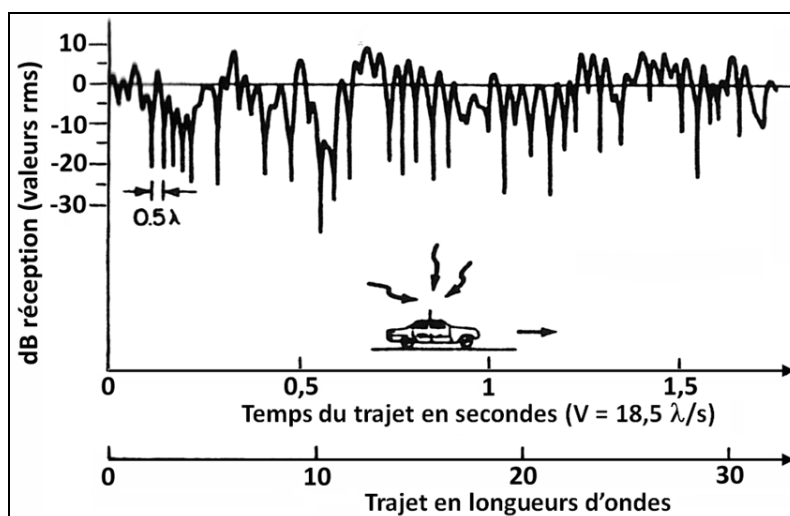


Figure 2 : Effets du fading de Rayleigh sur le niveau de réception

Nous voyons que pour éliminer totalement les conséquences du fading, il nous faudrait une réserve de puissance de 30 dB, soit mille fois. On constate qu'avec une réserve de 10 dB (dix fois) les durées des "trous" sont beaucoup plus courtes et on verra qu'on peut les contrer avec des procédés de codage particuliers (sous-bandes de fréquences et redondance).

Recouvrements inter-symboles

Le deuxième phénomène concerne les écarts temporels entre les différents trajets. Avec eux, il faut considérer la fréquence de modulation (durée symbole) au lieu de la fréquence porteuse. Considérons la figure 3 montrant les effets de trois trajets sur le signal reçu.

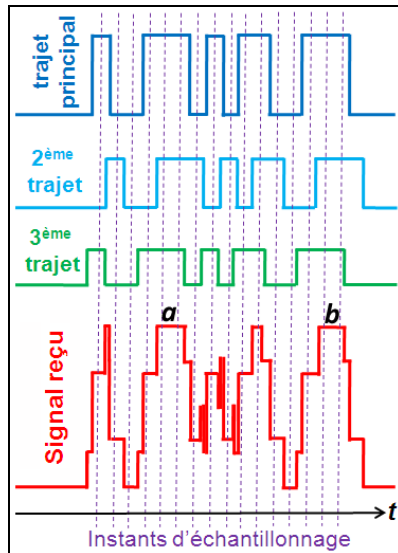


Figure 3 : Effets des multitrajets sur le signal reçu

Nous avons un signal numérique 2FSK transmettant un mot de 16 bits en empruntant trois trajets décalés statistiquement dans le temps d'une durée crête-crête *grosso modo* de 0,8 symbole. Nous voyons que le signal reçu est impossible à décoder correctement. Pour avoir un signal décodable avec un faible taux d'erreurs, il faudrait multiplier au minimum par trois la durée symbole (exemples en *a* et *b* sur la fig. 3). Alors dans ce cas, il faudrait remplacer notre 2FSK par du 8FSK pour conserver le même débit ⁽¹⁾.

Effets combinés

Pour une liaison entre mobiles (ou fixe-mobile), le fading sélectif et le recouvrement inter-symbole ne sont pas des phénomènes stationnaires car on ne retrouve quasiment jamais la même configuration. Alors on tient compte de situations statistiques dont les formulations mathématiques sortent du cadre des "Comment ça marche".

Pour contrer les effets du fading sélectif, nous verrons que l'on utilise la diversité de fréquence (multitude de canaux) avec répartition des données et correction des erreurs. Pour contrer les effets des multitrajets, nous augmenterons la durée symbole et le nombre d'états par symbole. Nous verrons également des solutions pour contrer les deux phénomènes simultanément. Tout cela fera l'objet des prochains "Comment ça marche".

Le brouillage

Le brouillage a le même effet que le fading sélectif et il est traité de la même manière (multicanaux et redondance). Donc nous n'en ferons pas un cas spécial.

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@orange.fr".

Notes.

(1) Rythme symbole en bauds divisé par 4 pour le même débit en bits par seconde. Voir le "Comment ça marche" de juillet 2018 pour avoir des explications sur les Bauds et bits/s et les modes de modulation FSK.