

# Comment ça marche ?

## Les transmissions radio-numériques

### 5 - Densité spectrale, diagramme de l'œil et constellation

Par le radio-club F6KRK

*Après avoir vu les principaux modes de modulation utilisés par les transmissions numériques, nous allons aborder quelques notions liées à l'encombrement spectral de l'émission et à la visualisation des signaux reçus.*

#### Densité spectrale de puissance

Une transmission d'information par radio occupe une certaine largeur de bande. La bande totale des fréquences allouées à ce service n'étant pas infinie, il convient de la partager entre un maximum d'utilisateurs. Chacun d'eux est donc tenu de n'occuper que le canal qui lui est attribué et de ne pas déborder chez le voisin. Le maximum d'efficacité serait donc atteint quand le spectre fréquentiel de son émission aurait une enveloppe rectangulaire de largeur égale à celle du canal. Alors, on cherche à se rapprocher le plus possible de cette perfection. Pour contrôler le résultat, on effectue une mesure de densité spectrale de puissance. Celle-ci est la fraction de puissance contenue dans chaque bande élémentaire de fréquence. Plus cette dernière est petite, et plus la résolution est fine. La densité spectrale est obtenue par intégration de Fourier <sup>(1)</sup> du signal RF modulé par un signal en bande de base avec un spectre uniforme (contenant à égalité toutes les fréquences, comme un bruit blanc). Le temps total d'intégration doit être égal au temps nécessaire aux données pour avoir un spectre uniforme. Cela peut demander une longue suite de données générées par calcul.

Sur la figure 1, nous avons l'encombrement spectral relatif pour trois modulations, le 2FSK (RTTY), le MSK et le GMSK.

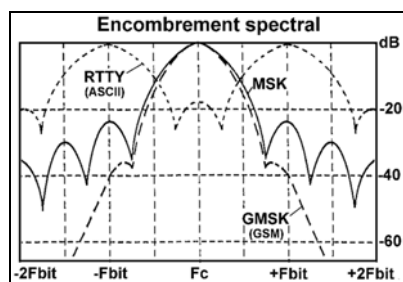


Figure 1 : Encombrement spectral pour trois types de 2FSK

Fbit est une valeur mathématique. Elle s'exprime en Hz et correspond au débit en bits/sec. Pour les modulations de la figure 1, Fbit est aussi égale au nombre de bauds.

Le RTTY à 45 bauds (Baudot) est aussi encombrant que le RTTY 110 bauds (ASCII), pour deux fois moins de bits/sec, mais il est facile à décoder et plus résistant au QRM (les lobes sont plus étroits).

Nous avons sur la figure 2 les signaux à la sortie d'un discriminateur FM (après passage dans le filtre de canal), pour du FSK, genre RTTY, du MSK et du GMSK du type GSM (B.T = 0,3)  
(2)

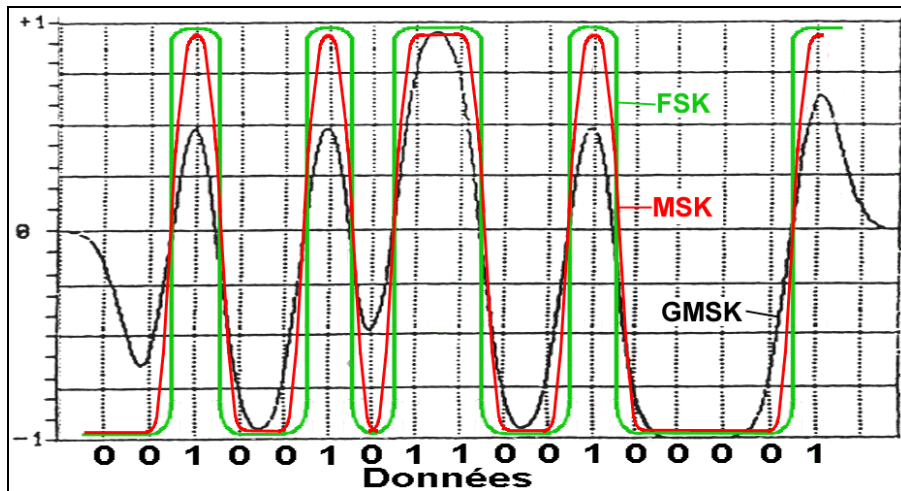


Figure 2 : Signaux démodulés pour trois types de 2FSK

Les instants d'échantillonnage théoriques sont représentés par les lignes pointillées verticales. En comparant avec la figure 1, nous voyons bien que plus la bande est étroite, et plus la démodulation sera délicate et demandera un rapport S/B plus élevé pour un même taux d'erreur.

### Diagramme de l'œil

Dilatons horizontalement la figure 2 pour ne garder que quelques symboles.

Utilisons le même signal que pour faire une densité spectrale.

Connectons un oscilloscope à mémoire à la sortie du discriminateur du récepteur, et superposons plusieurs balayages successifs.

Nous obtenons les "diagrammes de l'œil" de la figure 3 pour les trois modulations ci-dessus.

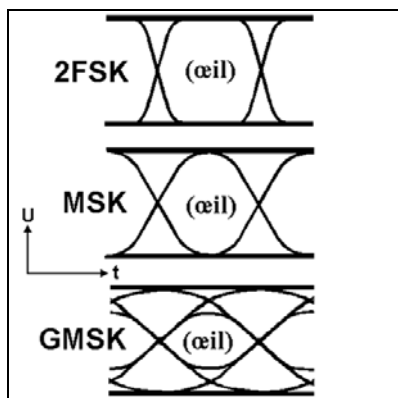


Figure 3 : Diagrammes de l'œil pour trois types de 2FSK

Plus l'œil est fermé, et plus le décodage est difficile car demandant plus de précision, à la fois en amplitude et en temps. Si le signal est bruité, l'œil se ferme encore et l'on voit bien que pour une même amplitude crête du signal de modulation, nous avons plus de marge en amplitude pour le MSK par rapport au GMSK (6 dB pour un BT de 0,3) et plus de marge en temps (instant d'échantillonnage) pour le 2FSK.

Pour les modulations  $n$ PSK et  $n$ QAM, à la place du diagramme de l'œil, le logiciel de décodage construit un diagramme sous forme d'une constellation de points correspondant aux états reçus comme celui de la figure 4 (niveaux d'amplitudes constantes = rayons de cercles de centre O).

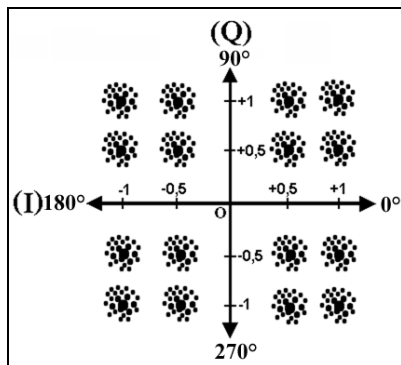


Figure 4 : Constellation reçue pour du 16QAM

Des points qui s'empâtent signifient une détérioration de la qualité (augmentation du nombre d'erreurs).

Cet article terminera la partie "modulations" de cette série sur les transmissions numériques. Nous n'en avons fait qu'un survol, en principe suffisant pour se faire une idée sur le sujet lors de la description d'un mode numérique radioamateur. Nous continuerons avec le canal de transmission, puis nous aborderons les protocoles. Beaucoup de mois en perspective...

**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) Dans chaque bande élémentaire. En pratique on l'obtient avec la moyenne de plusieurs décompositions en série de Fourier successives faites avec un analyseur de spectre.
- (2) Pour le GMSK, le BT qualifie un rapport entre l'occupation spectrale à -3 dB du signal et son débit en bits/s appelé  $F_{bit}$ . Alors  $T = 1/F_{bit}$  et  $B =$  largeur de bande à -3 dB du filtre gaussien. Pour un BT de 0,3, si  $F_{bit} = 1000$  Hz ( $T=0,001$ ), alors  $B = 300$ Hz à -3 dB ( $0,3/0,001 = 300$ ).