

# Comment ça marche ?

## Les modes numériques radioamateurs

### 1 – Généralités

Par le radio-club F6KRK

*Après avoir disserté dix-neuf mois sur les transmissions numériques en général, nous allons maintenant aborder les différents modes numériques radioamateurs. Mais avant il convient de clarifier un certain nombre d'idées reçues dans notre milieu.*

#### Le numérique, un progrès dans le domaine de la radio ?

On entend et on lit souvent que le numérique apporte un progrès technique dans les transmissions radio. Non, s'il y a progrès, c'est dans le domaine "**transmission de l'information**" qui n'est pas spécifique à la radio. Pour cette dernière, les progrès sont avant tout **technologiques** et ils permettent de mettre en œuvre des architectures radio impensables il y a quelques décennies.

Il n'y a pas de différence fondamentale entre une radio analogique et une radio numérique. Simplement, en réception, à un certain endroit de la chaîne analogique, on échantillonne le signal numériquement (CAN) pour ensuite utiliser des fonctions de traitement numérique du signal. Le système est réversible en émission où le convertisseur A/N est remplacé par un convertisseur N/A. S'il y a des progrès, ils résident surtout dans la **technologie** des convertisseurs A/N et dans un **traitement numérique de l'information** ayant pour but la transmission d'une information "**exploitable**" en utilisant un **minimum** de données.

#### Tel mode numérique est plus performant que tel autre ?

C'est sur cette question que les mondes professionnels et amateurs diffèrent le plus. C'est pourquoi nous allons développer le sujet.

A quoi une liaison électromagnétique peut-elle servir ? Hertz avait répondu "à rien", sous-entendu "sauf à réaliser une expérience de physique amusante, voire ludique". Heureusement, par la suite, Marconi et al. ont montré que cela pouvait servir à transmettre une **information** à distance, sans lien matériel. L'information transmise constitue donc un "**service**". Et les services demandés aux mondes professionnel et radioamateur sont devenus au fil du temps très différents.

Pour un professionnel, le service demandé consiste à transmettre une quantité d'informations **donnée** en un temps **donné** avec une fiabilité **donnée** (pourcentage de réussites), dans des conditions **données** (bande de fréquence, largeur du canal radio, milieu de propagation, perturbations par les autres utilisateurs, etc.).

Pour un radioamateur, cela se ramène la plupart du temps à "être reçu" à un autre endroit de la planète, sans pourcentage de réussite précis, pouvant descendre **bien en dessous** du millième contre, par exemple dans le passé, 95% pour un service radio-téléphonique des PTT <sup>(1)</sup>.

#### *Milieus de propagation*

En HF et au dessus, on considère quatre types de propagation :

- Propagation en espace libre, par exemple avec un satellite dans l'espace. Ce milieu est stable en général, sauf pour la partie "traversée" de l'atmosphère qui peut être très atténuative en hyperfréquences selon certaines conditions atmosphériques temporaires (traversée de nuages cumulo-nimbus, par ex.). Par ailleurs, le bruit de bande peut être considéré comme gaussien car composé principalement du bruit galactique (donc bien connu).
- Propagation terrestre en milieu campagnard. Dans ce cas nous avons des absorptions par la végétation et un bruit de bande composé principalement de bruit atmosphérique avec peu de bruit industriel.
- Propagation terrestre en milieu urbain. Dans ce cas, nous avons des absorptions et des interférences par multitrajets. Par ailleurs le bruit de bande est principalement composé de bruit industriel.
- Propagation par réflexion ionosphérique. Concernant le bruit de bande, nous avons les bruits ci-dessus selon la localisation du récepteur, plus du brouillage lié aux aléas de la propagation ionosphérique <sup>(2)</sup>. Par ailleurs la propagation n'est pas constante et on considère une durée "d'ouverture du circuit de propagation" en dehors de laquelle, la propagation chute rapidement. Dans ce cas, la fiabilité est obtenue en choisissant judicieusement la fréquence du canal en fonction de l'heure de vacation.

On voit donc que l'étude d'un système se fera en fonction du service que l'on veut obtenir et des conditions de propagation. Pour le radioamateur, son système résultera d'un compromis s'adaptant à une grande variété de conditions de propagation en espérant obtenir un "**service minimum**" (une seule liaison réussie suffit pour obtenir une carte QSL et *in fine* le DXCC).

### **Choix du mode numérique**

Le concepteur de la partie radio d'une transmission numérique a constamment en tête la formule générale suivante :

$$\text{Portée} = \frac{[K_1 \cdot P] \times [K_2 \cdot E_b]}{[K_3 \cdot B] \times [K_4 \cdot D]}$$

Avec :

$K_n$  = facteurs de mise à l'échelle

P = Pire (watts)

$E_b$  = Taux d'erreurs bits ( $10^{-N}$ )

B = Largeur de canal (Hz)

D = Débit en bits/sec

Ces facteurs ne sont pas indépendants les uns des autres et l'équation ci-dessus ne peut être résolue que par calcul matriciel. En considérant la variation d'un seul paramètre, on voit que la portée :

- Augmente avec la Pire ( $\Delta_{\text{portée}} = \text{racine de } (\Delta_{\text{pire}})$ )
- Diminue avec le taux d'erreurs bits ( $K_2$  variable selon la modulation)
- Diminue quand la largeur du canal augmente (bruit de bande augmente)
- Diminue quand le débit augmente

Pour résumer, si on veut augmenter la portée sans changer la puissance et le taux d'erreurs bits (données du cahier des charges), il faut diminuer le débit **et** la largeur du canal. Il n'y a pas de limite ! Prenons un exemple, en admettant que le bruit de bande soit nul <sup>(3)</sup> :

Soit S la puissance minimum du signal reçu (en dBm) pour un taux d'erreurs bits de  $10^{-2}$  (0,01).

Cas 1 : Canal BLU (B = 2500 Hz) et modulation 2FSK (genre RTTY). Nous avons :

Bande de bruit  $\approx$  800 Hz (largeur d'un filtre 1 ton)

Débit = 400 bits/s (400 bauds)

Pour la puissance du signal, on relèvera le rapport S/B nécessaire sur la figure 1, soit  $\approx 7$  dB.

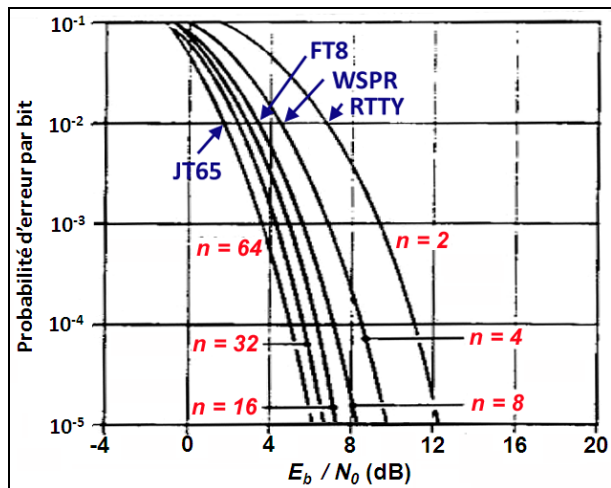


Figure 1 : Rapport S/B nécessaire pour un taux d'erreur bit selon  $n$  de " $n$ FSK"

Nous obtenons :

Bruit dans la bande =  $174 + 10 \cdot \text{Log}(800) = -145$  dBm

Signal minimum =  $-145 + 7 = -138$  dBm.

Cas 2 (WSPR) :

Sous-canal BLU ( $B = 6$  Hz)

Modulation 4FSK

Débit = 2,94 Bits/s (1,47 Bauds)

Bande de bruit = 1,47 Hz (modulation orthogonale)

Nous obtenons :

Rapport S/B = 4,5 dB (lu sur la fig.1)

Bruit dans la bande =  $-174 + 10 \cdot \text{Log}(1,47) = -172,3$  dBm

Signal minimum =  $-172,3 + 4,5 = -167,8$  dBm.

Nous avons un gain de  $167,8 - 138 = 29,8$  dB, soit 961 fois, avec une amélioration de la portée de racine de  $961 = 31$  fois. Et voilà comment on fabrique des DX !

Mais cela se fait au détriment du débit. Dans un cas, on a une **capacité brute** de l'ordre de 6800 caractères ASCII en deux minutes contre seulement 50 caractères dans l'autre cas. Alors, le WSPR, plus performant que le RTTY ? Il faut voir ce que l'on met derrière le mot "performance". Et essayez d'avoir un échange conversationnel en WSPR ! <sup>(4)</sup>

## Bruit de bande

Jusqu'ici nous avons utilisé le bruit de la figure 1 qui se réfère à un bruit gaussien. Mais en HF en particulier, le bruit est rarement gaussien. Il est souvent impulsionnel (parasites), d'autant plus que la bande est basse et que le bruit industriel ou urbain prend le pas sur les autres bruits. Déjà le bruit atmosphérique est parfois impulsionnel (orages tropicaux).

Alors le taux d'erreur de la fig. 1 augmente, mais différemment selon le type de modulation et d'autant plus que celle-ci est complexe. Dans une liaison HF, quand le taux d'erreur se dégrade à cause du bruit de bande, il peut être plus judicieux de changer de modulation plutôt que d'augmenter la redondance et la correction d'erreurs (modems HF adaptatifs) <sup>(5)</sup>.

## Rapport Signal sur bruit

Quel que soit le principe de la modulation, cela se terminera par une discrimination en amplitude et/ou en phase pour décider de la valeur du symbole. Cette opération se fera d'autant plus facilement que le rapport entre la puissance du signal utile et celui du bruit de fond sera élevé. C'est le rapport Signal sur Bruit. En réalité, physiquement, ce n'est pas ce rapport qui compte, mais le rapport  $(S+B) / B$ . En effet, le bruit et le signal sont indissociables dans le démodulateur. Voir sur la figure 2 la correspondance entre les rapports  $(S+B) / B$  et  $S/B$ .

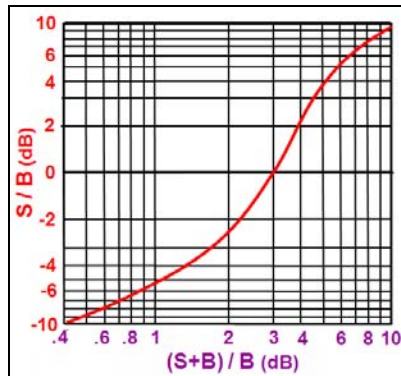


Figure 2 : Correspondance entre les rapports  $S/B$  et  $(S+B) / B$

On voit que ces rapports sont quasiment identiques au dessus de +10 dB.

### **Mesure du rapport $S/B$**

Important : Pour obtenir un rapport  $S/B$  "réel", il convient de faire les mesures du signal et du bruit dans la **même largeur de bande** (celle du démodulateur). A ce sujet, les radioamateurs ont l'habitude de mesurer le bruit dans la bande d'un récepteur BLU, soit 2500 Hz, et le signal dans la bande du démodulateur. C'est une convention, et cette méthode, n'est exploitable que si le reste de la bande n'est occupée que par du bruit. Sinon, la mesure est aléatoire et dépend du QRM (qui n'est en général pas un bruit gaussien).

La mesure du rapport  $S/B$  ne peut se faire qu'avec un signal CW (invariable dans le temps). La méthode consiste à filtrer et mesurer le signal CW dans une bande passante très étroite (donc long temps d'intégration), puis de mesurer le bruit dans la bande passante du démodulateur avec un filtre en crevasse sur le signal CW (là aussi, long temps d'intégration). Ensuite nous pouvons faire le rapport entre les deux <sup>(6)</sup>.

Avec un analyseur de spectre on visualise le signal et le bruit simultanément. On diminue la résolution (BW) jusqu'à avoir une vingtaine de dB de rapport  $S+B / B$  (cf. Fig.2). On note la valeur du signal  $S_{mes}$  (dBm), celle du bruit  $B_{mes}$  (dBm) et celle de la résolution BW (Hz).

Ensuite on contrôle, qu'en augmentant de 20 dB l'atténuation à l'entrée, le bruit de fond diminue bien de 20 dB (cf. fig.2). Sinon, on recommence avec un signal plus élevé (diminution de l'atténuateur d'entrée). Soit  $B_{démod}$  la bande passante de démodulation en Hz (filtre gaussien) nous obtenons :

$$\text{Rapport } S/B = (S_{mes} / B_{mes}) - (10 \text{ Log}(B_{démod} / BW)).$$

Si le filtre de démodulation est "carré", on soustrait 1,76 dB supplémentaires.

Si au lieu d'un signal CW, on voulait travailler avec un signal véritable, correspondant à une longue séquence aléatoire de bits, il faudrait faire intervenir la densité spectrale de puissance, ce qui serait plus compliqué. Noter que la mesure CW vaut pour toutes les modulations à amplitude constante (OOK, nFSK).

### **Brouillage et post-filtrage de canal**

Ce cas se rencontre surtout avec le matériel radioamateur quand le filtrage de canal s'effectue après la sortie du récepteur (dans la carte son d'un PC, par exemple).

Nous allons prendre le cas où le récepteur ne dispose que d'un filtre BLU de 2,5 kHz de bande passante avec l'ajout après sa sortie d'un filtre de canal numérique à bande étroite, par exemple 100 Hz. On peut alors "caser" 25 canaux numériques dans la bande du récepteur. Si l'on désire ne recevoir qu'un seul canal, cela peut poser un problème dans le cas de brouilleurs élevés dans les canaux adjacents. Si l'on n'a aucune difficulté pour les filtrer, on se trouve confronté à un problème de niveau pour le signal utile qui dépendra des brouilleurs situés dans la bande du filtre de canal du récepteur lorsque ceux-ci ont une amplitude plus élevée. En effet, dans ce cas, la CAG désensibilise le récepteur, non pas sur le signal utile, mais sur le brouilleur. Concrètement, si dans un canal adjacent un brouilleur apparaît 30 dB au dessus du signal utile, à la sortie du récepteur ce dernier diminue de 30 dB. Et s'il était "au ras des pâquerettes", il disparaît dans le bruit <sup>(7)</sup>.

Si l'on coupe la CAG en réglant manuellement le gain HF du récepteur, on est confronté au problème de la dynamique instantanée des circuits F-I. Alors qu'avec une CAG on peut se contenter de 30 à 40 dB, sans la CAG il nous faut au moins 60 dB et un bon "doigté" pour manier le potentiomètre de gain HF <sup>(8)</sup>.

Nous arrêtons là les généralités. Dans le prochain "Comment ça marche" nous discuterons sur un mode numérique bien connu des OM : la télégraphie.

**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) *Maintenant avec la radiotéléphonie mobile, nous avons plus de 99,9% de réussite. Mais le trajet "électromagnétique" de la transmission ne représente plus guère que 2 km en moyenne.*
- (2) *Pour lutter contre ce brouillage, on utilise des antennes directives.*
- (3) *Ce qui reste valable à une constante près si le bruit de bande est gaussien.*
- (4) *Un OM Suisse Alémanique répondrait "Sauf si vous êtes un Suisse Romand" (réputé pour sa lenteur d'élocution).*
- (5) *Des tests effectués en zone industrielle à 3 MHz aux heures critiques de la journée ont montré qu'il valait mieux utiliser une modulation simple, genre 2FSK avec une correction d'erreurs limitée (strict minimum) plutôt qu'une modulation nQAM à plus haut débit, avec une correction d'erreurs sophistiquée. C'est à partir de ce constat que les simulateurs de canal de propagation HF ont été améliorés en y incorporant des bruits impulsionnels.*
- (6) *Principe des mesureurs du SINAD à la sortie des amplificateurs audio. Dans ce cas le bruit "de bande" est composé du bruit thermique, de la distorsion du signal et des résidus du filtrage de l'alimentation.*
- (7) *Et on ne saura jamais (comment peut-on le deviner ?) que l'on a raté une liaison qui théoriquement était possible.*
- (8) *Ce problème est résolu dans les récepteurs numériques ayant une numérisation en HF ou en FI qui peuvent avoir une dynamique de 90 dB.*