

# Comment ça marche ?

## Les modes numériques radioamateurs

### 6 – Modes lents *n*FSK

Par le radio-club F6KRK

*Après avoir vu les modes numériques *n*PSK à bas débits nous allons passer aux modes lents du type *n*FSK qui ont été initiés par Joe Taylor, K1JT. Pour les détails sur certaines expressions techniques utilisées ici, se reporter à la série des "Comment ça marche ?" sur les transmissions numériques parue précédemment (renvois entre crochets).*

#### Historique

K1JT ne s'est pas fait connaître avec les modes lents, mais en créant un mode "rapide" adapté au trafic par météor scatter. Ces liaisons devant être brèves se faisaient difficilement en CW rapide à 400 Bauds générée et décodée par PC. Ces difficultés incitent alors K1JT à développer "WSJT", un mode numérique facilitant les QSO. Celui ci se révèle très efficace pour le décodage des signaux brefs observés au cours des pluies de météorites et K1JT le décrit dans le QST de décembre 2001. En émission WSJT utilise une modulation du type 4FSK avec une vitesse de 441 bauds d'où son nom "FSK441" <sup>[1]</sup>.

En juin 2002 K1JT présente un second mode numérique, le JT44 destiné aux signaux faibles VHF/UHF en mode troposphérique et en mode EME. La modulation est du type 44FSK. Les séquences entre émission et réception sont de 30 secondes et nécessitent une synchronisation précise des horloges des PC des deux correspondants.

Fin 2003 K1JT sort une nouvelle version de WSJT comprenant 4 modes numériques :

- "FSK441" pour le meteor-scatter.
- "JT6M" pour le meteor-scatter dans la bande 6m.
- "JT65A" pour les QSO en mode EME.
- "EME Echo", un programme permettant de détecter ses propres échos lunaires.

#### Modes JT65A, JT65B, JT65C

Les modes JT65A, B et C utilisent une modulation 1+64FSK <sup>[1]</sup>. Comme le JT44 il nécessite une mise à l'heure précise de l'horloge du PC. Chaque séquence émission ou réception dure 60 secondes.

En AFSK <sup>[1]</sup>, le premier ton à la fréquence 1270,5 Hz est destiné à la synchronisation. Les 64 autres tons servent à la transmission de l'information.

#### Caractéristiques générales

- Modulation : 1+ 64CPFSK (6 bits par Baud)
- Vitesse de modulation : 2,69 bauds
- Espacement entre tons : 2,69 Hz pour le JT65A, 5,38 Hz pour le JT65B et 10,76 Hz pour le JT675C <sup>(1)</sup>, le premier ton à 1270,5 Hz puis les suivants à partir de 1276 Hz.

- Occupation spectrale : environ 180 Hz pour le JT65A, 360 Hz pour le JT65B et 720 Hz pour le JT65C <sup>[1]</sup>.
- Synchronisation : Elle se fait à l'aide d'un préambule de 126 symboles, soit ici 126 bits de valeurs pseudo-aléatoires à la fréquence du ton de synchro à 1270,5 Hz, modulé OOK <sup>[2]</sup>. Cette séquence permet grâce à une auto-corrélation à la réception de déterminer le décalage de fréquence et de se synchroniser temporellement.
- Nombre de données transmises : 378 (soit 63 symboles pour du 64FSK)
- Code correcteur d'erreurs : Reed-Solomon R-S [12, 63] (mots de 6 bits), ou [72, 378] (bits), soit 378 bits transmis pour 72 bits de données. Avec l'ajout de 51 mots de correction (306 bits) nous obtenons une redondance supérieure à 5, au prix d'un faible rendement ( $12/63 = 19\%$ ) <sup>(2) [3]</sup>.
- Les 63 symboles obtenus sont ensuite entrelacés à l'aide d'une matrice  $7 \times 9$  (écriture Horizontalement et lecture Verticalement) <sup>[4]</sup>.
- Pour finir, on effectue un codage de Gray (cf. note 9) sur les données obtenues avant de les envoyer au codeur 64FSK sous forme de 63 symboles de 6 bits (après une synchro de même durée).
- Durée de transmission totale : 46,8 secondes
- Rapport S/B minimum pour la réception : de -23 à -25 dB (JT65B) sur l'échelle WSJT (B=2500 Hz) <sup>[5]</sup>.

### Formatage des données

Le message est entièrement encodé avant d'être transmis en un seul bloc.

Les données transmises comportent les 4 champs suivants :

- un champ de 28 bits pour l'indicatif de l'appelant.
- un champ de 28 bits pour l'indicatif de l'appelé.
- un champ de 15 bits pour infos diverses (QRA-Locator, Report, Accusé-Réception).
- un champ de 1 bit indiquant le type de message, formaté ou libre (texte).

Cela nous fait en tout 72 bits de données utiles.

Pour transmettre autant d'informations avec si peu de données, KIJT a eu recours à un codage particulier initié par Clark et Karn en 1996. Nous allons nous aider de la figure 1 pour comprendre son principe en prenant un exemple simple.

Soit un indicatif de la forme "L-C-L" avec :

- L = Lettre parmi [A, B, C]
- C = Chiffre parmi [0, 1]

Tables de vérité des caractères :

(L)	A	B	C
m	0	1	2
p	0	1	2

L	C	L
m	n	p
(C)	0	1
n	0	1

Soit **N** = mot codé, nous avons :

Emission :  $N = (6 \times m) + (3 \times n) + p$

Exemple : indicatif = "B1C", alors  $m = 1, n = 1, p = 2$   
 et  $N = (2 \times 3)m + 3n + p = (1 \times 6) + (1 \times 3) + 2 = 11$  (0Bh)

Réception :  $m = (N \div 6) (R = \text{reste})$   $n = (R \div 3) + p = \text{reste}$

0	1	2	3	4	5	6	7	8
A0A	A0B	A0C	A1A	A1B	A1C	B0A	B0B	B0C
9	10	11	12	13	14	15	16	17
B1A	B1B	B1C	C0A	C0B	C0C	C1A	C1B	C1C

Figure 1 : JT65, principe de l'encodage des indicatifs

Nous voyons qu'avec 3 caractères ASCII, il nous faudrait 21 bits pour les transmettre, alors qu'ici il suffit d'à peine plus de 4 bits ( $18 = 2^4 + 2$ ). De même pour les grands carrés locator, 15 bits suffisent pour couvrir le monde entier ( $180 \times 180 = 32400 < 32768$  pour  $2^{15}$ ). On notera que 28 bits sont largement suffisants pour décrire la majorité des type d'indicatifs existants ( $2^{28} > 6$  millions de valeurs). Alors une partie est affectée à des messages particuliers comme nous allons le voir dans le protocole.

### **Protocole**

Une séquence E/R démarre à chaque minute paire ou impaire au choix de l'appelant. En émission la transmission commence après un retard d'une seconde et dure 46,8 s. En réception le PC consacre les 13 secondes restantes au décodage de la trame enregistrée avec une horloge à 11025 Hz, soit >529000 échantillons ( $\approx 66$  Ko).

Un QSO comprend l'échange des indicatifs et du QRA locator (grand carré seulement), les reports (rapport S/B en dB calculé par le logiciel) et les accusé-réceptions. Les messages sont pré-formatés dans le PC sauf un qui est libre (signalé par le bit 72) avec une limite de 13 caractères parmi 43 pour ne pas dépasser 71 bits. On peut ainsi émettre ou recevoir n'importe quel message.

Pour finir, voici un échantillon des principaux messages formatés :

- "CQ" ou "QRZ" + indicatif appelant + Locator (grand carré) + bit 72 sur "formaté".
- Indicatif appelé + indicatif appelant + Locator appelé + bit 72 sur "formaté".
- Indicatif appelé + indicatif appelant + Accusé-Réception + Report appelant en dB WSJT (entre -01 et -30) + bit 72 sur "formaté".
- Indicatif appelé + indicatif appelant + Accusé-Réception + bit 72 sur "formaté".
- Indicatif appelé + indicatif appelant + Salutations (73) + bit 72 sur "formaté".
- Indicatif appelant + indicatif appelé + Salutations (73) (signifie ici la fin du QSO) + bit 72 sur "formaté".

Noter que le CQ peut être suivi de 3 digits pour donner la partie en kHz de la fréquence d'écoute de l'appelant ayant les mêmes MHz que sa fréquence d'appel.

Par ailleurs, si les indicatifs sont plus longs que ceux formatés, par exemple avec un préfixe ou un suffixe particulier, une information additionnelle peut être mise à la place du QRA-Locator. Toutes les combinaisons ne sont pas permises.

### **Exemple de QSO**

- "CQ F5NB JN18" (*Je lance appel avec mon indicatif et mon grand carré locator*).
- "F5NB F6KRK JN18" (*F6KRK me répond avec son locator*).
- "F6KRK F5NB -09" (*Je réponds à F6KRK en lui donnant son report en dB*).
- "F5NB F6KRK R-11" (*F6KRK accuse réception avec le "R" plus mon report en dB*).
- "F6KRK F5NB RRR ou 73" (*J'accuse réception par RRR ou j'envoie mes salutations*).
- "F5NB F6KRK 73" (*F6KRK termine le QSO en m'adressant ses 73*).

### **Mode WSPR**

Ce n'est pas un mode QSO mais plutôt un mode balise qui permet sous certaines conditions de faire différents types de tests de propagation et de comparaisons d'antennes ou de matériel (hard et soft).

Les données reçues peuvent être mises sur le site "WSPRnet". Cela permet de voir sur une carte les liaisons dans leur globalité ou certaines liaisons à la demande.

### **Caractéristiques générales**

- Modulation : 4CPFSK (2 bits par Baud)

- Vitesse de modulation : 1,4648 Bauds (12000 / 8192)
- Occupation spectrale : environ 6 Hz
- Synchronisation bit : récupération de l'horloge sur la totalité du message
- Nombre de données transmises : 162
- Durée de transmission : 110,6 s
- Rapport S/B minimum pour la réception : environ -31 dB sur l'échelle WSJT (B=2500 Hz) soit +4 dB dans une bande de 1,6 Hz (valeur typique pour du 4FSK avec  $T_{eb} 10^{-2}$ ).

### ***Formatage des données***

Transmission de 50 bits de données après compression sans perte.

Composition du message :

- 28 bits pour l'indicatif
- 15 bits pour le QRA-Locator
- 7 bits pour le niveau de puissance émission en dBm <sup>(3)</sup>,

Soit un total de 50 bits utiles <sup>(4)</sup>.

Ces données sont codées à l'aide d'un code convolusionnel ayant une longueur de contrainte  $K = 32$  et un taux  $r = \frac{1}{2}$  (2 bits transmis par bit de donnée) <sup>[5]</sup>. La contrainte rend les erreurs de décodage moins probables, ce qui permet à la réception de remplacer l'algorithme de Viterbi <sup>[5]</sup> par un algorithme séquentiel simple. Ceci nous donne un nombre total de 162 bits ( $[50 + K - 1] \times 2$ ) pour une durée de 110,6 secondes.

### ***Protocole***

Les transmissions s'effectuent toutes les deux minutes. Elles commencent une seconde après chaque minute UTC paire.

La bande WSPR, large de 200 Hz est divisée en 32 canaux de 6 Hz. Le récepteur décode tous les canaux. L'émission se fait en FDMA sur un canal (libre) parmi 32 <sup>[6]</sup>. Par ailleurs, l'occupation de son slot en émission est aléatoire avec un rapport moyen E/R allant de zéro (réception seule) à 100%. La valeur préconisée est de 20% (une émission toutes les 10 minutes en moyenne).

### ***Mode FT8***

Le FT8 proposé par K1JT également dérive des modes JT65 et WSPR avec un meilleur codage des données pour réduire le temps de transmission tout en conservant une bande passante réduite. Il constitue un bon compromis permettant de réaliser des échanges d'indicatifs, voire des QSO (?), avec des signaux très faibles.

### ***Caractéristiques générales***

- Modulation : 8CPFSK (3 bits par Baud) <sup>(5) [1]</sup>.
- Espacement des tons : 6,25 Hz
- Vitesse de modulation : 6,25 Bauds (12000 / 1920)
- Largeur du spectre émission : 50 Hz
- Total des données transmises : 237 bits
- Synchronisation : Matrice de Costas d'ordre 7, au début, au milieu et à la fin des données transmises <sup>(6)</sup>
- Durée de transmission :  $(237/3) \times (1/6,25) = 12,64$  s
- Séquences Tx/Rx : slots de 15 secondes
- Auto séquençement après commencement d'un QSO

- Rapport S/B minimum pour la réception : environ -22 dB avec décodage AP sur l'échelle WSJT (B=2500 Hz) soit 4 dB dans une bande de 6,25 Hz (valeur typique pour du 8FSK avec  $T_{eb} 10^{-3}$ ).
- En réception, décodage multi-canaux de toutes les émissions dans la bande FI du récepteur (affichées dans un "waterfall").

### ***Caractéristiques Emission / Réception HF***

- Transceiver analogique ou SDR
- Dérive < 1Hz par minute
- Pas besoin d'une grande linéarité (modulation FM)
- Bruit de phase < -50 dBc/Hz à 100 Hz de la porteuse
- En réception, utiliser une large bande FI, avec la problématique que l'on a déjà vue pour la réception de signaux multiples à bandes étroites (étouffement, brouillage)
- Puissance d'émission CW de l'émetteur <sup>(7)</sup>.

### ***Formatage des données***

Le message est entièrement encodé avant d'être transmis en un seul bloc. On utilise un algorithme de compression qui réduit au maximum la quantité des données qui seront transmises après ajout d'un code correcteur d'erreurs.

A la réception, on effectue le processus inverse de décodage. Après lecture du message et saisie de la réponse, celle-ci est encodée pour être retournée à l'expéditeur. L'opération se fait dans une fenêtre de temps de 2,4 secondes.

La longueur du message utile est de 77 bits + 14 bits de CRC

Les 77 bits se décomposent ainsi pour un message standard :

- 2x28 bits utilisés pour les indicatifs
- 15 bits pour le QRA-Locator, le report et l'acquittement (ou "73")

Cela nous fait 71 bits auxquels on ajoute 6 bits définissant le type de message, soit un total de 77 bits. Puis on calcule et on ajoute un CRC sur 14 bits, et on obtient 91 bits.

On ajoute ensuite 83 bits résultant du calcul d'un code correcteur d'erreur du type LDPC[174,87], ce qui nous fait un total de 174 bits.

Les 174 bits sont séparés en 58 groupes de 3 bits (3 bits par Baud), puis subissent un encodage de Gray <sup>(8)</sup>. Le résultat est assemblé en une seule trame de la manière suivante :

- 7 groupes pour la matrice de Costas
- les 29 premiers groupes de données
- 7 groupes pour la matrice de Costas
- les 29 groupes suivants de données
- 7 groupes pour la matrice de Costas

Cela nous fait au total 79 groupes de 3 bits qui seront envoyés au rythme de 6,25 Bauds. Nous obtenons ainsi une durée de transmission de  $79 \times (1/6,25) = 12,64$  secondes.

### ***En guise de conclusion***

Nous n'avons examiné que les principaux modes numériques lents utilisés par les radioamateurs. Il existe de multiples variantes qui, même si elles sont plus performantes sur certains points, ne peuvent pas être considérées comme des standards si elles ne sont pas employées par l'ensemble de la communauté R-A.

Par ailleurs on peut se demander si la possibilité, grâce au codage, à la diminution du débit et de la largeur de canal, d'obtenir des distances plus longues avec moins de puissance, est un progrès "radioamateur" si les échanges se font automatiquement de machine à machine. Si cela se conçoit pour des liaisons particulières comme l'EME, où le challenge est surtout

technique, c'est plus contestable pour des liaisons HF où la technique a quasiment disparu. Et s'il ne reste même plus la convivialité des QSO, alors où va-t-on ?

**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".**

## Bibliographie

- [1] [2] cf. "Comment ça marche ?" de juillet 2018  
[3] [4] [5] cf. "Comment ça marche ?" de septembre 2019  
[6] cf. "Comment ça marche ?" de juin 2019

## Notes

- 1) *Plus l'espace entre les tons est grand et meilleure est la réjection du brouillage intra-bande en réception. Par ailleurs, les contraintes sur le bruit de phase des OLS sont relâchées, tant à l'émission qu'à la réception.*
- 2) *Un message peut être décodé avec 80% de perte d'information (QRM).*
- 3) *Il n'est pas précisé si c'est la puissance "output" de l'émetteur, la PIRE ou la PAR. Cela peut faire de grandes différences lors des comparaisons.*
- 4) *Les messages avec un indicatif composé et /ou un QRA Locator à 6 chiffres utilisent deux transmissions successives. La première comprend l'indicateur composé et le niveau de puissance, ou l'indicateur standard, le QRA Locator à 4 chiffres et le niveau de puissance. La deuxième transmission comprend l'indicateur d'appel réduit, le QRA Locator à 6 chiffres et le niveau de puissance. Les préfixes complémentaires peuvent contenir jusqu'à trois caractères alphanumériques. Les suffixes supplémentaires peuvent être soit une seule lettre, soit un ou deux chiffres.*
- 5) *Variante : G4WJS a changé le 8CPFSK par du 8GFSK en ajoutant un filtrage gaussien sur les données en bande de base. Ceci permet de diminuer le brouillage dans les canaux adjacents (amélioration de l'ACLR) mais au détriment de la sensibilité (tout se paie).*
- 6) *La matrice de Costas d'ordre  $n$  est un tableau de  $n \times n$  bits qui ne comprend qu'un seul bit à "1" par ligne et par colonne. Une matrice de  $7 \times 7$  ne nécessite que sept mots de trois bits pour la décrire, soit 21 bits. On l'utilise pour faire une synchronisation trame. Il y a très peu de chance qu'elle se retrouve dans les paquets de données.*
- 7) *Ne forcer sur la puissance qu'en cas de nécessité, pour ne pas occasionner du brouillage (QRM) dans les canaux adjacents.*
- 8) *Le code Gray est une autre manière de coder les nombres binaires, de sorte qu'un incrément ne se traduise que par un seul changement de bit. On obtient un nombre binaire codé Gray en réalisant un OU-EXclusif entre le nombre et lui-même divisé par deux. Exemple pour "5" :  $0101h \wedge 0010h = 0111h$  (7) et pour "6" :  $0110h \wedge 0011h = 0101h$  (5) (deux bits ont changé en binaire simple et un seul en code Gray). Cela permet de corriger certaines erreurs.*