

Quelle fréquence avez-vous dit ?

Données techniques et numériques sur les radiofréquences

par Alain NOËL

IEN Sciences - Rectorat de Rouen - 76100 Rouen

Un parcours rapide et succinct du spectre radioélectrique et des procédés de modulation.

Pour transmettre des données, quelles soient numériques (données informatiques, images ou textes), analogiques (audiofréquences), les radiofréquences sont largement utilisées.

Rappelons que les ondes électromagnétiques peuvent être considérées comme allant de 10 Hz à 10^{11} Hz ou, pour utiliser une autre formulation, celle de la longueur d'onde, de 30 000 km à 1 mm. La fréquence la plus basse correspond à la transmission d'un courant alternatif, la plus élevée à celle utilisée par les radars de détection.

Pour les communications hertziennes, elles balayent déjà une plage très large de 10 kHz à 100 GHz. Cette plage, très étendue, est occupée sur toute sa longueur par des émetteurs de radiodiffusion destinés aux trafics maritime ou aéronautique.

Différents procédés de modulation sont utilisés pour transmettre les informations quelles soient sons, images ou données.

1. PROCÉDÉS DE MODULATION

Le plus simple et le premier historiquement, c'est l'interruption de transmission, le tout ou rien. C'est la **télégraphie**. Le code Morse datant du XIX^e siècle est toujours utilisé.

Ensuite, le plus fréquent en OL et PO, la **modulation d'amplitude**, bien connue de tous. Un signal basse fréquence (BF) module l'amplitude du signal haute fréquence (HF). Si la BF est de fréquence F_0 le signal occupe une largeur de bande de deux fois F_0 . D'où l'idée de supprimer l'une des bandes latérales et surtout la porteuse : voilà la BLU, ou **bande latérale unique**, créée. Avantage supplémentaire, la

porteuse n'est plus émise d'où un gain énorme de puissance (voir Fourier...).

On aura tout de suite compris que le moyen économique de transmission est la BLU : en l'absence de modulation il n'y a pas transmission de signal, et un signal de cette nature occupe deux fois moins d'espace dans le spectre radioélectrique qu'un signal AM.



Figure 1 : Spectre d'émissions.

Autre procédé, la **modulation de fréquence** et sa cousine, celle de **phase**. C'est à présent la fréquence du signal qui est modulée par le signal à transmettre. On évite ainsi les parasites ou perturbations car on peut écrêter le signal et éliminer tous les signaux perturbateurs. Il faut seulement régler l'excursion en fréquence ou le taux de modulation. D'où la **modulation de fréquence en bande étroite** (NBFM) utilisée pour les radiotéléphones.

Dans une même bande de réception, définie par la sélectivité du récepteur, on peut transmettre plusieurs informations. La plus entendue est **la stéréo** de notre bande dite FM : on trouve en effet un signal gauche (G) plus droite (D), (qui représente une voie dite mono de 30 à 15 000 Hz), puis un signal pilote de 19 kHz, un signal G-D, accompagnant une sous porteuse à 38 kHz. Autrement dit, il faut une excursion de + ou - 55 kHz pour que ce signal, une fois traité puisse nous restituer la voie de gauche et de droite. On comprend pourquoi la stéréo a droit de cité de 88 à 108 MHz (bande de 20 MHz et non entre les 500 kHz et 1700 kHz de la bande OM).

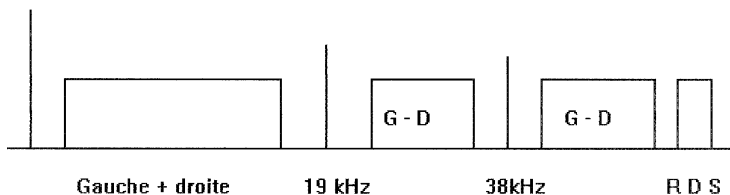


Figure 2 : Émission Stéréo et Radio data system.

Tous les signaux reposeront sur ces types de modulation. Parfois la disparition de la porteuse sera provoquée par un glissement de la fréquence. Si cela est fait de façon progressive, il y aura un effet de variation de fréquence détectée par le récepteur qui pourra être traduit par une fréquence audible variant entre deux valeurs.

2. TRANSMISSIONS NUMÉRIQUES

L'apparition du numérique n'est pas récente. Le **RTTY ou radiotélétype** utilise déjà des transmissions de données sous une forme binaire. Une succession de «mark» et de «space» bien synchronisée est émise et décodée par le récepteur programmé dans le même protocole. Le signal RTTY se caractérise par l'émission (AM, FM ou BLU) de signaux sur deux fréquences différentes : une lettre ou un symbole sont déterminés par la succession de ces fréquences, validée par un «bit» de fin de transmission. Il s'agit d'une transmission de type série. Le code ASCII de notre informatique a succédé à ce code Baudot.

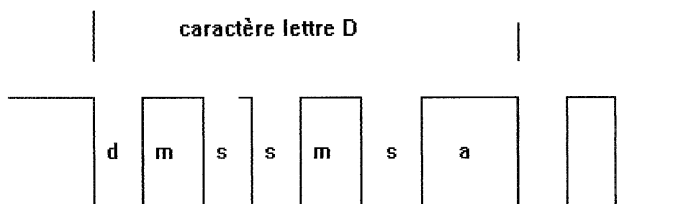


Figure 3 : Caractère lettre D.

Ici, est transmise la lettre D, 10010. niveau haut 1 445 Hz (m)

niveau bas 1 275 Hz (s)

shift (écart) 170 Hz

Signaux nécessaires au décodage du code Baudot, utilisé en RTTY.

- d «top» de départ pour le décodage,
- m signal mark,
- s signal space,
- a signal d'arrêt.

En général, d, m et s durent 20 ms à 30 ms pour une vitesse de 50 bauds.

L'apparition de l'informatique et de ses précisions d'horloge a conduit à des systèmes très performants. Les données sont sous une forme ASCII. Le Minitel est le frère de ces systèmes évolués de transmissions de données. Ce sont toujours deux ou plusieurs fréquences qui déterminent des valeurs numériques ou alphabétiques de par leurs successions.

Le procédé AMTOR, le système alphapage modulés en BLU, AM ou FM, et le système DTMF (dual tone multifrequency) utilisé également par les standards à fréquences vocales de notre téléphone sont une autre illustration de ces transmissions numériques.

Mais la grande «nouveau» est la **transmission numérique** des audio fréquences. Elle est mise en œuvre par le procédé NICAM (pour TF1) ou sur GSM. Pour entendre il faudra traiter le signal numérique. Autant dire qu'avec un récepteur standard on est dans la même situation qu'avec un mange-disque devant un disque compact laser. L'écoute d'une transmission numérique sur un récepteur ordinaire se traduit souvent par un souffle ou un sifflement : tout dépend du procédé de modulation.

On voit l'intérêt d'un tel système pour le téléphone. Le «fameux» Bi-Bop utilise également ce procédé numérique.

Les satellites utilisent ces modes pour transmettre les émissions de radio vers les réémetteurs locaux. Dans peu de temps, il équipera un plus grand nombre d'émetteurs terrestres.

Le **système RDS** (Radio data system) est déjà là. En plus du signal de BF stéréo, à 57 kHz (trois fois dix-neuf) on transmet à 1187,5 bits/s des informations décodables et affichables. Ces informations sont de nature multiple :

- Pilotage du récepteur lui-même. L'auditeur programme son récepteur, non pas sur une fréquence mais sur le nom de la station, par exemple France Inter. Par identification du signal RDS, le récepteur se cale sur la bonne fréquence de l'émetteur le plus proche ;

- Informations spécifiques. Sur une autoroute, en ville, des informations pourront être diffusées en surimpression de l'émission écoutée. L'auditeur peut choisir de ne pas les lire si elles ne sont pas prioritaires (accident,...). Ces informations pourraient même être affichées sur écran vidéo.

3. LA TÉLÉVISION

Actuellement en **télévision**, il existe par exemple quatre normes essentielles de transmission d'image couleur. Les procédés SECAM

(français), PAL, D2 Mac Paquets (européens) et NTSC (américain) sont incompatibles pour la réception des images en couleurs.

Ces procédés reposent tous sur le même principe de base. Il y a quatre informations transmises, la première étant le son, pouvant être transmis par modulation d'amplitude (norme française) ou modulation de fréquence (PAL en général) ou numérique (Nicom par exemple).

L'image est transmise par trois composantes (L, C₁ et C₂). La luminance (L) composition des trois signaux correspondant aux couleurs fondamentales : rouge, vert et bleu. Ce signal est compatible avec le «noir et blanc». Le deuxième (C₁) est une combinaison de rouge et de vert, le troisième (C₂) de bleu et de vert.

$$L = 0.299.R + 0.587.V + 0.114.B$$

$$C1 = -1.9 (R - V)$$

$$C2 = 1.5. (B - V)$$

La luminance est transmise sur la fréquence fondamentale de l'émission. Les signaux de chrominance sont émis, soit sur une sous porteuse unique mais déphasée (PAL), soit sur deux sous porteuses (SECAM). A la réception, il suffit de recomposer ces trois signaux pour obtenir soit une image noir et blanc (L suffit) soit une image couleur par combinaison additive des signaux de chrominance et de luminance. Ces signaux sont complétés par des signaux de synchronisation ligne et image.

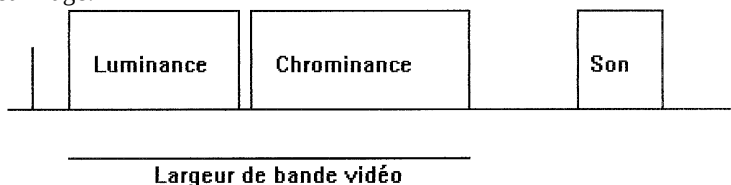


Figure 4 : Spectre d'une émission TV couleur.

Secam, NTSC et PAL sont des procédés dits de multiplexage fréquentiel, alors que le procédé MAC Paquet est un multiplexage séquentiel. Au lieu d'émettre en même temps sur des fréquences différentes, le procédé MAC émet en série, par paquets, les informations qui doivent être emmagasinées et restituées image par image.

En procédé classique, les signaux image et son sont séparés par une bande relativement étroite et leur décalage est donné par la différence entre les valeurs centrales.

Suivant les normes, ce décalage est de 5,5 ; 6,5 ; 4,5 etc. MHz mais cet écart peut être positif ou négatif. Les choses se compliquent car pour chaque procédé, il existe encore d'autres possibilités : nombres de lignes, largeur de bande (canal, vidéo), polarisation du signal image et type de modulation.

Il y a douze systèmes de modulation différents sans parler des trois procédés de modulation couleur énoncés précédemment. Par exemple, en France le procédé est SECAM L (son AM et image positive), en Hongrie il est SECAM mais K (c'est-à-dire son FM et image négative) ; donc incompatibilité pour la couleur et le son. On imagine la complexité d'un véritable téléviseur multistandard.

Ces différents procédés de modulations et d'analyses d'images ou de données voisinent sur les ondes.

4. SPECTRE DES FRÉQUENCES RADIOÉLECTRIQUES

Le spectre des fréquences radioélectriques peut être partagé en plusieurs catégories : les ondes longues, les ondes courtes ou hautes fréquences, les très hautes fréquences, les super hautes fréquences, etc.

4.1. Les ondes longues

De 10 kHz à 700 kHz, gamme des **ondes longues et moyennes** (certains diront grandes ondes GO et petites ondes PO) se trouvent des stations commerciales ou publiques : Europe 1 ou France Inter sur 163 kHz, ce dernier ayant la particularité d'émettre simultanément des signaux horaires. On trouve également des émetteurs de radiolocalisations, vers 50 kHz, destinés au guidage de mobiles comme les avions ou les bateaux.

Par exemple :

16 kHz	GBR Standard de temps à 3 h, 9 h, 15 h et 21 h,
163 kHz	France Inter en AM,
864 kHz	Radio Bleue,
131,8 kHz	Paris Facsimilé météo.

4.2. Les ondes courtes (HF)

De 700 kHz à 50 MHz, domaines des **ondes courtes (OC)**, hectométriques ou décamétriques, les stations de radiodiffusion sont

nombreuses : stations civiles, militaires, gouvernementales, parfois de propagande, souvent destinées à être écoutées par des pays lointains. C'est sur ces fréquences que se situent RFI (Radio France International), Radio Moscou, Radio Vatican, Radio Pékin, mais aussi les stations de diffusion des téléx (ou radiotélétype), de fax, des grandes **agences de presse** comme AFP ou Reuter.

Sur 10 MHz, sur plusieurs continents, des émetteurs envoient des **signaux horaires** de très grande précision accompagnés d'informations sur la propagation des ondes.

Vers 26 MHz et 41 MHz se trouvent les fréquences des téléphones sans fil de vos voisins ou de la télécommande du modéliste.

C'est aussi dans cette plage que se situent les huit bandes décadiques HF affectées au trafic **des radioamateurs** du monde entier (de 3.5 à 29,8 MHz) et celle des **cibistes** (27 MHz).

- *Exemples d'émetteurs «ondes courtes»*

7,105 MHz	BBC	en AM,
7,200 MHz	Radio Moscou,	
7,100 MHz	La croix rouge (Genève),	
11,910 MHz	Radio Alger,	
11,755 MHz	Radio Finlande,	
11,910 MHz	Radio Budapest,	
11,946 MHz	Radio Canada,	
13,715 MHz	Radio Cuba,	
15,030 MHz	Radio for Peace au Costa Rica	en BLU.

- *Stations de fac-similé météo*

3 855 kHz	Hambourg D	en Fax
4 610 kHz	Bracknell GB	

- *Stations maritimes*

518 kHz	Avertissements météo	en AM,
3,722 MHz	Brest	en BLU,
8,806 MHz	Saint Lys Radio (Toulouse)	en BLU (liaisons entre navires et la terre),
22,009,3 MHz	idem	en BLU,

Les **satellites météorologiques** émettent sur 137 MHz ces images que nous présentent tous les soirs nos téléviseurs.

Évoquons encore les radioamateurs sur 145 MHz ou 430 MHz, cette dernière bande permettant la télévision d'amateur.

Exemples d'émissions VHF

- La «modulation de fréquence» avec par exemple : France musique 88,7 à Lille ; 92 à Rouen ; 92,1 à Paris ; 94,2 et 94,7 à Marseille ; 98,9 MHz à Nantes ; etc.

- *Trafic maritime local*

161,650 MHz dans de nombreux ports en NBFM.

- *Fréquences aviation*

125,7 MHz Paris en FM,

125,3 MHz Bordeaux,

123,5 MHz Nombreux aéro-clubs,

121,5 MHz Opérations de recherche,

243 MHz idem et opérations de sauvetage de satellites habités.

4.4. Les SHF

Là aussi débutent **les fréquences radar** qui vont aller de 300 MHz jusqu'à 40 GHz. c'est-à-dire sur la bande dite des SHF ou ondes centimétriques. Après, on aborde les ondes millimétriques et donc les ondes optiques, qui comme chacun le sait, peuvent également transporter des informations.

Les **satellites géostationnaires**, donc à 36 000 km de la terre, exploitent les SHF entre 10,950 et 12,740 GHz. Savez vous qu'en fait, ces objets «fixes» se déplacent dans des cubes de 70 km de côté : calculez la valeur de l'angle que représente ce déplacement. Les satellites météorologiques émettent également sur 1,7 GHz.

L'émetteur SHF que beaucoup d'entre nous possèdent est le **four à micro-ondes**. Sa puissance est loin d'être négligeable, elle peut atteindre quelques kilowatts sur une fréquence de 2,46 GHz. Le magnétron utilisé est présent sur les fours industriels et pour la diathermie.

Toujours dans ces bandes, les radioamateurs qui explorent ces fréquences dites «de plombier» car domaines des guides d'onde et des cornets. On les trouve sur 1 220 MHz, 10 GHz ou 24 GHz.

Exemples des satellites géostationnaires (Fréquences données entre autres) :

- 11,727 GHz TDF1 D2 Mac,
- 11,420 GHz Astra PAL.

Le **câble**, est un vecteur de transmission des informations qui précise et vise son récepteur, cela permet de facturer avec certitude le client mais aussi facilite la convivialité. On émet en général en Hyperbande, c'est-à-dire sur des fréquences de l'ordre de 400 MHz, différentes des voies hertziennes. Le câble coaxial est le plus répandu, la fibre optique étant coûteuse et délicate à mettre en place. Mais, c'est cette dernière qui permet essentiellement de transporter d'autres informations et la plus grande convivialité. Elle permet, par exemple, de relier entre eux des récepteurs, d'échanger des données avec le centre serveur et de faire une télévision à la carte.

Tout cela ne va pas sans problème. Ainsi, les transmissions par câble, par son **réseau hyperbande** peuvent interférer avec des émissions de radioamateurs, présents pourtant depuis bien plus longtemps sur ces 440 MHz.

Rappel

Fréquences radioamateurs (les plus importantes) : 3 à 3,5 MHz ; 14 à 14,350 MHz ; 144 à 146 MHz ; 430 à 440 MHz ; 1, 5 GHz.

5. LES CONDITIONS DE RÉCEPTION

La possession d'un *récepteur* n'est pas tout. Il faut *l'antenne et la patience*. De plus les conditions de propagation ne sont pas constantes. Les couches ionisées de l'atmosphère et l'action du rayonnement solaire modifient de façon considérable les conditions de réception. Les fréquences basses (0,5 à 5 MHz) sont plutôt des ondes de sol. Il faut attendre la nuit pour entendre des stations éloignées.

De 5 à 30 MHz, il ne faut pas espérer entendre des stations en deçà de 500 km. L'onde de sol est vite réduite et il faut espérer une réflexion ionosphérique pour déceler un signal. L'heure de la journée déterminera la direction favorable. De 30 à 100 MHz, on est dans une bande de

fréquences aux propriétés bien intermédiaires. Pour les VHF et au delà, les lois de l'optique s'appliquent quasiment intégralement. Réflexion réfraction, phénomène de guide d'onde font que le plus souvent l'onde directe est seulement possible. Cela explique leur utilisation pour les relation de proximité (radiotéléphone) mais aussi dans l'espace.

Mais, il y a souvent des cas particuliers : phénomènes dus à l'inversion des températures, très fréquents, aurore boréale, météorites du 15 août. Tout téléspectateur a connu ces images déformées par les perturbations provoquées par signal venant d'un émetteur lointain et habituellement invisible, ou a entendu brièvement sur son récepteur de radio FM une langue inconnue.

En dehors de ces phénomènes de brouillage que nous pouvons appeler naturels, il y a bien d'autres cas de perturbation. Les plus courants sont dus à la présence d'émissions aux fréquences très proches. En se rapprochant d'un émetteur, la saturation qu'il provoque dans nos récepteurs rend toute écoute d'un autre impossible. Le non respect des normes imposées par une réglementation (puissance ou fréquence non respectée) est assez fréquent. Il y a également la pureté plus que douteuse du signal émis. Il s'agit le plus souvent de modulation excessive soit en amplitude soit en fréquence produisant donc une nouvelle émission sur une fréquence indésirable. Certains systèmes transmettent des signaux carrés dont on connaît la richesse en harmoniques.

Une autre cause est également la présence d'émetteur au possibilité inconnue et ne possédant pas d'antenne visible : le four à micro-ondes émet 1 kW sur 2,4 GHz. Les prescriptions de sécurité sont impératives pour la santé humaine, mais vu la sensibilité de certains récepteurs, il n'est pas impossible «d'entendre» notre voisin réchauffer ses plats.

En conclusion : on le voit, de part la richesse des procédés, des possibilités de transmission, l'écoute des ondes radioélectriques peut être passionnante. Rechercher quel est le mode de transmission utilisé par l'émetteur pour pouvoir décoder l'émission est un exercice souvent délicat : l'informatique permet «à moindre coût» de décoder directement les images météo ou les messages d'agences. L'observation des signaux permet souvent aux plus attentifs de trouver la solution. Soyez cependant rassurés, la détection des signaux digitaux n'est pas si simple.

Le suivi d'un signal modulé depuis l'antenne jusqu'au transcodeur (écran, haut parleur ou imprimante) est un exercice bien complexe.

Cet article est loin d'être exhaustif. La quantité de documents nécessaires à faire le point sur les modes et les procédés est très importante. Qui plus est, les données sont variables. L'UIT (Union Internationale des Télécommunications) modifie souvent les plans de fréquences qui ne sont pas toujours respectés par les états. En Europe, la CEPT énonce ces recommandations pas toujours suivies. Des associations, des clubs d'écouteurs et des revues disponibles en kiosque donnent les références actualisées.

Les valeurs de fréquences dans les articles sont données à titre d'exemple. Il s'agit le plus souvent de plages de fréquences (GSM, Radiocom, etc.).

Se souvenir que tout message privé (diffusé par radiotéléphone par exemple) ne peut être divulgué.

BIBLIOGRAPHIE

Revues

- Ondes courtes magazine,
- Le haut parleur,
- Mégahertz,
- Radio plans.

Livres

- Télévision du monde de P Godou (Soracom),
- World radio TV Handbook,
- Répertoires des stations professionnelles (Klingenfuss Publications),
- Radio amateur Handbook (American radio relay league).

Club d'écoute

- Amitiés radio - B.P. 56 - 94002 CRÉTEIL Cedex,
- REF associations des radioamateurs - B.P. 2129 - 37021 TOURS Cedex.

