

Émetteurs FM

par **Mariano DOMINGUEZ**

Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de l'Électronique et de ses Applications (ENSEA)
Responsable Produits FM à Thomson-LGT

1. Service	E 6 151 - 1
1.1 Émissions en stéréophonie.....	— 2
1.2 Diffusion numérique de données.....	— 2
1.3 Réseaux isofréquence	— 2
2. Caractéristiques des émissions en FM	— 3
2.1 Modulation de fréquence.....	— 3
2.2 Porteuse RF	— 7
3. Zone de service	— 7
3.1 Définitions	— 7
3.2 Transmission dans la zone de service	— 7
4. Constitution d'un émetteur FM	— 9
4.1 Pilote modulateur FM.....	— 9
4.2 Amplificateur RF à transistors	— 11
4.3 Émetteur 5 kW FM à transistors	— 13
5. Systèmes auxiliaires	— 15
5.1 Antenne d'émission.....	— 15
5.2 Automatismes de substitution	— 16
6. Évolution de la radiodiffusion	— 17
6.1 Émetteurs FM.....	— 17
6.2 Radiodiffusion audionumérique.....	— 17
Pour en savoir plus	Doc. E 6 151

La radiodiffusion sonore utilisant la technique de la modulation de fréquence (FM) est destinée à être reçue par le public. Ces émissions sont effectuées dans la bande des ondes métriques, de 87,5 à 108 MHz (ou 68 à 76 MHz dans certains pays).

Contrairement aux émissions en modulation d'amplitude en ondes courtes, moyennes ou longues, leur couverture reste locale, compte tenu de leur portée réduite dans cette bande de fréquence. Néanmoins, elles peuvent être diffusées au niveau national, via satellite ou faisceau hertzien et rediffusion par des émetteurs FM.

L'excellente qualité du signal audio transmis, les progrès technologiques qui ont permis aux industriels de mettre à la disposition du public des récepteurs à des coûts réduits, performants et simples d'utilisation, contribuent à rendre cette technique d'émission de plus en plus utilisée dans le monde.

1. Service

1.1 Émissions en stéréophonie

Les premières émissions en modulation de fréquence étaient effectuées en monophonie. Une source unique de modulation était transmise.

Actuellement en pratique toutes les émissions s'effectuent en stéréophonie. L'effet stéréophonique peut être reproduit en radiodiffusion en transmettant les modulations de deux sources sonores séparées ; par exemple, les signaux issus de chacun des deux microphones installés dans une salle de concert ou un studio (figure 1).

À la réception, après démodulation et amplification, deux haut-parleurs reconstituent les sons captés par les deux microphones, reproduisant l'effet stéréophonique.

1.2 Diffusion numérique de données

Des nouveaux services sont apparus, grâce à un système de diffusion qui va représenter un événement comparable à celui constitué par l'émission en stéréophonie.

Le RDS (*Radio Data System*), système destiné en particulier à l'accord automatique des récepteurs de radiodiffusion et utilisable avec le système à fréquence pilote, est spécifié dans la Recommandation 643-1 du Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR).

Ces signaux apportent à l'auditeur de nouveaux services :

- l'accord automatique des autoradios sur un programme déterminé, quelle que soit sa fréquence d'émission, dans la bande FM ;
- l'identification des chaînes diffusant des informations autoroutières ;
- la sélection automatique d'un type de programme choisi : musique, informations sportives, etc.

Le RDS est aussi utilisé dans d'autres applications, par exemple dans le domaine de la radiomessagerie. On transmet des messages

vers des particuliers équipés de petits récepteurs de poche. Le message reçu peut être visualisé sur un petit afficheur à cristaux liquides.

1.3 Réseaux isofréquence

Dans le cas de réseaux FM destinés aux automobilistes, la diffusion du programme le long de certains réseaux routiers s'effectue sur une seule fréquence : l'automobiliste se déplaçant d'un point à un autre n'aura pas à accorder son récepteur sur différentes fréquences au cours de son déplacement.

Dans un réseau de ce type, la continuité du service doit être assurée le long du réseau. Cela implique que les zones de couverture de deux émetteurs consécutifs doivent se recouper.

La figure 2 montre la situation d'un automobiliste allant d'un point A vers un point B. La zone de transition entre la zone de couverture de l'émetteur 1, que l'automobiliste est en train de quitter, et la zone de couverture de l'émetteur 2, vers laquelle il se dirige, constitue une zone de brouillage. Dans cette zone, le récepteur capte deux ondes à la même fréquence, issues de l'émetteur 1 et de l'émetteur 2, de même niveau d'amplitude, mais avec un retard dans le temps, dû à la différence de trajet.

Dans le cas de la FM traditionnelle, pour permettre une réception continue, sans brouillage, entre les points A et B, il faut installer un autre émetteur diffusant le même programme, mais à une fréquence différente. L'automobiliste devra alors accorder son récepteur sur la nouvelle fréquence, s'il souhaite continuer à recevoir le même programme.

Dans le cas de programmes diffusant le RDS destinés aux automobilistes, les récepteurs équipés pour recevoir ce type d'information effectuent automatiquement l'accord sur la nouvelle fréquence. Néanmoins, le parc des récepteurs équipés RDS est encore relativement réduit.

Les réseaux isofréquence utilisent des techniques permettant de réduire au minimum les phénomènes d'interférences dans les zones de transition.

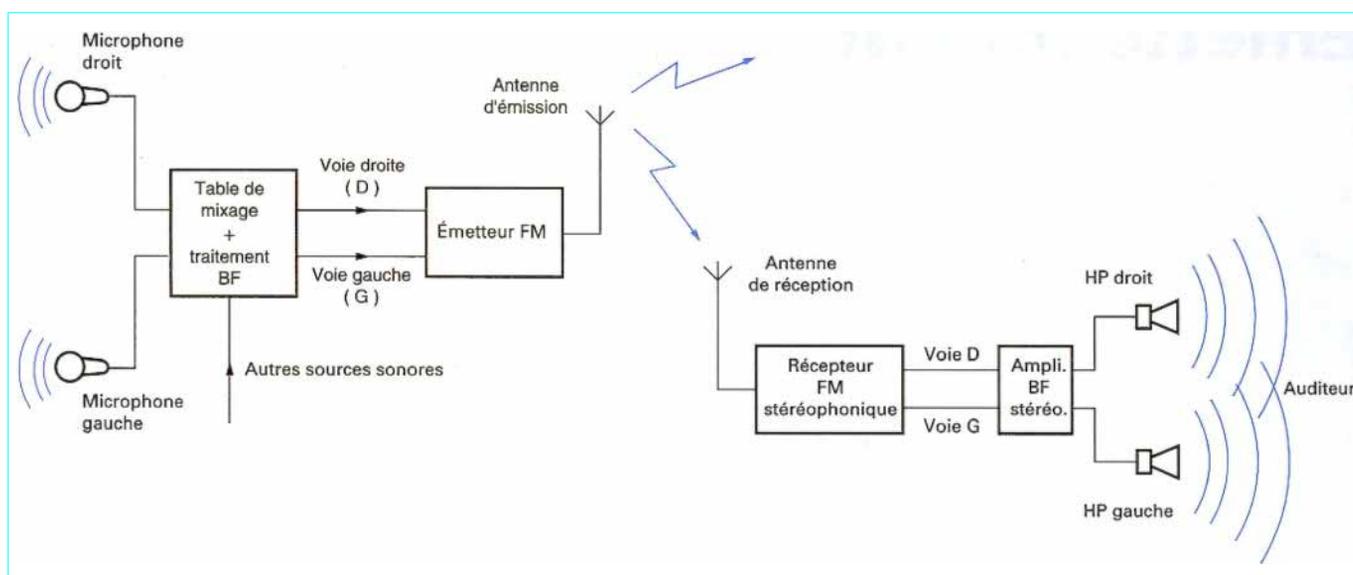


Figure 1 – Transmission stéréophonique en FM

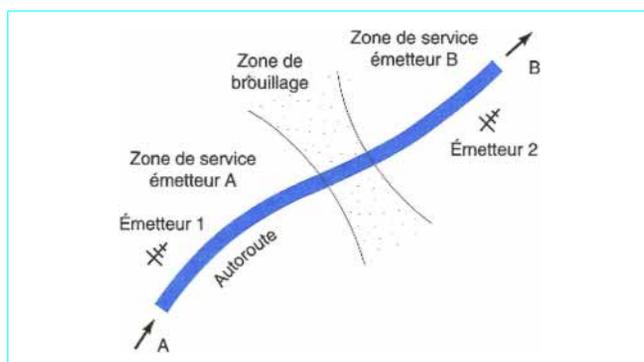


Figure 2 – Zone de brouillage entre deux émetteurs

Les récepteurs actuels sont totalement compatibles avec ces émissions ; en conséquence, ils bénéficient immédiatement des progrès apportés par ce type de réseau. L'automobiliste peut recevoir son programme sans interruption et sans toucher au réglage de son récepteur.

1.3.1 Réseau isofréquence d'émetteurs FM synchrones

La figure 3 montre le principe d'un réseau de ce type.

Les émetteurs sont proches de l'itinéraire et leur zone de couverture est limitée à ses abords. La zone de recouvrement est limitée, réduisant la zone de brouillage. Ce faible recouvrement est obtenu d'une part en exploitant au mieux le relief du site (coude d'une vallée, par exemple) et d'autre part par l'utilisation d'antennes très directives dont la puissance d'émission est ajustée d'une façon très précise.

Un autre facteur de réduction des brouillages provient de la synchronisation des émetteurs. Il s'agit d'assurer une coïncidence temporelle exacte et permanente des signaux provenant des deux émetteurs les plus proches. La synchronisation dépend de l'égalité des temps de parcours des signaux utile et brouilleur depuis leur point de départ commun. À cet effet, on introduit un retard dans les émetteurs, afin de réaliser cette condition dans la zone de brouillage potentielle.

La figure 4 montre un tronçon de parcours comportant deux bords d'un réseau isofréquence. BRD représente le parcours du signal utile retardé, BFD le parcours du signal brouilleur. Le retard R est tel que l'on ait $BRD = BFD$. Dans la zone BC, il n'y a pas de synchronisation, les signaux se comportent comme en FM classique, le signal brouilleur est faible : il n'y a pas de brouillage. Dans la zone CF, les signaux utile et brouilleur sont de même ordre de grandeur, mais la perturbation se trouve fortement diminuée par la synchronisation des signaux et ne dure que peu de temps, s'agissant de véhicules en déplacement. Passé le nouvel émetteur 2, on se trouve à nouveau en zone de champ utile fort et le processus se répète.

1.3.2 Transport de l'émission

Diverses techniques sont utilisées pour transporter le signal utile aux différents émetteurs constituant un réseau isofréquence.

■ **Transport par fibre optique** : le signal est fourni aux émetteurs sous la forme à émettre et à la fréquence définitive. La synchronisation au point de la zone de service choisi est réalisée par l'introduction de dispositifs de retard appropriés aux émetteurs.

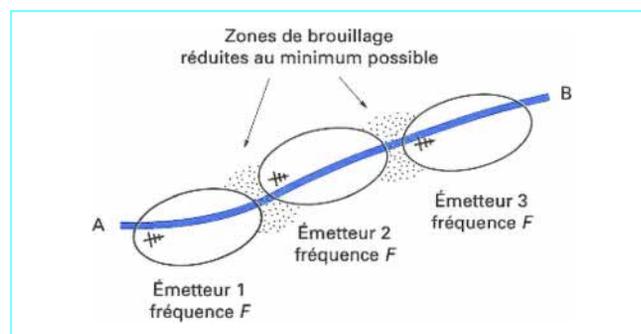


Figure 3 – Réseau isofréquence d'émetteurs FM synchrones

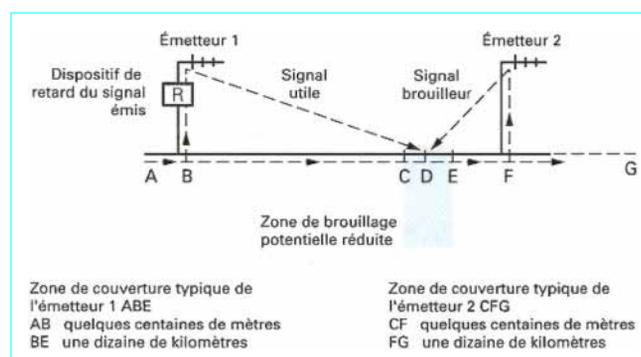


Figure 4 – Égalisation des temps de parcours des signaux

■ **Transport du signal sous forme numérique** : l'identité des signaux fournis aux émetteurs est également assurée au temps de transport près. Les émetteurs sont équipés de modulateurs numériques produisant directement la modulation de fréquence à partir des échantillons numériques du signal de base audio. Cette solution comporte l'avantage de pouvoir utiliser différents moyens de transport du signal : la fibre optique sur certains trajets et les faisceaux hertziens sur d'autres.

■ **Transport par réémissions successives** : chaque émetteur reçoit directement le signal émis par l'émetteur précédent. Chaque site comporte une antenne de réception pour capter le signal de l'émetteur précédent et une antenne d'émission pour le transmettre au bord suivant. Une des difficultés de ce système réside dans le niveau de découplage important à assurer entre l'antenne de réception et l'antenne d'émission sur le site, fonctionnant à la même fréquence.

2. Caractéristiques des émissions en FM

2.1 Modulation de fréquence

La modulation de fréquence consiste à faire varier la fréquence instantanée d'un signal porteur (porteuse radiofréquence RF) par un autre signal représentant l'information à transmettre (signal de modulation).

L'excursion maximale de la porteuse RF ainsi modulée est fixée par les normes à ± 75 kHz par rapport à sa fréquence centrale. La largeur de bande du signal modulant audiofréquence (AF) est de 15 kHz.

2.1.1 Définitions

Soit $A_c \cos(\Omega_c t + \Phi_c)$ le signal de la porteuse, avec A_c amplitude de la porteuse, Ω_c pulsation de la porteuse, Φ_c phase à l'origine de la porteuse.

Considérons la phase Φ_c comme nulle, pour simplifier les calculs. La fréquence de la porteuse doit varier linéairement en fonction du signal modulant $f_m(t)$.

La fréquence instantanée sera :

$$f_c + K f_m(t)$$

avec f_c fréquence moyenne de la porteuse, K constante.

L'expression mathématique de l'onde modulée sera :

$$f(t) = A_c \cos \left[\Omega_c t + 2\pi K \int f_m(t) dt \right]$$

Supposons un signal modulant sinusoïdal du type :

$$A_m \cos \Omega_m t$$

avec A_m et Ω_m amplitude et pulsation du signal modulant.

On peut écrire :

$$f(t) = A_c \cos [\Omega_c t + (KA_m/f_m) \sin \Omega_m t]$$

Dans ce cas particulier, la fréquence de l'onde modulée est :

$$f_c + KA_m \cos \Omega_m t$$

Celle-ci varie entre $(f_c - KA_m)$ et $(f_c + KA_m)$. La déviation maximale de fréquence $\Delta f_c = KA_m$ est l'*excursion de fréquence*. Le rapport $\Delta f_c/f_m$ définit l'*indice de modulation* m_f .

L'expression de $f(t)$ devient :

$$f(t) = A_c \cos [\Omega_c t + m_f \sin \Omega_m t]$$

Le spectre du signal modulé en fréquence possède un nombre infini de composantes spectrales situées à $\Omega_c \pm n \Omega_m$,

avec Ω_c pulsation de la porteuse,

Ω_m pulsation du signal modulant,

n nombre entier (0, 1, 2 ...).

L'amplitude correspondant à ces fréquences est déterminée par des coefficients $J_n(m_f)$ connus comme fonctions de Bessel.

L'expression du signal FM devient :

$$\begin{aligned} f(t) &= A_c \cos [\Omega_c t + m_f \sin \Omega_m t] \\ &= A_c \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} J_n(m_f) \cos(\Omega_c + n\Omega_m)t \\ &= A_c J_0(m_f) \cos \Omega_c t \\ &+ A_c J_1(m_f) [\cos(\Omega_c + \Omega_m)t - \cos(\Omega_c - \Omega_m)t] \\ &+ A_c J_2(m_f) [\cos(\Omega_c + 2\Omega_m)t + \cos(\Omega_c - 2\Omega_m)t] \\ &+ A_c J_3(m_f) [\cos(\Omega_c + 3\Omega_m)t - \cos(\Omega_c - 3\Omega_m)t] + \dots \end{aligned}$$

Les variations des fonctions de Bessel en fonction de l'indice de modulation sont représentées sur la figure 5.

Les fonctions de Bessel peuvent être calculées à partir de l'expression :

$$J_n(m_f) = (m_f/2)^n \left[1/n! - \frac{(m_f/2)^2}{1!(n+1)!} + \frac{(m_f/2)^4}{2!(n+2)!} - \frac{(m_f/2)^6}{3!(n+3)!} + \dots \right]$$

La table de la figure 5 représente les fonctions de Bessel dont l'amplitude est supérieure ou égale à 0,01, les composantes spectrales de très faible valeur pouvant être négligées sans affecter l'allure du signal FM.

La figure 6 représente le spectre du signal FM pour différents indices de modulation m_f . Pour une même fréquence de modulation, un indice de modulation plus important implique une bande de fréquence plus large.

La bande de fréquence du signal FM dépend de l'indice de modulation m_f ainsi que de la fréquence de modulation f_m .

Lorsque l'indice de modulation est faible ($m_f \ll 1$), le spectre d'un signal FM rappelle celui d'un signal AM. La modulation est à bande étroite. La largeur de bande est : $W = 2 f_{\max}$ avec f_{\max} fréquence maximale de modulation.

Pour un indice de modulation $0,3 \leq m_f \leq 20$, la bande de fréquence sera déterminée par le nombre de raies spectrales N dont l'amplitude du coefficient de Bessel est supérieure à 0,01. La largeur de bande est : $W = 2 N f_{\max}$.

Pour des indices de modulation supérieurs à 20, la largeur de bande peut être calculée par une formule d'approximation $W = 2(\Delta f_c + 2 f_{\max})$.

Lorsque l'indice de modulation croît (voir les fonctions de Bessel de la figure 5), l'intensité des raies latérales croît au détriment de la raie principale $J_0(m_f)$, correspondant à la fréquence de la porteuse. La première annulation de cette dernière s'effectue pour un indice de modulation $m_f = 2,4$.

L'information contenue dans les signaux FM réside essentiellement dans les bandes latérales. Au fur et à mesure que l'indice de modulation croît, la puissance contenue dans les bandes latérales tend à devenir égale, et d'une façon uniforme, à la puissance de l'onde porteuse non modulée (figure 7).

2.1.2 Signal multiplex stéréophonique

Pour transmettre l'effet stéréophonique, le signal modulant, ou signal multiplex (MPX), utilise le système à fréquence pilote défini par le CCIR dans son avis 450-1.

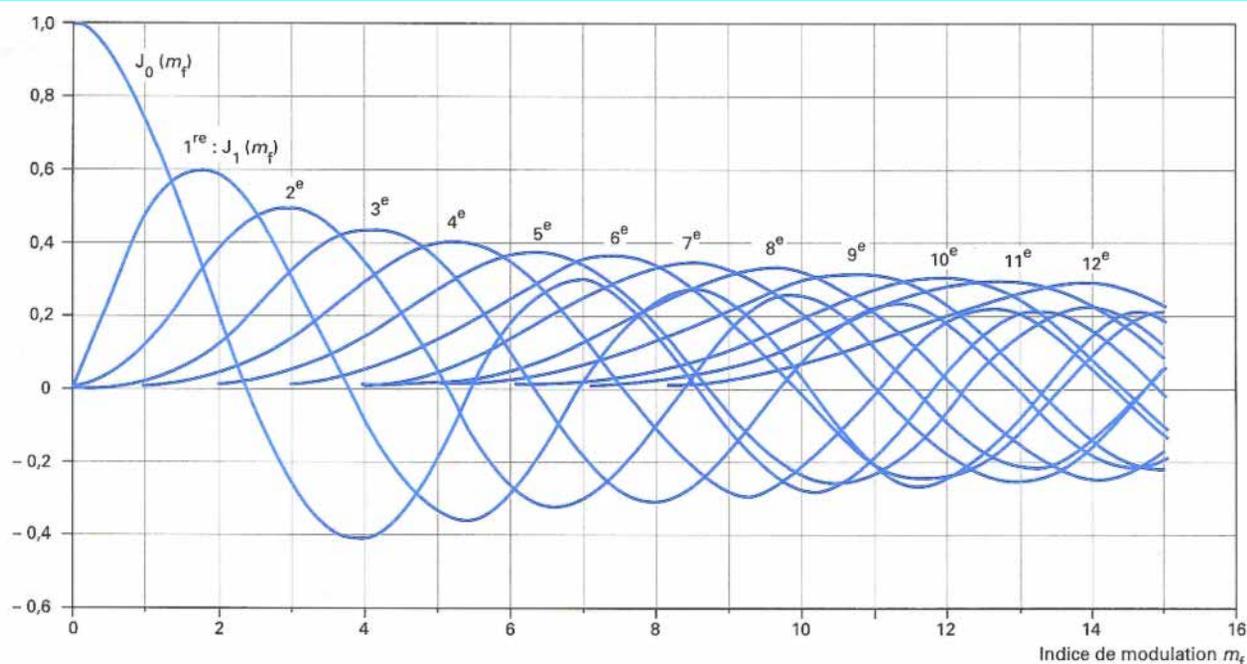
Le principe est le suivant (figure 8).

On constitue un signal M égal à la moitié de la somme des signaux droite (D) et gauche (G), correspondant aux deux voies stéréophoniques. On constitue un signal S égal à la moitié de la différence des voies précédentes. Le signal S module en amplitude, à porteuse supprimée, une sous-porteuse à 38 kHz.

Le signal MPX stéréophonique est la somme du signal M et des bandes latérales de la sous-porteuse supprimée modulée en amplitude par le signal S . On ajoute un pilote à 19 kHz, moitié exacte de la fréquence de la sous-porteuse. À la réception, le pilote à 19 kHz permet de reconstituer la porteuse à 38 kHz.

Le signal MPX est compatible avec les récepteurs monophoniques. Dans ce cas, seul le signal M est démodulé.

Des études statistiques ont montré que la distribution spectrale d'énergie des sources sonores (parole ou musique) n'est pas uniforme. L'amplitude des composantes à fréquences élevées est plus faible que celle des fréquences moyennes ou basses. Par ailleurs, la densité spectrale de bruit de la transmission augmente avec la fréquence. Avant la constitution des signaux M et S , les fréquences élevées des signaux droite et gauche sont amplifiées, selon une courbe de *préaccentuation* spécifiée par le CCIR. À la réception, on effectue le traitement inverse, ou *désaccentuation*. Ce traitement améliore le rapport signal sur bruit de la transmission.



$m_f \backslash J$	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}	J_{11}	J_{12}	J_{13}	J_{14}	J_{15}	J_{16}
0,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25	0,98	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5	0,94	0,24	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,0	0,77	0,44	0,11	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,5	0,51	0,56	0,23	0,06	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,0	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,5	-0,05	0,50	0,45	0,22	0,07	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0	-0,26	0,34	0,49	0,31	0,13	0,04	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0	-0,40	-0,07	0,36	0,43	0,28	0,13	0,05	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5,0	-0,18	-0,33	0,05	0,36	0,39	0,26	0,13	0,05	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-
6,0	0,15	-0,28	-0,24	0,11	0,36	0,36	0,25	0,13	0,06	0,02	-	-	-	-	-	-	-
7,0	0,30	0,00	-0,30	-0,17	0,16	0,35	0,34	0,23	0,13	0,06	0,02	-	-	-	-	-	-
8,0	0,17	0,23	-0,11	-0,29	-0,10	0,19	0,34	0,32	0,22	0,13	0,06	0,03	-	-	-	-	-
9,0	-0,09	0,24	0,14	-0,18	-0,27	-0,06	0,20	0,33	0,30	0,21	0,12	0,06	0,03	0,01	-	-	-
10,0	-0,25	0,04	0,25	0,06	-0,22	-0,23	-0,01	0,22	0,31	0,29	0,20	0,12	0,06	0,03	0,01	-	-
12,0	0,05	-0,22	-0,08	0,20	0,18	-0,07	-0,24	-0,17	0,05	0,23	0,30	0,27	0,20	0,12	0,07	0,03	0,01
15,0	-0,01	0,21	0,04	-0,19	-0,12	0,13	0,21	0,03	-0,17	-0,22	-0,09	0,10	0,24	0,28	0,25	0,18	0,12

Figure 5 – Fonctions de Bessel

2.1.3 Signaux supplémentaires : système RDS

On transmet, en même temps que les signaux habituels de parole ou de musique, des signaux numériques inaudibles.

Une sous-porteuse à 57 kHz est ajoutée au signal de modulation, en bande de base, verrouillée en phase ou en quadrature sur la troisième harmonique de la fréquence pilote 19 kHz, dans le cas de la stéréophonie. La déviation nominale recommandée de la porteuse FM principale due à la sous-porteuse modulée est de ± 2 kHz. La sous-porteuse est modulée en amplitude par le signal de données mis en forme et codé en biphase. La sous-porteuse est supprimée (figure 9).

Les émetteurs diffusant ce type d'information sont équipés d'un codeur RDS dont la fonction est de générer la sous-porteuse à 57 kHz modulée par les informations numériques à transmettre. L'émetteur fournit au codeur RDS la fréquence du pilote afin de synchroniser la sous-porteuse à 57 kHz.

2.1.4 Comparaison AM-FM

Un des avantages de la FM réside dans le fait que toute l'énergie émise contient de l'information (§ 2.1.1), alors que, en modulation d'amplitude (AM), au moins 2/3 de l'énergie émise est inutilisée.

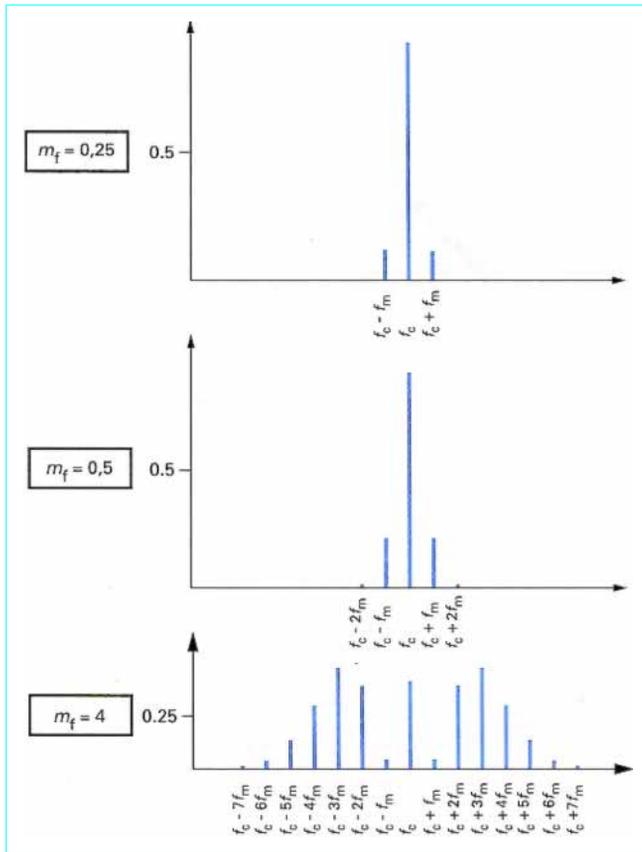


Figure 6 – Spectre d'un signal FM pour différents indices de modulation m_f , en supposant $A_c = 1$

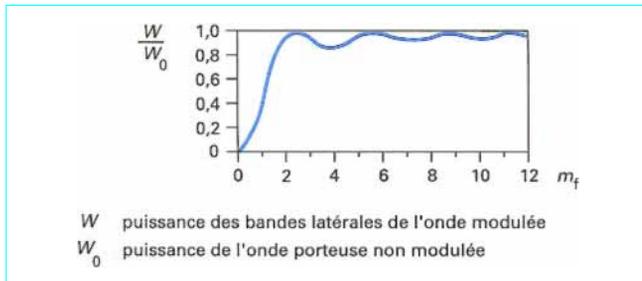


Figure 7 – Rapport W/W_0 en fonction de l'indice de modulation m_f

Par ailleurs, contrairement à la AM, la puissance fournie à l'antenne reste constante, la modulation n'ajoutant aucune énergie. L'énergie des bandes latérales est prélevée au détriment de la puissance de l'onde porteuse. Les étages d'amplification des émetteurs FM peuvent travailler au rendement maximal en classe C. Néanmoins, la portée d'un signal FM est limitée par rapport à la AM par le fait que les fréquences VHF utilisées en FM ont un mode de propagation en ondes directes.

En ce qui concerne l'occupation du spectre, la largeur de bande d'un signal modulé en fréquence est plus importante que celle d'un signal modulé en amplitude, mais cet inconvénient est compensé par un meilleur rapport signal sur bruit de la transmission. Une varia-

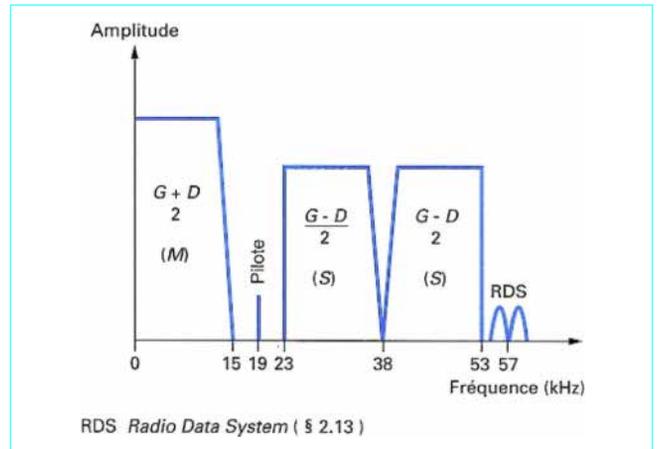


Figure 8 – Spectre du multiplex stéréophonique et sous-porteuse RDS

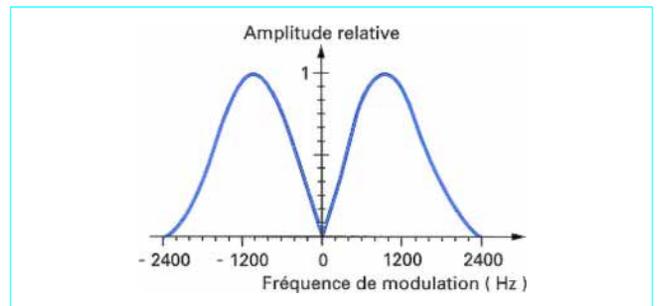


Figure 9 – Spectre des signaux de données RDS codés en biphase

tion du rapport signal sur bruit à l'entrée d'un récepteur correspond à une variation proportionnelle du rapport signal sur bruit à sa sortie démodulée, lorsque le rapport signal sur bruit à son entrée est suffisamment important. La valeur du rapport signal sur bruit à l'entrée à partir de laquelle le rapport signal sur bruit à la sortie commence à décroître de manière accentuée s'appelle le *seuil de démodulation*.

La figure 10 montre les caractéristiques en rapport signal sur bruit d'un signal modulé en amplitude (AM) et d'un signal modulé en fréquence (FM).

Le point d'intersection entre les caractéristiques du signal FM et celle du signal AM détermine un seuil à partir duquel la modulation de fréquence devient plus intéressante que la modulation d'amplitude.

Le gain en rapport signal sur bruit de la FM par rapport à la AM est proportionnel à l'indice de modulation m_f (§ 2.1.1), tant que l'on se trouve dans la zone linéaire (au-dessus de 9 dB environ). L'augmentation de l'indice de modulation entraîne une excursion de fréquence plus importante et par conséquent une largeur de bande plus importante. Un compromis doit être fait entre la bande de fréquence du signal modulé et le rapport signal sur bruit du signal démodulé.

Les techniques de démodulation non cohérente, consistant à transformer le signe FM en un signal AM et à utiliser un détecteur d'enveloppe pour extraire la modulation, ont été remplacées par des techniques fondées sur le principe de la boucle à phase asservie (PLL). Dans ce cas, la démodulation est cohérente. Ce système permet d'abaisser le seuil de démodulation d'environ 3 dB (figure 11).

3. Zone de service

3.1 Définitions

Le système d'émission FM doit assurer la couverture d'une zone de service déterminée. Les zones de service ne sont pas toujours définies d'une façon simple, néanmoins elles peuvent être classées en trois catégories :

- les zones de services étendues : généralement des zones rurales à faible densité de population ;
- les zones à forte densité de population : zones urbaines ou grandes villes ;
- les zones d'ombre : il s'agit d'assurer la continuité de service, l'émetteur principal pouvant ne pas couvrir certaines zones masquées par des obstacles naturels.

Le choix du site d'émission est un élément essentiel pour assurer le service.

3.2 Transmission dans la zone de service

Dans le cas d'une transmission de radiodiffusion idéale, la qualité du signal à la sortie démodulée d'un récepteur, exprimée en termes de parfaite reproduction du signal audio modulant l'émetteur, est limitée par les caractéristiques intrinsèques des équipements. Les bruits thermiques, les perturbateurs ou les distorsions apportées sur le signal utile, par les différents étages des équipements de la chaîne de transmission, contribuent à cette limitation.

Dans la plupart des cas, l'émetteur et les récepteurs se trouvent dans un environnement complexe.

D'une part, l'environnement physique dans lequel se situent les équipements, essentiellement le relief, peut être très différent selon la situation géographique du site. Ses caractéristiques peuvent varier, par ailleurs, selon les saisons (végétation, pluie, neige, température, etc.).

D'autre part, l'environnement électromagnétique peut être peu encombré, comme dans le cas de zones rurales, ou très dense et perturbé comme dans le cas de grandes villes ou de zones industrielles.

Un certain nombre de contraintes et de paramètres doivent être pris en considération lors de la réalisation d'un réseau de radiodiffusion, afin d'obtenir une qualité de réception suffisante dans la zone de service de l'émetteur.

3.2.1 Sources de bruit

Le signal utile subit toutes sortes de perturbations tout au long de la chaîne de transmission. Ces perturbations sont généralement appelées bruit.

On peut distinguer trois sortes de bruits.

■ **Le bruit de fluctuation** d'origine interne aux équipements ; dans le cas des récepteurs, ce bruit est principalement généré dans les étages d'entrée RF ; la principale cause de ce type de bruit est l'agitation thermique des électrons : c'est l'effet Johnson. À l'écoute, ce phénomène se traduit par un effet de souffle.

Les résistances, ou toute partie résistive d'un composant dissipant de l'énergie, sont une source de bruit ; la puissance de bruit P_b (en watts) apparaissant aux bornes d'une résistance à la température thermodynamique T est donnée par la relation :

$$P_b = k T B$$

avec k constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K,
 T (K) température thermodynamique,
 B (Hz) bande de fréquence de mesure.

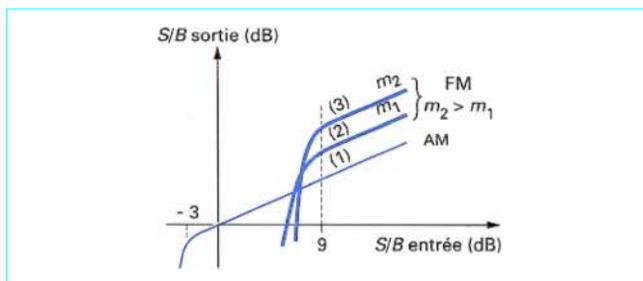


Figure 10 – Relation entre les rapports signal sur bruit à la sortie et à l'entrée d'un récepteur

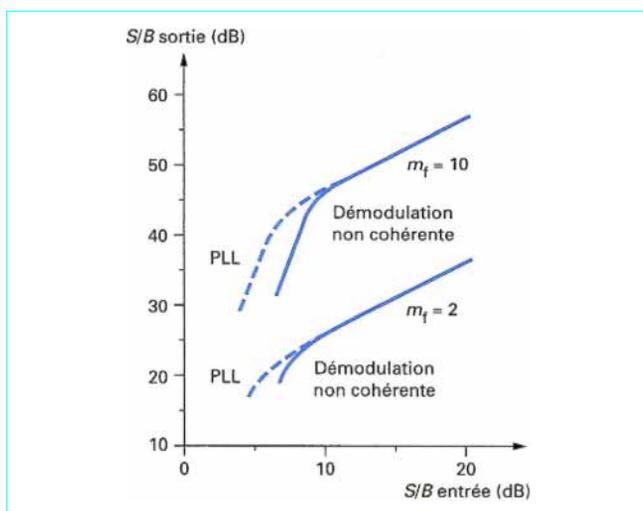


Figure 11 – Rapport signal sur bruit : comparaison des démodulations non cohérente et cohérente

Dans les récepteurs FM, la présence de limiteurs élimine les variations d'amplitude causées par l'addition de bruits au signal modulé. Une des conséquences est que le signal FM est beaucoup moins sensible aux perturbations d'origine atmosphérique ou industrielle.

2.2 Porteuse RF

Les installations de réception du grand public ont des performances limitées pour des raisons pratiques et économiques. Par ailleurs, les émissions, dans la plupart des cas peu directives, doivent pouvoir être reçues par des récepteurs portables ou mobiles (autoradios). Cela conduit à des puissances d'émetteurs importantes, de quelques dizaines de kilowatts, selon le type et l'étendue de la zone à couvrir.

Les émissions s'effectuent dans un canal de la bande FM (87,5 à 108 MHz) et doivent se conformer aux normes internationales, voire aux normes spécifiques du pays. Elles ont pour but de limiter les perturbations pouvant être provoquées par l'émetteur sur d'autres canaux de la bande FM ou sur d'autres services de radiocommunications, entre autres les spécifications concernant la limitation de l'excursion maximale en fréquence du signal RF due à la modulation à ± 75 kHz (perturbation des canaux adjacents) et le niveau maximal des raies parasites et des harmoniques.

Une des caractéristiques importantes d'un récepteur est exprimée par son **facteur de bruit**. Il représente le rapport de la puissance de bruit de sortie totale P_s , à la partie de P_s provoquée par le bruit thermique de son impédance d'entrée. Pour un même niveau de signal à son entrée RF, plus le facteur de bruit est faible (la limite théorique étant égale à 1), moins le récepteur est bruyant.

■ Les récepteurs peuvent être soumis à des perturbations d'origine externe, dues à des brouillages par d'autres émetteurs FM ou d'autres services hertziens. Ces brouillages donnent lieu aux **bruits d'interférence**.

Si l'on considère la courbe de sélectivité (figure 12) d'un récepteur et que l'on superpose la réponse spectrale d'un brouilleur, les raies situées dans la bande du canal de réception sont la source de perturbation du signal utile. Les effets sont plus ou moins gênants selon le type de perturbation : porteuse pure ou modulée, modulation d'amplitude ou de fréquence, etc. Les possibilités de brouillage dépendront des propriétés de sélectivité du récepteur.

■ Les perturbations extérieures, telles que les décharges électriques ou les phénomènes atmosphériques (orages), sont pour les récepteurs la source d'un autre type de bruit, le **bruit d'impulsion**.

Dans les zones urbaines à forte densité de population et dans les zones industrielles, ces phénomènes sont produits par les appareils électroménagers, les commutateurs, les moteurs et les dispositifs électriques ou électroniques de puissance.

3.2.2 Critères de transmission

Le CCIR, dans sa Recommandation 412-5, précise les normes de planification pour la radiodiffusion à modulation de fréquence en ondes métriques.

■ Champ minimal

La puissance apparente rayonnée par l'émetteur dans la zone de service doit assurer un champ médian au moins égal à :

- pour le service monophonique :
 - 48 dB (référence 1 $\mu\text{V}/\text{m}$) dans les zones rurales,
 - 60 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$) dans les zones urbaines,
 - 70 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$) dans les grandes villes ;
- pour le service stéréophonique :
 - 54 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$) dans les zones rurales,
 - 66 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$) dans les zones urbaines,
 - 74 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$) dans les grandes villes.

■ Rapport de protection

Les perturbations d'origine externe présentes à l'entrée RF du récepteur génèrent des brouillages parasites du signal audiofréquence (AF) en sortie démodulée du récepteur. Le rapport entre le signal RF utile et le signal RF perturbateur ne doit pas être inférieur à une certaine valeur minimale de référence, afin d'assurer le service de qualité souhaité.

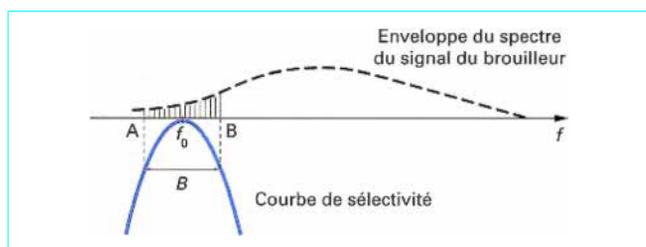


Figure 12 – Influence d'un brouilleur sur un récepteur sélectif

Les termes et les définitions suivants sont utilisés dans la planification des fréquences pour la radiodiffusion (Recommandation 638 du CCIR).

Le **rapport signal/brouilleur en audiofréquence** est le rapport, exprimé en décibels, entre les valeurs des tensions du signal utile et du brouilleur.

Le **rapport de protection en audiofréquence** est une valeur minimale conventionnelle du rapport signal/brouilleur en AF, qui correspond à une qualité de réception définie subjectivement comme acceptable. De la même façon, on définit le rapport signal/brouilleur aux bornes de l'entrée RF du récepteur.

Le rapport de protection en radiofréquence (RF) est la valeur du rapport signal/brouilleur, en radiofréquence, qui, dans des conditions bien déterminées, permet d'obtenir à la sortie d'un récepteur le rapport de protection en audiofréquence (Recommandation 638 du CCIR).

Le rapport de protection en RF est fonction de différents paramètres tels que :

- l'écartement des fréquences entre la porteuse utile et le brouilleur ;
- les caractéristiques de la modulation : type, taux de modulation, préaccentuation, déviation de fréquence ;
- les caractéristiques du signal audiofréquence ;
- le niveau d'entrée du récepteur ;
- les caractéristiques du récepteur : sélectivité, linéarité, etc.

La figure 13 montre le rapport de protection en radiofréquence pour la radiodiffusion en ondes métriques (87,5 à 108 MHz) pour une déviation maximale de fréquence de ± 75 kHz.

Par **exemple**, pour obtenir un rapport signal/bruit en audiofréquence de 50 dB dans le cas de réception d'un signal stéréophonique, il faut qu'un émetteur perturbateur situé à :

- 100 kHz ait un niveau de 35 dB plus faible que celui de l'émetteur sur lequel le récepteur est accordé ;
- 200 kHz ait un niveau de 10 dB plus faible seulement.

À partir d'un écart de fréquence supérieur à 270 kHz environ, le niveau de l'émetteur perturbateur peut être supérieur à celui de l'émetteur à recevoir et croître dans des proportions importantes lorsqu'il s'écarte en fréquence.

La méthode de mesure objective des rapports de protection de la figure 13 est spécifiée dans l'Annexe I de la Recommandation 641 du CCIR.

■ Espacement des canaux

L'espacement entre les porteuses, qui définissent la position des canaux, est de 100 kHz ou un multiple de 100 kHz : en pratique, au moins 200 kHz dans les mêmes zones couvertes et 100 kHz lorsque les zones sont jointives.

Le plan de fréquence doit être établi de telle façon que le rapport de protection soit respecté dans n'importe quel point de la zone de service.

La même fréquence peut être utilisée lorsque le niveau de l'émission perturbatrice est très faible par rapport à l'émetteur à recevoir. La figure 13 montre que pour obtenir un rapport signal/bruit de 50 dB dans le cas d'un signal stéréophonique, lorsque le perturbateur se situe à la même fréquence, son niveau doit être inférieur à 45 dB dans le cas d'un brouillage constant et 36 dB dans le cas d'un brouillage troposphérique.

Néanmoins, la transmission des émissions de grande qualité musicale (par exemple les enregistrements sur disque compact), dont les rapports signal/bruit peuvent dépasser 70 dB, conduisent à obtenir, dans les zones de service, des rapports de protection plus élevés que ceux indiqués précédemment.

Par ailleurs, l'amélioration des caractéristiques de **sélectivité** des récepteurs FM modernes, c'est-à-dire la résistance aux perturbations par des émetteurs adjacents, a conduit à l'amélioration du rapport signal/bruit du signal audiofréquence reçu.

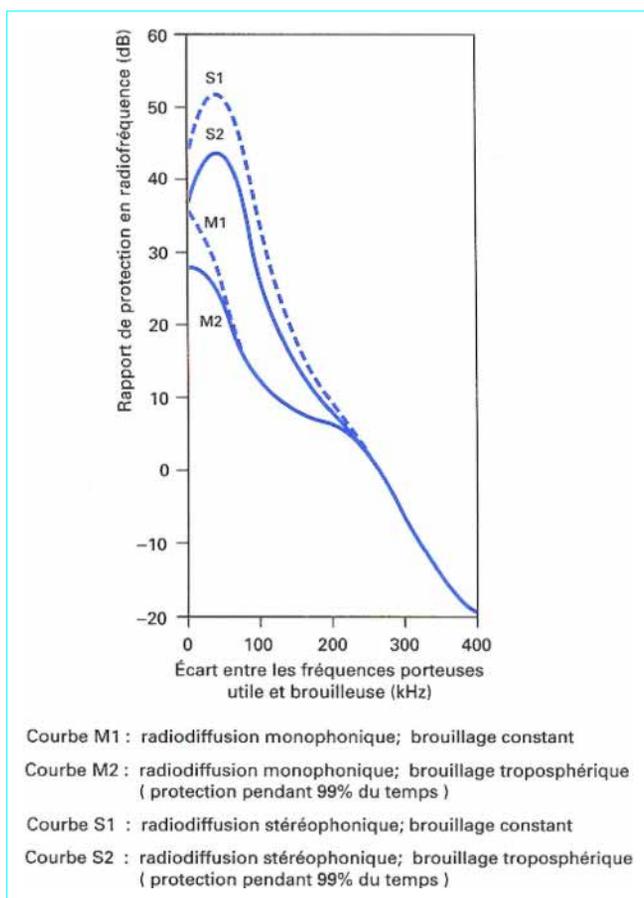


Figure 13 – Rapport de protection en RF [d'après CCIR 412-5]

4. Constitution d'un émetteur FM

La principale fonction d'un émetteur FM est de générer en puissance, dans le canal qui lui est attribué, une porteuse RF modulée en fréquence par le signal de modulation audiofréquence (§ 2.1).

Afin d'assurer cette fonction principale, l'émetteur comporte les éléments suivants :

- un étage de modulation constitué par le pilote FM ;
- une chaîne d'amplification RF ;
- l'alimentation de l'étage de puissance et les auxiliaires de l'émetteur.

4.1 Pilote modulateur FM

C'est l'élément de l'émetteur effectuant les traitements des différents signaux basse fréquence (BF) et la modulation en fréquence de la porteuse RF. Sa sortie RF permettra d'attaquer les étages de puissance de l'émetteur.

4.1.1 Modulation directe de fréquence avec verrouillage en phase

La plupart des pilotes FM utilisent actuellement ce principe (figure 14). La fréquence d'un auto-oscillateur pilote (OCT : Oscillateur Contrôlé en Tension) est modulée directement au rythme du signal BF (entrée e_2), en agissant sur un élément réactif variable dont dépend la fréquence d'oscillation. Des varicaps sont utilisées à cet effet, avec une bonne linéarité d'excursion en fréquence.

La fréquence moyenne de l'auto-oscillateur est stabilisée par une boucle à verrouillage de phase. La sortie S_c du comparateur de phase/discriminateur de fréquence CP attaque, à travers le filtre de boucle FB, l'entrée e_1 de contrôle en fréquence de l'auto-oscillateur.

La stabilité de la fréquence moyenne est celle du quartz Q de référence. La bande d'asservissement de la boucle à verrouillage de phase doit être suffisamment faible pour ne pas contrecarrer les basses fréquences du signal de modulation.

L'excursion de phase élevée, correspondant à l'excursion de fréquence aux fréquences basses de modulation ($\Delta\Phi = \Delta f/F$), est réduite par le diviseur programmable M, avant d'attaquer le comparateur de phase CP.

Le diviseur M permet, par ailleurs, d'effectuer le changement de fréquence de l'auto-oscillateur, par changement du taux de division. La fréquence de référence au niveau du comparateur de phase CP est obtenue en divisant la fréquence du quartz Q par le diviseur N.

4.1.2 Modulation en fréquence intermédiaire FI

Un premier auto-oscillateur OCT₁ à fréquence moyenne fixe de 10,7 MHz est modulé en fréquence par le signal BF attaquant son entrée de modulation e_2 (figure 15).

Comme dans le système à modulation directe de la fréquence (§ 4.1.1), sa fréquence moyenne est stabilisée (entrée e_1) par une boucle à verrouillage de phase, comportant une référence à quartz Q₁.

Un second auto-oscillateur OCT₂, fonctionnant à la fréquence de sortie RF (dans la bande FM), est inséré dans une boucle à verrouillage de phase, constituée par le comparateur de phase CP₂, le filtre de boucle FB₂ et l'OCT₂.

Le mélangeur M₁ à réjection de la fréquence image, inséré dans la boucle, transpose, par mélange avec la fréquence locale F_{OL} , la sortie F_s de l'OCT₂ à la fréquence $F_m = F_s - F_{OL}$. Le système électronique DF prépositionne en fréquence l'OCT₂ dans la plage de capture de la boucle à verrouillage de phase.

Au verrouillage on obtient : $F_m = FI$. L'OCT₂, attaqué à son entrée e_3 par le signal démodulé en sortie du comparateur de phase CP₂, recopie parfaitement le signal de modulation de fréquence porté par la FI.

La bande d'asservissement de la boucle à verrouillage de phase dans laquelle est inséré l'OCT₂ est de l'ordre de 500 kHz, permettant de débiter l'OCT₂ dans toute sa bande de modulation.

■ Intérêt du système

— Le premier oscillateur OCT₁, modulé directement en fréquence, fonctionne à une fréquence de sortie environ dix fois plus basse que la fréquence de sortie de l'émetteur ; son très faible bruit de phase permet d'obtenir un rapport signal sur bruit supérieur à 90 dB, pour une excursion nominale de référence de ± 75 kHz. Les effets microphoniques sont réduits.

— La linéarité de modulation de l'auto-oscillateur OCT₁ est optimisée, car il fonctionne à fréquence fixe.

— Les paramètres de modulation ainsi que le bruit spectral sont conservés lors d'un changement de canal, sans aucun réglage.

— L'oscillateur local de transposition utilisé peut être un quartz ou un synthétiseur de fréquence, dont la bande d'asservissement n'est pas liée à la fréquence de modulation. On bénéficie ainsi de la grande qualité spectrale de ce type de source.

— La boucle à verrouillage de phase du système de transposition de sortie effectuée le filtrage électronique des produits de mélange entre la FI et la fréquence locale.

— Comme dans le cas de la modulation directe à la fréquence de sortie, le système est agile en fréquence sans aucun réglage, la modification de canal s'effectuant par changement de la fréquence de l'oscillateur à quartz Q_2 ou de celle du synthétiseur ST.

4.1.3 Description fonctionnelle d'un pilote modulateur FM

Le synoptique de la figure 16 montre les principales fonctionnalités d'un pilote modulateur FM, utilisant une FI à 10,7 MHz.

■ Codeur stéréophonique

La figure 17 montre un exemple de réalisation d'un codeur stéréophonique.

Les voies audiofréquences droite et gauche symétriques attaquent les étages d'entrée du codeur stéréophonique, constituées par les transformateurs T_D et T_G symétriques/asymétriques à fort taux de réjection en mode commun. Suivent les étages de préaccentuation P_D et P_G . Les signaux sont limités en amplitude par les écrêteurs LM_D et LM_G . Les filtres passe-bas de Causer PB_D et PB_G éliminent les composantes au-dessus de 15 kHz. La sommation des voies droite et gauche (voie M) est effectuée par le sommateur SM.

La différence des deux voies (voie S) est effectuée par le sous-tracteur ST et module en amplitude la sous-porteuse à 38 kHz, dans un multiplicateur à quatre quadrants MT à très faible distorsion.

La génération de la sous-porteuse à 38 kHz et du pilote à 19 kHz est effectuée par un oscillateur à quartz Q associé à des diviseurs. Les harmoniques de la sous-porteuse et du pilote sont éliminées

respectivement par les filtres passe-bas PB_S et PB_P . Un déphaseur D_P permet d'ajuster la phase du pilote 19 kHz par rapport à la sous-porteuse à 38 kHz.

Les trois signaux M, S_m en sortie du multiplicateur et le pilote à 19 kHz sont sommés dans un amplificateur à large bande AM, pour constituer le signal MPX.

● Caractéristiques techniques typiques d'un codeur stéréophonique

Impédance d'entrée : $\geq 15 \text{ k}\Omega$, symétrique.

Réjection en mode commun : 50 dB de 50 Hz à 15 kHz.

Niveau d'entrée : + 12 dBm (= référence 1 mW) ± 6 dB.

Niveau de sortie : 4,35 V crête.

Réponse amplitude/fréquence : $\leq 0,2$ dB (de 30 Hz à 15 kHz).

Distorsion harmonique : $< 0,2$ %.

Rapport signal/bruit : > 83 dB (de 30 Hz à 15 kHz) efficace (référence + 12 dBm, désaccentuation 50 μ s).

Diaphonie G vers D et D vers G : ≥ 55 dB efficace (de 30 Hz à 15 kHz).

Atténuation des signaux parasites : ≥ 60 dB (au-delà de 53 kHz).

Atténuation du 38 kHz : ≥ 55 dB.

Fréquence pilote : 19 kHz $\pm 0,2$ Hz.

■ Modulateur FI

Il génère la porteuse FI modulée en fréquence à 10,7 MHz. Le modulateur est attaqué par le signal MPX issu du codeur stéréophonique. Il peut être aussi attaqué par des signaux spéciaux du type porteuse RDS (§ 2.1.3).

■ Convertisseur FI/RF

Il effectue le changement de fréquence de la FI dans un canal quelconque de la bande FM à l'aide d'un synthétiseur et permet d'attaquer les étages de préamplification de l'émetteur

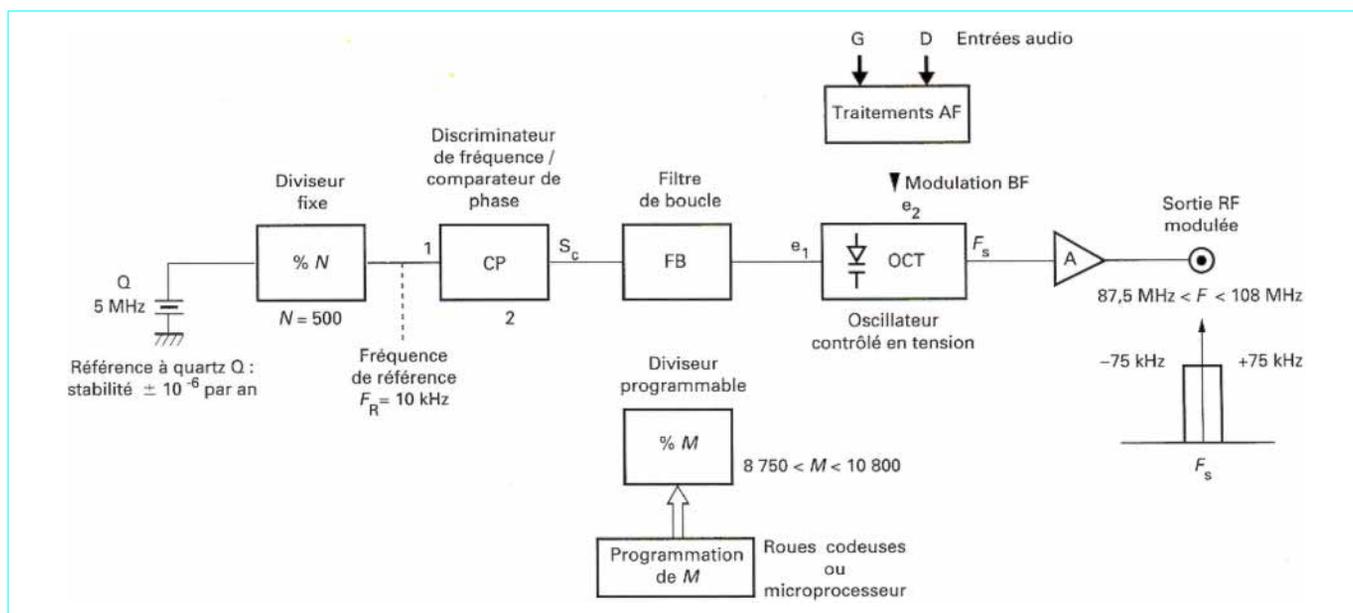


Figure 14 - Modulation directe de fréquence avec verrouillage en phase

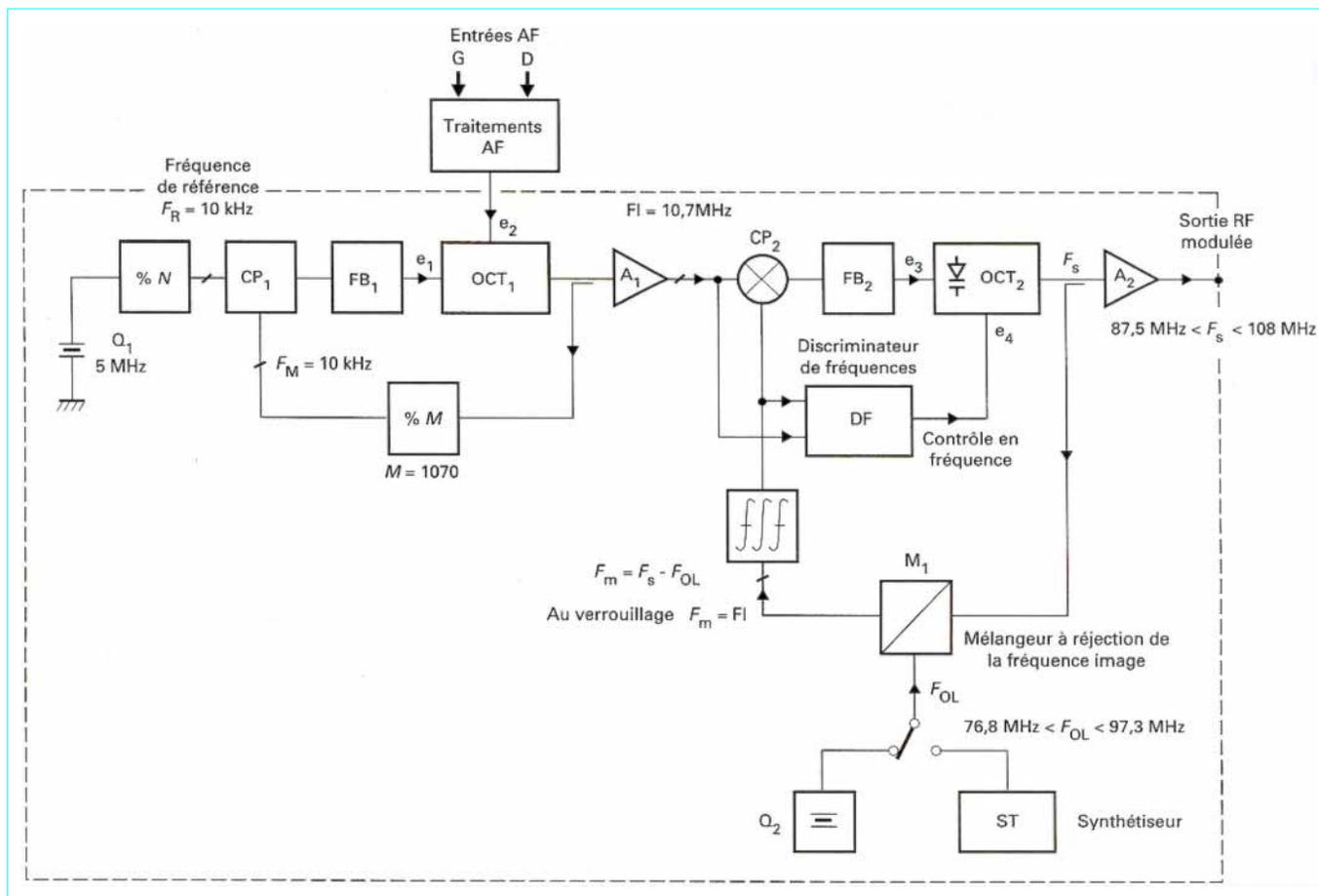


Figure 15 – Modulation en fréquence intermédiaire

■ Unité centrale

Une carte à microprocesseur assure le contrôle des fonctions du pilote, l'affichage alphanumérique des principaux paramètres de modulation, la mémorisation des télécommandes et l'envoi des télé-signalisations.

■ Préamplificateur

Il permet d'attaquer les étages de puissance de l'émetteur.

■ Circuit de sécurité

Le circuit ROS/CAG régule la puissance de sortie et protège l'amplificateur contre l'énergie réfléchi, en cas de désadaptation accidentelle de la charge.

■ Alimentation

Elle génère les tensions nécessaires au fonctionnement des sous-ensembles et de l'étage de puissance.

4.2 Amplificateur RF à transistors

Des transistors de forte puissance de type MOS-FET (*Metal Oxide Semiconductor-Field Effect Transistor*), pouvant fournir 300 W en porteuse pure dans la bande FM, sont actuellement utilisés pour réaliser les étages de puissance des émetteurs FM.

Le gain de ce type de transistor (environ 16 dB en classe C) est supérieur au gain des transistors bipolaires classiques (environ 9 dB). Dans cette classe de fonctionnement, on peut atteindre des rendements en puissance de l'ordre de 80 %.

La figure 18 montre le synoptique d'un amplificateur de base, pouvant fournir une puissance de 300 W dans la bande FM. Ces amplificateurs, conçus en large bande, ne nécessitent aucun réglage lors d'un changement de fréquence.

Une carte électronique assure le contrôle de la puissance de sortie du transistor, la sécurité thermique et la protection contre les ondes réfléchies dues à une désadaptation accidentelle de la charge.

Le groupement de plusieurs de ces amplificateurs à l'aide de systèmes de couplage RF à faibles pertes de transmission et à large bande (figure 19) permet de réaliser des étages de puissance de 10 kW et plus. Ces types de coupleurs ont pour fonction d'effectuer la sommation des puissances RF délivrées par les amplificateurs élémentaires. En cas de panne ou de déconnexion d'un ou plusieurs amplificateurs, les désadaptations engendrées perturbent notablement le fonctionnement de l'étage de puissance. Un dispositif d'isolement permet de conserver les mêmes conditions de fonctionnement des autres amplificateurs.

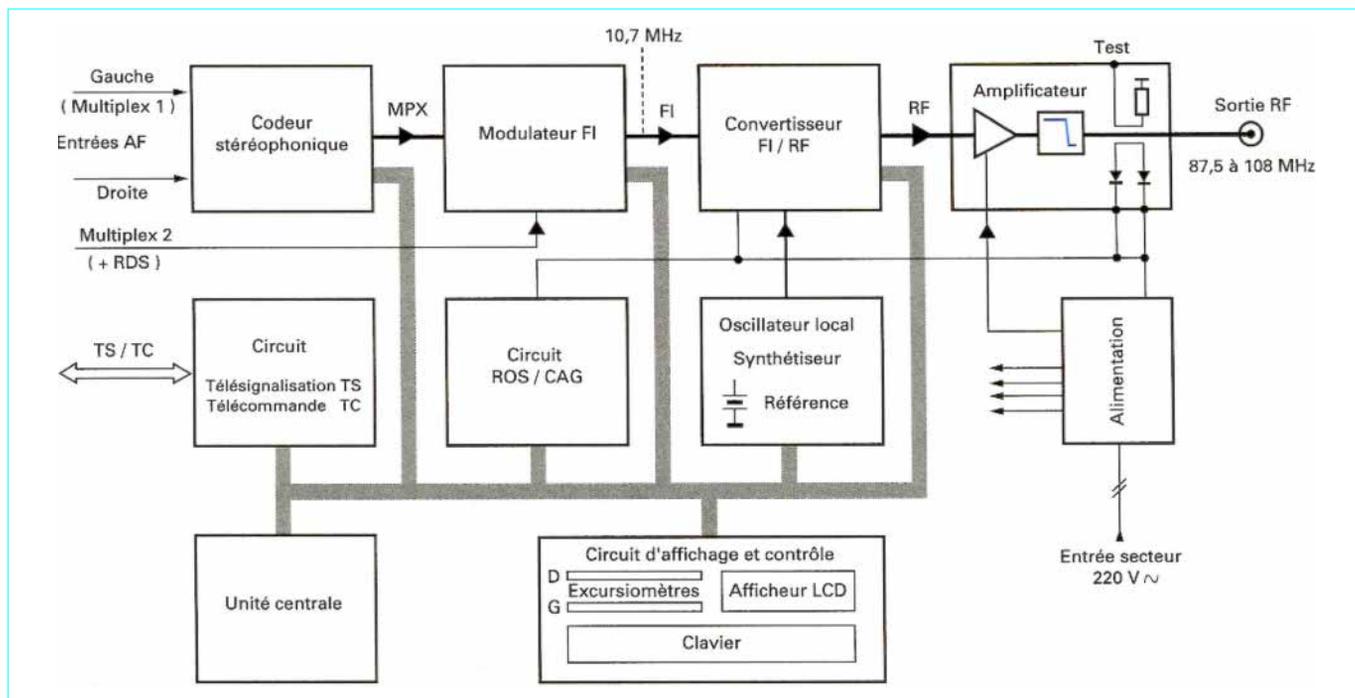


Figure 16 - Pilote modulateur FM

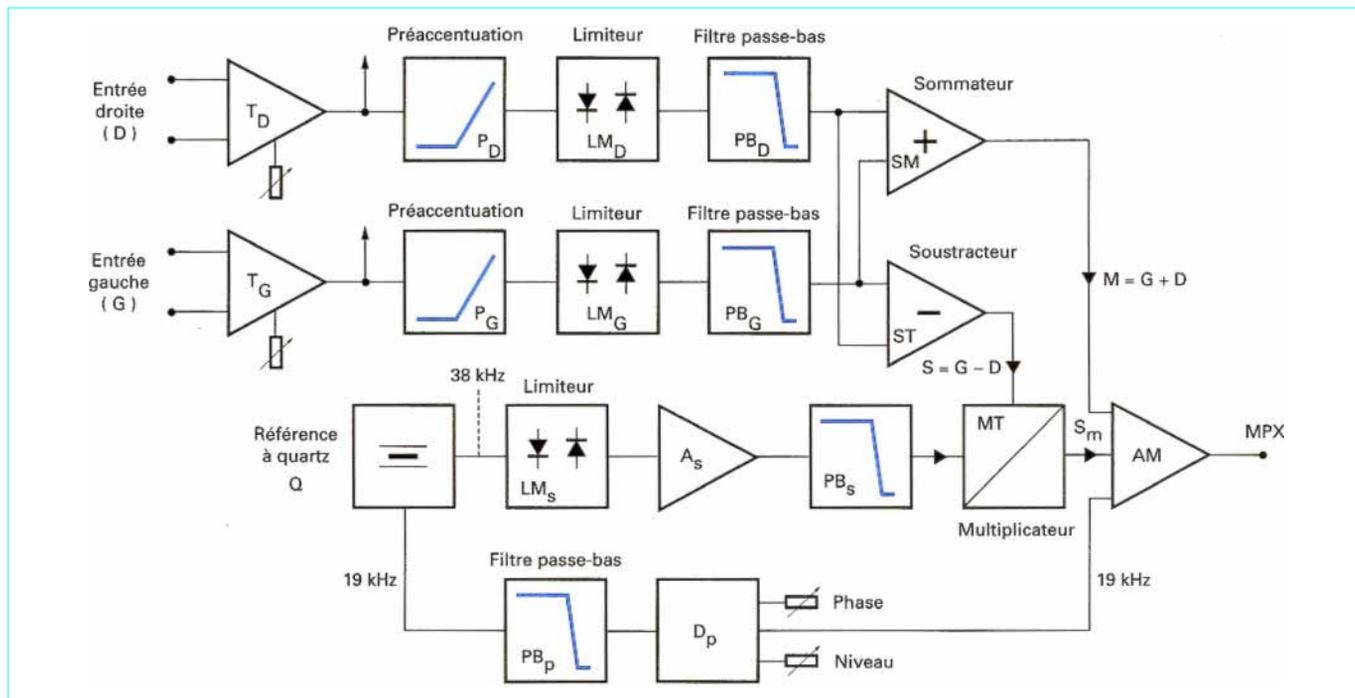


Figure 17 - Codeur stéréophonique

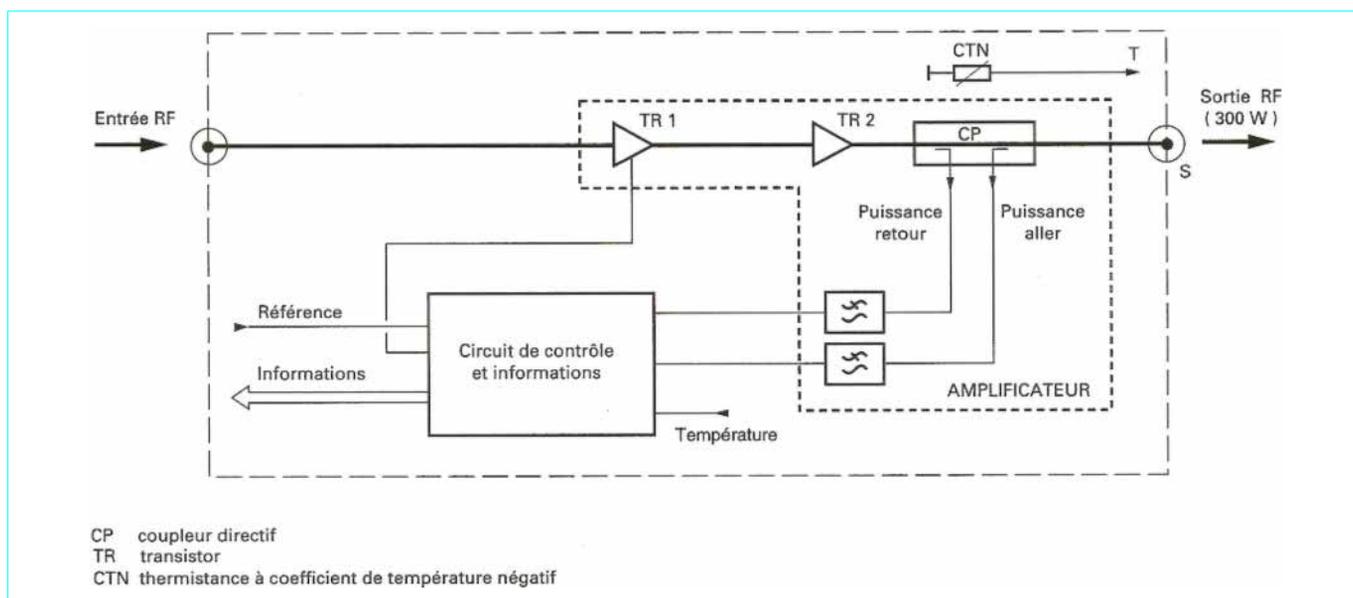


Figure 18 - Amplificateur RF à transistors de 300 W

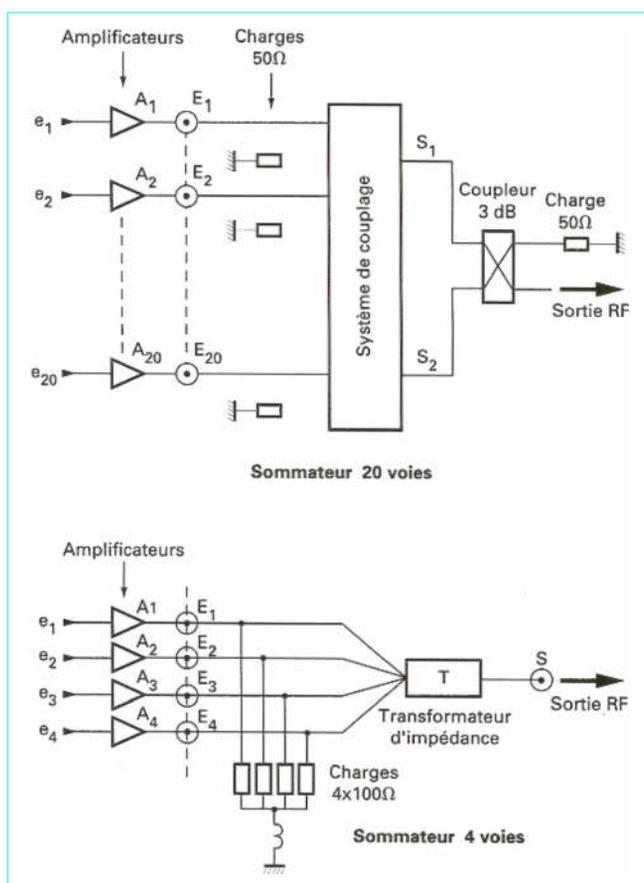


Figure 19 - Systèmes de couplage de puissance RF

4.3 Émetteur 5 kW FM à transistors

L'équipement décrit ci-après à titre d'exemple fait partie d'une nouvelle génération d'émetteurs de radiodiffusion à modulation de fréquence, utilisant les nouvelles techniques de modulation et d'amplification décrites précédemment.

Outre sa constitution redondante, l'émetteur a été conçu en intégrant des nouveaux concepts de diagnostic de panne, dont le but est de faciliter sa maintenance et d'assurer une plus grande disponibilité à l'antenne. Ce critère est essentiel pour l'exploitant, dont une des tâches principales est d'assurer des émissions sans interruption : en radiodiffusion, des nombreuses stations émettent 24 h sur 24.

4.3.1 Description

L'émetteur se présente sous la forme d'une baie de 19" de large, 2 m de hauteur et 1 m de profondeur (figure 20), dans laquelle sont montés ses différents sous-ensembles (figure 21).

■ Pilote modulateur

Il se présente sous la forme d'un tiroir amovible, aux dimensions standards de 19" de large et 14 cm de hauteur. Il génère la porteuse RF modulée pour attaquer l'étage de puissance de l'émetteur. Il comporte deux excursionsmètres et un afficheur alphanumérique permettant le contrôle des principaux paramètres de la modulation.

■ Étage de puissance

L'étage est constitué de 10 amplificateurs de base dont les sorties RF sont couplées à un sommateur de puissance pouvant fournir à l'antenne une puissance de 5 kW.

Les transistors de l'étage de puissance sont protégés, par un dispositif électronique rapide, contre l'énergie réfléchie résultant d'une désadaptation accidentelle de l'antenne. La puissance RF de sortie de l'émetteur est réduite d'une façon automatique en fonction de la puissance réfléchie par l'antenne.

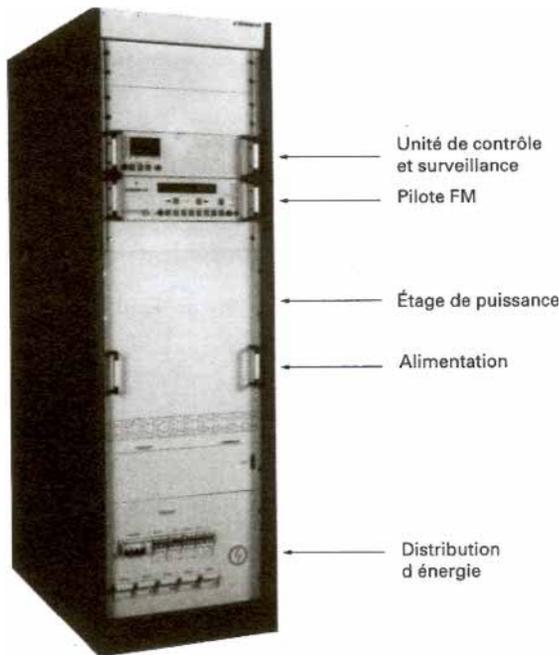


Figure 20 – Émetteur FM 5 kW à transistors : baie

Un passe-bas de puissance en sortie du sommateur filtre les harmoniques de la porteuse RF. Leur niveau, en sortie de l'émetteur, reste inférieur à -80 dB par rapport au niveau de la porteuse.

Les alimentations à découpage secteur, reliées au réseau par un transformateur d'isolement, fournissent l'énergie en courant continu nécessaire à l'étage de puissance. L'émetteur équipé de ce type d'alimentation supporte, sans changement des performances ou baisse de puissance, des réseaux d'alimentation peu stables dont la tension secteur peut varier de $\pm 15\%$.

Les sous-ensembles de puissance défectueux, comme les amplificateurs et les alimentations, peuvent être remplacés sans arrêt de l'émetteur, ce qui facilite sa maintenance.

■ Dispositifs annexes

L'émetteur est équipé d'une unité centrale de contrôle et de diagnostic de panne à microprocesseur. Ce système reçoit les informations analogiques ou d'état de l'étage de puissance de l'émetteur qui, en cas de panne, déclenche les alarmes de défaut. Un afficheur alphanumérique indique les sous-ensembles défectueux, la puissance de sortie de l'émetteur et la puissance réfléchiée par l'antenne. Des accès, *via* les interfaces appropriées, permettent de transmettre les paramètres de fonctionnement ou d'état à une station centrale de surveillance et de recevoir les télécommandes.

L'émetteur comporte un ventilateur assurant le refroidissement des étages de puissance et l'évacuation de l'air chaud vers l'extérieur, par le haut de l'armoire.

L'entrée d'air frais peut s'effectuer par le bas de l'émetteur dans le cas d'une arrivée d'air par un sous-sol technique ou à l'arrière dans le cas d'une prise d'air dans la salle d'émission.

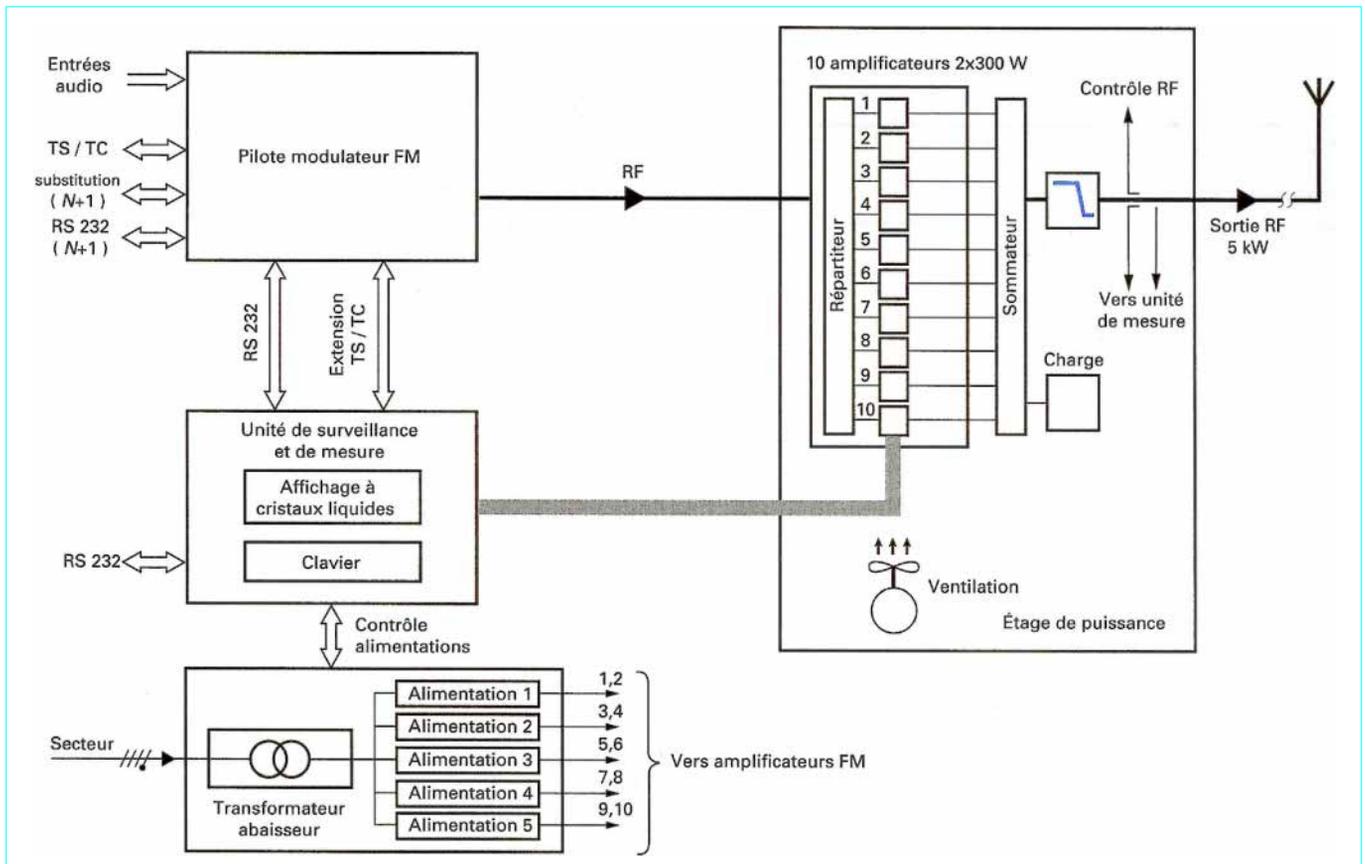


Figure 21 – Émetteur FM 5 kW à transistors : synoptique

4.3.2 Caractéristiques techniques typiques

■ Caractéristiques du signal RF

Puissance de sortie : 5 000 W pour TOS (taux d'ondes stationnaires) < 1,4 (charge 50 Ω).

Bande de fréquence : 87,5 à 108 MHz.

Nombre de fréquences possibles : 20 500 (synthétiseur).

Stabilité de la fréquence : 1×10^{-6} par an.

Excursion nominale : ± 75 kHz.

Capacité de surexcursion : ± 150 kHz.

Modulation d'amplitude résiduelle : ≤ -50 dB (synchrone).

Niveau des harmoniques : ≤ -80 dB par rapport à la porteuse.

■ Après démodulation du signal RF (dans la bande audio 30 Hz à 15 kHz)

Réponse amplitude/fréquence : $\leq \pm 0,2$ dB.

Distorsion harmonique : $\leq 0,15$ % (excursion ± 75 kHz).

Atténuation de diaphonie G/D, D/G : ≥ 45 dB.

Rapport signal sur bruit : ≤ -80 dB efficace (excursion ± 75 kHz).

■ Entrées signaux auxiliaires (dans la bande 53 kHz à 100 kHz)

Réponse amplitude/fréquence : $\leq \pm 0,2$ dB.

■ Caractéristiques générales de l'émetteur

Entrée secteur : 400 V triphasé, ± 15 %.

Consommation : 10 kW pour 5 kW RF à l'antenne.

Ventilation : forcée (ventilateur intégré).

Température de fonctionnement : -10 à $+50$ °C.

■ Entrées de modulation

Séréophoniques : droite et gauche.

Signal monophonique, multiplex et RDS (§ 2.1.3).

L'émetteur est équipé des prises d'accès pour la télécommande et la télésignalisation, de type à boucles ou liaison RS 232 :

— télécommandes : marche, arrêt, mono/stéréophonie, choix MPX 1 ou MPX 2 ;

— télésignalisations : marche, arrêt, mono/stéréophonie, choix MPX 1 ou MPX 2, baisse de puissance supérieure à 3 dB, fonctionnement en local, défaut de ROS, température anormale, défaut d'alimentation.

5. Systèmes auxiliaires

5.1 Antenne d'émission

5.1.1 Généralités

L'antenne d'émission est l'élément effectuant la transition entre une ligne de propagation et l'espace de propagation. L'émetteur FM doit être associé à une antenne ou à un groupement d'antennes afin de rayonner l'énergie RF, sous forme d'ondes électromagnétiques, vers les antennes des récepteurs.

Les principales caractéristiques électriques d'une antenne sont définies par :

- le diagramme de rayonnement ;
- la polarisation ;
- le gain ;
- la bande de fréquence d'émission ;
- l'impédance ;
- la puissance maximale admissible.

La répartition de l'énergie électromagnétique rayonnée dans l'espace est représentée par son diagramme de rayonnement. La figure 22 représente une coupe dans le plan horizontal d'un diagramme typique de rayonnement dans l'espace d'une antenne d'émission FM type double dipôle.

Le gain de l'antenne représente l'accroissement ou la diminution de la densité de puissance rayonnée dans une direction donnée de l'espace par rapport à une antenne de référence placée au même endroit. Généralement cette antenne de référence est un doublet demi-onde. Dans les caractéristiques de l'antenne on exprime son gain maximal, c'est-à-dire dans la direction de son rayonnement maximal.

Le gain peut être aussi exprimé par rapport à l'antenne isotrope. Dans ce cas on effectue la correction suivante :

$$\text{gain antenne/antenne isotrope} = (\text{gain antenne/doublet demi-onde}) + 2,15 \text{ dB}$$

Le niveau relatif 0 dB sur le diagramme unitaire correspond à la direction du champ maximal rayonné par l'antenne.

Dans le cas d'utilisation en émission de puissance, les antennes sont conçues pour supporter des puissances RF importantes, de l'ordre de quelques kilowatts.

La puissance apparente rayonnée par l'antenne, dans une direction donnée de l'espace, est le produit de la puissance de l'émetteur par le gain de l'antenne dans cette direction. Cette puissance détermine le champ dans un point de l'espace libre.

5.1.2 Groupements d'antennes

Dans le cas de couvertures étendues et/ou à forte densité de population (grandes villes), les puissances à rayonner peuvent être très importantes (quelques centaines de kilowatts) afin d'assurer, dans la zone de service, un champ électromagnétique compatible avec une réception de bonne qualité. Par ailleurs, le diagramme de rayonnement de la station d'émission doit être adapté à la zone de service souhaitée. Ces deux contraintes ne peuvent pas toujours être respectées par une seule antenne, des groupements d'antennes doivent alors être réalisés à cet effet.

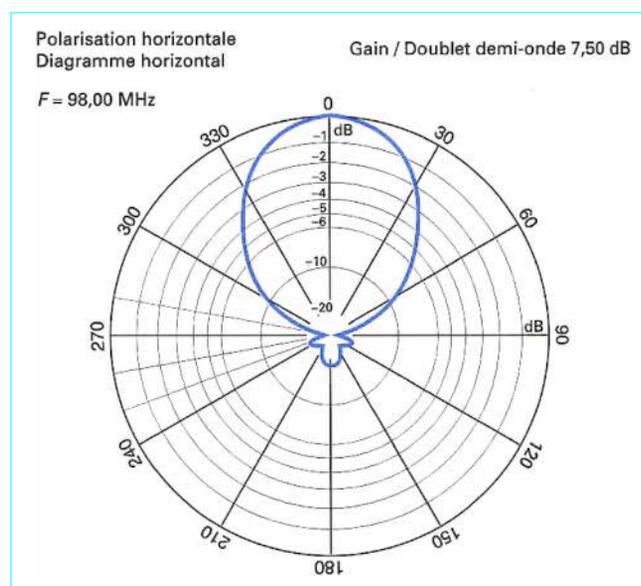


Figure 22 – Diagramme typique de rayonnement d'une antenne d'émission FM double dipôle

À l'aide de répartiteurs de puissance, on distribue la puissance RF en sortie de l'émetteur vers plusieurs antennes couplées de façon à obtenir le diagramme de rayonnement souhaité.

Le champ électrique rayonné en espace libre à grande distance, par le groupement d'antennes, dans une direction donnée, résulte de la somme vectorielle des champs rayonnés par chaque antenne. La figure 23 montre l'exemple d'un diagramme de rayonnement pratiquement omnidirectionnel obtenu en groupant quatre antennes FM double dipôle autour d'un pylône. Une boîte de jonction distribue des puissances identiques et en phase vers les quatre antennes disposées à 90° dans le plan horizontal.

Différentes formes de diagrammes de rayonnement, fonction de la zone de couverture à réaliser, peuvent être obtenues par calcul à l'ordinateur, en faisant varier les paramètres du système d'antennes :

- le nombre d'antennes ;
- la puissance d'attaque de chaque antenne ;
- la phase du signal d'attaque pour chaque antenne ;
- leurs positions géométriques relatives dans l'espace.

Le gain du groupement d'antennes peut être augmenté, afin d'accroître la puissance apparente rayonnée par le système, en couplant des antennes supplémentaires dans le plan vertical. On concentre ainsi l'énergie rayonnée dans le plan vertical, le diagramme vertical devient plus directif.

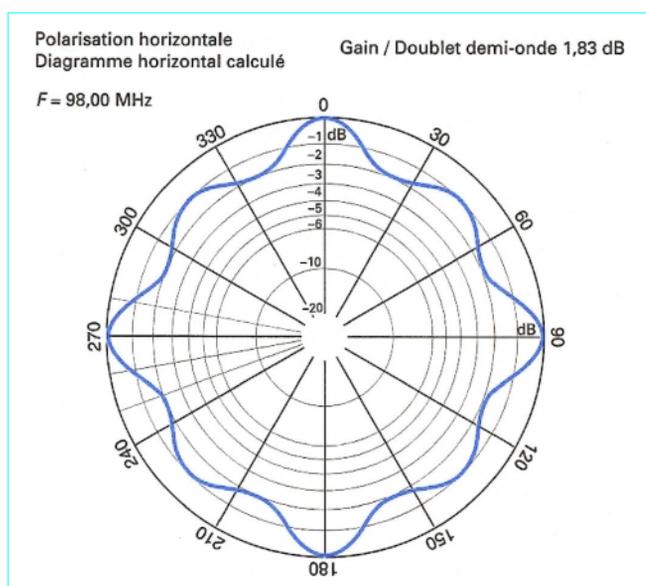


Figure 23 – Diagramme de rayonnement omnidirectionnel d'un groupement de quatre antennes FM double dipôle

5.2 Automatismes de substitution

La conception redondante des éléments de puissance des émetteurs à transistors permet d'assurer leur dépannage ou leur maintenance préventive sans arrêt de l'émission, donc leur procure une meilleure aptitude à être maintenus dans l'état requis pour assurer leur fonction.

Un niveau supérieur de sécurité dans la transmission des programmes peut être obtenu par l'utilisation de deux émetteurs, un des émetteurs étant en fonctionnement sur l'antenne, l'autre en attente. En cas de défaillance de l'émetteur sur antenne, un dispositif électronique de surveillance remplace ce dernier par l'émetteur en attente. Les émetteurs sont dits fonctionner en *réserve passive*.

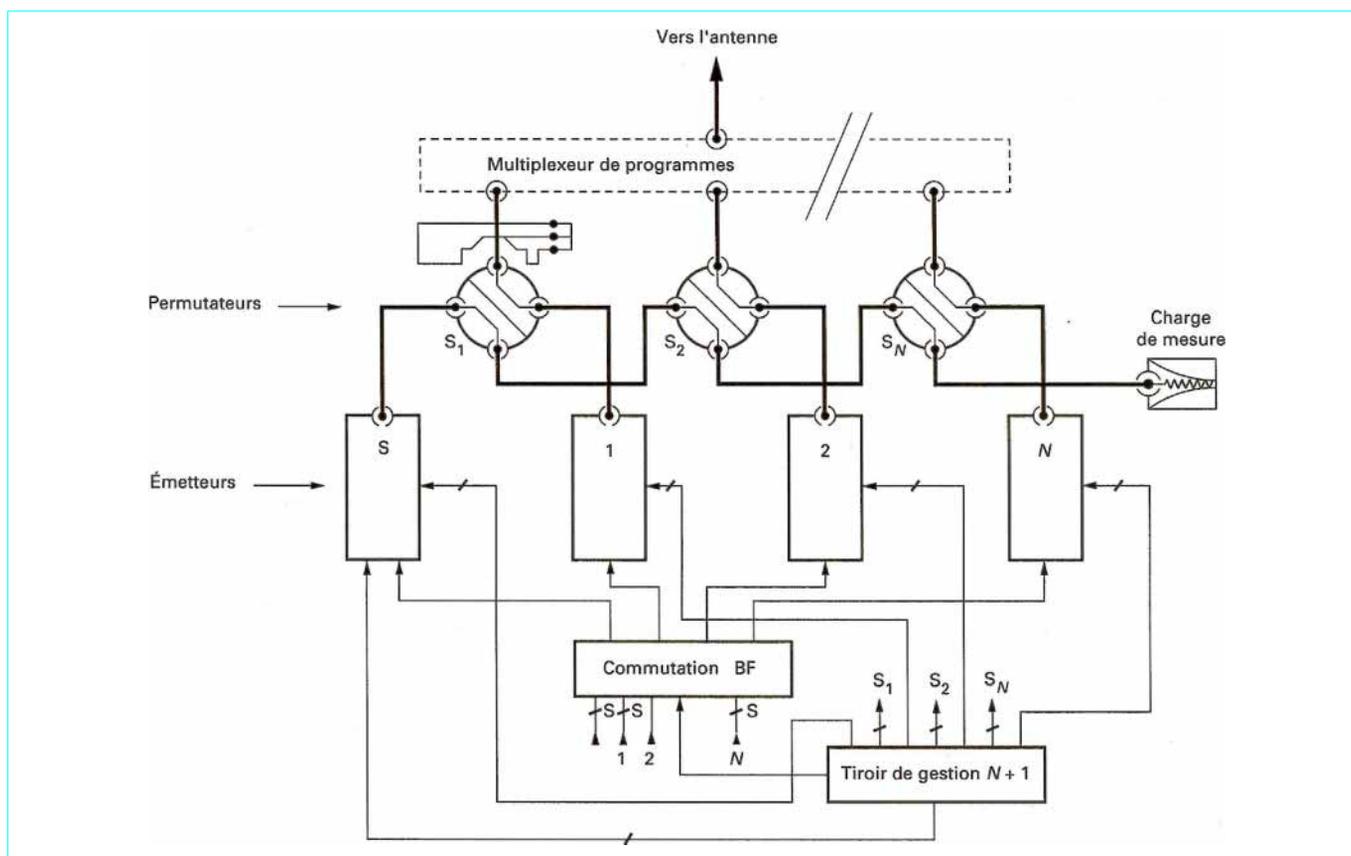
Dans le cas de station comportant plusieurs programmes à substituer, le système peut être rendu plus économique en utilisant un seul émetteur de réserve : les émetteurs fonctionnent en système $N + 1$.

L'émetteur de réserve doit pouvoir se mettre à la fréquence d'un quelconque des émetteurs défaillants. Les émetteurs à transistors, agiles en fréquence et à large bande, sont particulièrement bien adaptés à cette solution.

Le synoptique de la figure 24 montre une station d'émission à trois programmes, constituée par les émetteurs principaux 1, 2 et N et l'émetteur de secours S .

En fonctionnement normal, les relais coaxiaux S_1 , S_2 et S_N connectent les émetteurs 1, 2 et N sur le multiplexeur de programmes, assurant le groupement des trois porteuses RF sur la même antenne. En cas de panne d'un des émetteurs, ce dernier est arrêté, le relais coaxial associé bascule de façon à connecter la sortie RF de l'émetteur de secours à l'entrée RF correspondante du multiplexeur de programmes. L'émetteur de secours est mis en marche. Un système automatique (tiroir de gestion $N + 1$) effectue la surveillance de la station, la commutation des signaux audiofréquences (par le tiroir de commutation BF) sur l'émetteur de secours ainsi que la programmation de sa fréquence : celle de l'émetteur à remplacer.

L'émetteur défaillant est branché sur une charge de mesure afin d'être dépanné.

Figure 24 – Système d'émission $N + 1$

6. Évolution de la radiodiffusion

6.1 Émetteurs FM

■ L'introduction de technologies numériques dans les étages de modulation et de codage comporte de nombreux avantages, entre autres :

- absence de dérives dues à la température ou au vieillissement des composants ;
- diminution du nombre des réglages ;
- facilité de modification par programmation ;
- facilité d'intégration.

■ De nouveaux transistors capables de fournir des puissances plus importantes par boîtier (actuellement 300 W) ont entraîné une montée en puissance des émetteurs à transistors et une diminution des coûts.

La structure redondante de ce type d'amplificateurs, leur facilité de maintenance, leur durée de vie ainsi que la baisse des coûts des transistors amènent les radiodiffuseurs à une utilisation grandissante des émetteurs à transistors par rapport aux émetteurs à tubes.

■ La prolifération des services de radiocommunications dans les mêmes sites d'émission, travaillant dans des bandes de fréquence différentes, conduit les constructeurs à une conception des émetteurs moins perturbante pour leur environnement.

Les réglementations dans le domaine de la compatibilité électromagnétique ont entraîné une diminution des rayonnements électromagnétiques parasites émis par la structure de l'émetteur ainsi qu'une réduction des perturbations injectées dans le réseau d'alimentation.

6.2 Radiodiffusion audionumérique

La technologie des semiconducteurs permet depuis des années l'utilisation de procédés de transmission numérique sur des trajets à faisceaux hertziens, *via* des satellites et par câbles à fibres optiques, mais la largeur de bande importante, c'est-à-dire les besoins énormes en fréquence, ne permettaient pas jusqu'ici de mettre en œuvre des procédés de transmission numérique pour la diffusion terrestre des programmes radio.

Grâce à des méthodes modernes de codage, il est possible aujourd'hui de réduire considérablement la quantité de données à transmettre. Pour les disques compacts (CD), le débit de 1 411 kbit/s nécessaire pour un signal stéréo peut être réduit à 192 kbit/s, soit environ dans un rapport de 7.

Le passage à l'ère numérique pour la radiodiffusion est en cours. Le nouveau procédé technique s'appelle *Digital Audio Broadcasting* (DAB). Ce procédé, mis au point dans le cadre d'un projet Euréka, offre des avantages déterminants par rapport à la modulation de fréquence habituelle. Après une première période en parallèle, le DAB devrait à terme remplacer le système à modulation de fréquence actuel.

Émetteurs FM

par **Mariano DOMINGUEZ**

*Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de l'Électronique et de ses Applications (ENSEA)
Responsable Produits FM à Thomson-LGT*

Bibliographie

BENSOUSSAN (D.). – *La modulation. Principes et modes*. Modules Teccart communication (1980).

MARCUS (J.). – *La modulation de fréquence. Théorie et applications industrielles*. Eyrolles (1960).

Normalisation

Comité Consultatif des Radiocommunications (CCIR)

Recommandation 643-1 (1986-1990). – Système destiné à l'accord automatique ainsi qu'à d'autres fonctions dans les récepteurs de radiodiffusion MF et utilisable avec le système de fréquence pilote.

Recommandation 412-5 (1956-1990). – Normes de planification pour la radiodiffusion sonore à modulation de fréquence en ondes métriques.

Recommandation 638 (1990). – Termes et définitions utilisés dans la planification des fréquences pour la radiodiffusion sonore et télévisuelle.

Annexe I de la Recommandation 641 (1986). – Mesure objective à deux signaux pour des normes d'émission faisant appel à une déviation de fréquence maximale de ± 75 kHz et à une préaccentuation de 50 μ s.

Principaux constructeurs d'émetteurs FM

Europe

Thomcast
Rhode & Schwartz
Telefunken
Marconi
Itelco

Amérique du Nord

Harris
BE

Asie

NEC