

DANIEL MAIGNAN

## **LA MODULATION DE FRÉQUENCE**



# SOMMAIRE

## PARTIE 1 : HISTOIRE ET TECHNIQUE

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 1- L'HISTOIRE DE LA MODULATION DE FRÉQUENCE .....                | 15 |
| Les débuts .....                                                 | 16 |
| La haute-fidélité .....                                          | 16 |
| Les origines .....                                               | 17 |
| Edwin H. Armstrong .....                                         | 18 |
| Encadré 1 : Les débuts de la FM en Allemagne .....               | 19 |
| La FM en France dans les années 50 .....                         | 20 |
| Encadré 2 : Les bandes de fréquence en radiodiffusion .....      | 22 |
| 2 - PRINCIPES DE LA MODULATION DE FRÉQUENCE .....                | 23 |
| 1) Généralités .....                                             | 23 |
| 2) Avantages de la modulation de fréquence .....                 | 25 |
| 3) Inconvénients de la modulation de fréquence .....             | 26 |
| 4) Génération de la modulation de fréquence .....                | 27 |
| a) Le microphone électrostatique .....                           | 27 |
| b) Le tube à glissement .....                                    | 27 |
| c) Le modulateur à réactance .....                               | 27 |
| d) Le modulateur avec diode à capacité variable ou varicap ..... | 28 |
| 5) Préaccentuation et désaccentuation du signal BF .....         | 29 |
| 6) Les émetteurs .....                                           | 30 |
| 7) Principe et théorie de la modulation de fréquence .....       | 32 |
| a) Représentation vectorielle d'une fonction sinusoïdale .....   | 32 |
| b) Expression mathématique de la fréquence instantanée .....     | 32 |
| c) Largeur de bande occupée .....                                | 34 |
| d) Le bruit en FM .....                                          | 36 |
| 3 - LES RÉCEPTEURS POUR LA MODULATION DE FRÉQUENCE .....         | 37 |
| 1) Notions de bruit dans les récepteurs .....                    | 37 |
| a) Origines du bruit .....                                       | 37 |
| b) Bruits à l'entrée du récepteur .....                          | 37 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Encadré 3 : Incidence du bruit dans la conception des récepteurs .....                | 38 |
| a) Bruit généré par les composants du récepteur .....                                 | 38 |
| b) Le rapport signal sur bruit R et le facteur de bruit F .....                       | 38 |
| c) Mesure et expression du rapport signal sur bruit .....                             | 39 |
| 2) Organisation générale d'un récepteur FM .....                                      | 39 |
| a) Fréquence intermédiaire (FI) et fréquence image ou conjuguée .....                 | 40 |
| b) L'amplificateur à fréquence intermédiaire, le<br>limiteur et le démodulateur ..... | 41 |
| c) Décodage stéréo, compensations et contrôles .....                                  | 41 |
| d) L'évolution .....                                                                  | 41 |
| e) Les tuners .....                                                                   | 41 |
| f) Les postes AM/FM .....                                                             | 42 |
| 4- LES ÉTAGES AMPLIFICATEURS HF .....                                                 | 47 |
| 1) Les étages d'entrée et changeur de fréquence à tubes .....                         | 47 |
| Encadré 4 : Les tubes à grille cadre .....                                            | 50 |
| 2) Les circuits d'entrée et changeurs à transistors .....                             | 52 |
| Encadré 5 : Notions fondamentales sur les transformateurs HF .....                    | 57 |
| a) Le couplage .....                                                                  | 57 |
| b) La sélectivité .....                                                               | 58 |
| c) L'amortissement .....                                                              | 59 |
| d) Recherche du format idéal de bande passante .....                                  | 59 |
| 3) L'amplificateur du signal de fréquence intermédiaire .....                         | 61 |
| a) Les amplificateurs FI à tubes .....                                                | 61 |
| b) Les amplificateurs FI à transistors .....                                          | 63 |
| c) L'étage limiteur d'amplitude .....                                                 | 64 |
| Appendice : Les résonateurs et filtres céramique .....                                | 68 |
| a) Introduction .....                                                                 | 68 |
| b) Les matériaux piézoélectriques .....                                               | 69 |
| c) Les céramiques .....                                                               | 69 |
| d) Modes de vibration .....                                                           | 69 |
| e) Symboles, circuit équivalent, caractérisation .....                                | 70 |
| f) Terminologie .....                                                                 | 70 |
| g) Impédances .....                                                                   | 71 |
| h) Group Delay Time .....                                                             | 71 |
| i) Réponses parasites .....                                                           | 72 |
| j) Utilisation et performances des filtres actuels .....                              | 72 |
| 5 - L'ÉTAGE DÉMODULATEUR .....                                                        | 74 |
| 1) Démodulation par circuit accordé .....                                             | 74 |

|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2) Le discriminateur de Travis .....                                            | 76         |
| 3) Démodulateur à déphasage (ou de Foster-Seeley) .....                         | 77         |
| Encadré 6 : Fonctionnement du discriminateur de Foster-Seeley .....             | 78         |
| 4) Le détecteur de rapport .....                                                | 81         |
| Encadré 7 : Fonctionnement du détecteur de rapport .....                        | 83         |
| 5) Le démodulateur à comptage d'impulsions .....                                | 85         |
| 6) Les démodulateurs numériques .....                                           | 86         |
| 7) Les démodulateurs à quadrature .....                                         | 87         |
| <b>6 - LES DISPOSITIFS ANNEXES .....</b>                                        | <b>91</b>  |
| 1) La CAG, la CAF et l'indication de l'accord .....                             | 92         |
| 2) Indicateurs d'accord et de niveau dans<br>les récepteurs à transistors ..... | 104        |
| <b>7- L'AMPLIFICATION BF DANS LES RÉCEPTEURS FM .....</b>                       | <b>106</b> |
| 1) Les différents étages d'amplification .....                                  | 106        |
| 2) La désaccentuation .....                                                     | 107        |
| 3) Critères importants pour l'amplificateur BF d'une chaîne FM .....            | 107        |
| 4) Le comportement en régimes transitoires d'un amplificateur .....             | 107        |
| 5) Les essais d'un amplificateur avec des signaux rectangulaires .....          | 108        |
| 6) Les courbes isophoniques .....                                               | 109        |
| 7) La puissance d'audition nécessaire et la distorsion .....                    | 110        |
| 8) Puissance moyenne et puissance instantanée .....                             | 111        |
| 9) Le bruit .....                                                               | 112        |
| 10) Les haut-parleurs .....                                                     | 112        |
| 11) Perfectionnements .....                                                     | 113        |
| 12) Conclusions .....                                                           | 117        |

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>PARTIE 2 : GENÈSE, CODAGE, MESURES, ANTENNES .....</b>          | <b>119</b> |
| <b>8 - GENÈSE DE LA STÉRÉOPHONIE, LE PROCÉDÉ ZENITH-GECO .....</b> | <b>120</b> |
| 1) Les conditions pour obtenir une audition en relief .....        | 121        |
| 2) Les premiers essais .....                                       | 121        |
| 3) Les effets binauriculaires et stéréophoniques .....             | 124        |
| 4) Une version simplifiée de diffusion en relief .....             | 125        |
| 5) Les émissions en relief sonore aux USA .....                    | 126        |
| 6) La pseudo stéréophonie .....                                    | 128        |
| 7) La stéréo avec un seul émetteur .....                           | 129        |
| 8) Le procédé Halstead .....                                       | 130        |
| 9) Le procédé Crosby ou système à matrice .....                    | 132        |
| Encadré 8: Les émissions stéréo en France en 1962 .....            | 134        |
| 10) Le procédé français .....                                      | 135        |
| 11) Le procédé somme - différence .....                            | 135        |
| 12) Vers une standardisation du procédé .....                      | 136        |
| 13) Adoption du procédé à fréquence pilote .....                   | 136        |
| Encadré 9 : Expression mathématique du signal composite .....      | 137        |
| <b>9 - GÉNÉRATION DE LA STÉRÉOPHONIE .....</b>                     | <b>138</b> |
| 1) Formation du signal $S = G - D$ .....                           | 139        |
| 2) Le signal pilote .....                                          | 139        |
| 3) La modulation AM de la sous-porteuse 38 kHz .....               | 139        |
| 4) Spectre du signal multiplex .....                               | 140        |
| <b>10 - LE DÉCODAGE DE LA STÉRÉOPHONIE .....</b>                   | <b>143</b> |
| 1) Les adaptateurs FM .....                                        | 147        |
| a) L'adaptateur MX101 Crosby .....                                 | 147        |
| b) Un adaptateur à transistors .....                               | 148        |
| c) L'adaptateur allemand Graetz .....                              | 149        |
| 2) Le tuner Grundig AM/FM RT50 de 1964 .....                       | 151        |

|                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------|------------|
| 3) Les modules décodeur .....                                       | 143        |
| a) Le module décodeur Cicor (1966) .....                            | 153        |
| b) Le module décodeur stéréo Görler .....                           | 154        |
| 4) Les modules intégrés .....                                       | 155        |
| a) Le circuit MC1310P .....                                         | 155        |
| b) Le TCA4500A .....                                                | 157        |
| c) Le TDA1578A .....                                                | 159        |
| <b>11 - LE RDS (RADIO DATA SYSTEM) .....</b>                        | <b>160</b> |
| 1) Présentation du procédé .....                                    | 160        |
| 2) Définition du RDS .....                                          | 160        |
| 3) L'utilité du RDS .....                                           | 161        |
| Détail des principaux services .....                                | 162        |
| a) PI (Program Identification) et ECC (Extended Country Code) ..... | 162        |
| b) PS (Program Service) .....                                       | 162        |
| c) AF (Alternative Frequencies) .....                               | 162        |
| d) TP (Traffic Program) / TA (Traffic Announcement) .....           | 163        |
| e) ON (Other Networks) .....                                        | 163        |
| f) CT (Clock Time and date) .....                                   | 163        |
| g) PTY (Program Type) et PTYN (Program Type Name) .....             | 163        |
| h) RT (Radio Text) .....                                            | 163        |
| i) RT+ .....                                                        | 164        |
| j) TMC (Traffic Message Channel) .....                              | 164        |
| k) EON (Enhanced Other Networks) .....                              | 164        |
| 4) Autres services : .....                                          | 164        |
| a) La radiomessagerie .....                                         | 164        |
| b) Abris bus et trafic .....                                        | 164        |
| 5) La technique mise en œuvre pour la modulation: .....             | 165        |
| Encadré 10: Le signal biphase .....                                 | 166        |
| 6) Structure de la trame RDS, flot des données .....                | 168        |
| Détails du groupe de type 0A .....                                  | 171        |
| 7) Les décodeurs RDS et les récepteurs .....                        | 172        |
| <b>12 - DES TUBES AUX PUCES .....</b>                               | <b>173</b> |
| 1) Les débuts avec les tubes .....                                  | 173        |
| 2) Les indicateurs visuels .....                                    | 179        |

|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| 3) Les semi-conducteurs discrets .....                               | 181        |
| 4) Les puces .....                                                   | 182        |
| <b>13 - RÉCEPTEURS ET TUNERS AU LABORATOIRE .....</b>                | <b>187</b> |
| 1) Le bruit dans les récepteurs .....                                | 187        |
| 2) Rappels : rapport signal sur bruit R et facteur de bruit F .....  | 188        |
| 3) Les causes de la dégradation de la réception en FM .....          | 188        |
| a) Effet du bruit .....                                              | 188        |
| b) Les interférences d'une autre station sur la même fréquence ..... | 190        |
| c) Les interférences dues aux signaux sur les canaux adjacents ..... | 190        |
| d) Les signaux indésirables .....                                    | 190        |
| e) La stabilité de l'accord .....                                    | 190        |
| f) Le multi trajet .....                                             | 190        |
| 4) Tests de performances .....                                       | 191        |
| a) Le rapport signal/bruit .....                                     | 191        |
| b) Le rapport SINAD .....                                            | 191        |
| c) La mesure de la sensibilité limitée par le bruit .....            | 193        |
| d) La sélectivité .....                                              | 193        |
| e) Réponses parasites .....                                          | 194        |
| f) Rapport de capture .....                                          | 195        |
| g) Seuil de limitation à -3dB .....                                  | 195        |
| h) Réponse amplitude/fréquence .....                                 | 195        |
| <b>14 - LES LIGNES ET LES ANTENNES .....</b>                         | <b>196</b> |
| 1) Les descentes d'antenne et leur impédance caractéristique .....   | 196        |
| Encadré 11 : Adaptation des impédances .....                         | 198        |
| 2) Les antennes accordées .....                                      | 198        |
| 3) Résistance de rayonnement et impédance d'une antenne .....        | 199        |
| 4) Description d'antennes simples .....                              | 200        |
| 5) L'antenne à plan de sol (ground plane) .....                      | 202        |
| 6) La symétrisation d'une antenne .....                              | 203        |



## PARTIE I

### **HISTOIRE ET TECHNIQUE**

## 1- L'HISTOIRE DE LA MODULATION DE FRÉQUENCE

### Les débuts :

Dès le milieu des années 50, les constructeurs ont compris l'intérêt commercial qu'ils pourraient tirer de cette nouvelle technique, en rivalisant de technicité, d'astuces et de fonctionnalités nouvelles, toutes au service de la fidélité de la reproduction sonore.

Ainsi, des postes magnifiques sont apparus, proposant le sommet de l'art en matière de T.S.F. à tubes : cadrans spécifiques pour l'AM et pour la FM, réglages séparés des graves et des aigus, clavier à touches d'ambiances sonores (musique, parole, jazz, concert, Hifi, stéréo, etc.), Contrôle Automatique de Fréquence (C.A.F.), recherche automatique de stations par motorisation, double indicateur d'accord, télécommande à fil et autres innovations dont certaines sont à l'origine de la radio FM actuelle (figure 1-1-1).

### La haute-fidélité :

Par ailleurs, l'ébénisterie de ces postes commença à prendre en compte un paramètre peu sensible auparavant : l'acoustique. Les haut-parleurs se spécialisèrent dans des bandes de fréquence et les tweeters firent leur apparition, donnant un ciselé et une fidélité remarquables aux messages sonores reçus. Les constructeurs maîtrisèrent les vibrations, renforcèrent les caissons de bois recevant les châssis et certains cloisonnèrent l'espace dédié aux haut-parleurs pour en maîtriser les réactions. La haute-fidélité radiophonique était née...

Grande époque où les récepteurs « monumentaux » se pressaient dans les catalogues des constructeurs et intégraient un tourne-disque (avec changeur automatique), un magnétophone à bande, deux amplificateurs (la stéréophonie existait déjà avec l'avènement du microsillon), des tiroirs annexes et des unités de rangement de disques de 30 cm (figure 1-1-2). Ajoutons à cela le design avant-gardiste des latins des années 60 ou celui massif et

Figure 1-1-1



conservateur des productions germaniques et nous aurons tracé le pan de l'histoire qui nous intéresse ici.

Ensuite, le transistor est arrivé en force...

### Les origines :

Savez-vous que la modulation de fréquence a été inventée en même temps que la modulation d'amplitude ?

Les premières liaisons radioélectriques qui eurent lieu en 1920 furent effectuées en utilisant un arc électrique que l'on appelait l'arc chantant, car les trains d'ondes amorties étaient produits à une fréquence entre 400 et 1200 cycles par seconde (on dit Hertz de nos jours).

Les postes comprenaient essentiellement deux puissants électroaimants disposés perpendiculairement de part et d'autre pour contrôler la trajectoire de l'arc entre les électrodes, deux selfs protégeant la génératrice contre les surtensions, un circuit oscillant (self et condensateur), une antenne et une prise de terre.

La première utilisation de la modulation de fréquence remonte à 1912. En télégraphie, on faisait des signaux Morse en modifiant la fréquence d'accord par court-circuit d'une partie de la self. Le procédé avait pour avantage d'éviter une variation brusque de la puissance de l'émetteur pendant la manipulation. Plus tard, ce procédé a été nommé « télégraphie par déplacement de fréquence », le FSK (en anglais : Frequency Shift Keying).

En téléphonie, dans les postes à arc du type Poulsen, on plaça un micro à charbon dans le circuit oscillant. Or, en connectant une résistance aux bornes d'une self, la valeur apparente de celle-ci est d'autant plus diminuée que la résistance est faible.

Le micro à charbon agissant comme une résistance variable, on avait comme résultat une self qui variait sensiblement au rythme de la modulation !

Rendons-nous à l'évidence : la modulation obtenue était bien un mélange de modulation d'amplitude et de modulation de fréquence...

Un peu plus tard, en 1922, le procédé suivant fut imaginé pour réaliser des transmissions

téléphoniques dans une bande de fréquence réduite : l'onde porteuse, sur une fréquence de 200 kHz par exemple, était modulée par un signal BF de fréquence 5 kHz avec un déplacement de la fréquence fondamentale (excursion) égal à 1 kHz. Cela devait donner, en décomposant le processus, une onde dont la fréquence variait de 199 à 201 kHz à une vitesse égale à 5000 variations par seconde.

L'« astuce » recherchée consistait à transmettre un signal BF utile de fréquence égale à 5 kHz dans une bande réduite de 199 à 201 kHz, soit égale à 2 kHz, alors que

Figure 1-1-2





la même opération en modulation d'amplitude aurait occupé une bande de 195 à 205 kHz, soit 10 kHz. Ce raisonnement semblait inattaquable et était préconisé à l'époque pour réduire l'encombrement des bandes de fréquences (déjà !). Seulement voilà, bien que séduisant, il était totalement erroné, car, en effet, lorsqu'on fait varier la fréquence d'une onde sinusoïdale pure, celle-ci n'est plus sinusoïdale. C'est le physicien Joseph Fourier qui a démontré au 19<sup>ème</sup> siècle que tout phénomène vibratoire non sinusoïdal peut se décomposer en une somme de sinusoïdes pures dont la première est à la fréquence fondamentale  $F_0$  et les suivantes des multiples exacts de la fondamentale, soit  $2F_0$ ,  $3F_0$ ,  $4F_0$ ,  $5F_0$  etc. Cela explique pourquoi les premières tentatives d'émission en modulation de fréquence n'ont été suivies d'aucune application, car beaucoup plus « gourmandes » en occupation spectrale que les émissions en AM...

Et de longues années s'écoulèrent...

#### Edwin H. Armstrong :

Ce n'est que beaucoup plus tard, en 1936, que l'ingénieur américain Edwin H. Armstrong (figure 1-1-3) publia sa principale communication sur la modulation de fréquence.

L'objectif que désirait atteindre E.H. Armstrong était double :

- éliminer l'influence des parasites atmosphériques et industriels qui perturbent malheureusement la modulation d'amplitude.
- réduire les interférences entre les stations, en d'autres termes, supprimer les battements qui produisent les sifflements et les grognements intempestifs bien connus lors de la réception d'émissions modulées en amplitude. Toutes ces interférences se traduisent en effet par des signaux modulés en amplitude et il devient très difficile de faire le tri entre les signaux utiles et les signaux indésirables.

Pour pouvoir s'affranchir de ces perturbations, il fallait moduler l'onde porteuse en agissant sur un autre paramètre que l'amplitude de cette porteuse. On avait le choix entre la fréquence ou la phase.

L'ingénieur américain démontra que le procédé ne présentait un intérêt que si la variation était très grande, ce qui allait totalement à l'encontre de la théorie de 1922.

Pour pouvoir obtenir une grande variation de fréquence, il faut que la fréquence de l'onde porteuse soit élevée, car la bande occupée est donc nécessairement large. C'est la raison pour laquelle on ne peut guère utiliser la modulation de fréquence dans la gamme des ondes habituellement dédiées à l'AM, comme les ondes longues ou les ondes moyennes, par exemple.

Sinon, très peu de canaux pourraient cohabiter !

Les émissions en FM débutèrent quelques années après la 2<sup>ème</sup> Guerre Mondiale.

A la fin de la guerre, l'Allemagne était totalement détruite et lorsque la paix revint, plus un seul émetteur de radiodiffusion n'était opérationnel dans ce pays.



Figure 1-1-3

La reconstruction de cet outil indispensable à la communication de masse était donc une priorité absolue.

Lors de la signature de l'Armistice, un article privait l'Allemagne des fréquences en ondes moyennes pour la modulation d'amplitude. Les vainqueurs avaient sans doute conclu que la portée de la FM ne permettrait pas à l'Allemagne de se réaffirmer sur les ondes et avaient probablement jugé que la sanction de privation de l'AM serait suffisante.

Mais à cette époque, la FM étant prête à l'industrialisation, cette technique l'emporta Outre-Rhin. En quelques années l'Allemagne devint à la fois le premier pays à diffuser la majorité de ses programmes radios en FM et aussi, par voie de conséquence, le pays expert dans cette technique. De grands constructeurs prirent une place de choix dans le monde, en fabriquant des émetteurs et des antennes d'émission FM, dix ans avant tous les autres !

Du côté des récepteurs, les constructeurs connus de l'époque (Philips en tête) rechignaient à fabriquer des postes de radio pour les allemands : la plaie était encore trop vive. C'est ainsi que Telefunken, Grundig et quelques autres saisirent un marché qui devait ensuite s'étendre dans toute l'Europe.

#### LES DÉBUTS DE LA MODULATION DE FRÉQUENCE EN ALLEMAGNE :

Il est indéniable que l'Allemagne s'est lancée la première en Europe dans l'aventure de la modulation de fréquence à la fin des années quarante, car elle ne possédait plus de fréquences AM en ondes moyennes. Pourtant, si on en croit certaines publications de l'époque, celle-ci n'avait pas une bonne presse. Par exemple, aux USA, la modulation de fréquence était déjà connue depuis une dizaine d'années mais, en 1952, seulement 5 % des récepteurs étaient équipés pour recevoir cette bande.

En Angleterre, une maison renommée comme PYE (Electronique de télécommunication haut de gamme) restait très sceptique quant à l'avenir de cette nouvelle technique de radiophonie et recommandait au gouvernement de bien étudier la chose avant de se lancer dans l'établissement d'un réseau FM.

En Allemagne, la situation était différente, car avec la fin de la guerre en 1945, le pays n'avait plus d'émetteurs, mais ce qui pesait encore plus lourd, c'était que le pays ne disposait plus de fréquences dans les bandes moyennes et longues, les forces alliées les ayant toutes réquisitionnées...

Ceci explique pourquoi le gouvernement misa totalement sur la modulation de fréquence.

Il faut aussi mentionner les raisons pour lesquelles la modulation de fréquence n'avait pas encore réussi à percer dans les autres pays qui avaient pourtant déjà réalisé des expériences avec cette nouvelle technique de modulation.

Il semble que l'échec fut imputable à une mauvaise vision de l'exploitation des possibilités du procédé, car en effet, vouloir diffuser des programmes AM limités à une bande passante de 4,5 kHz sur des émetteurs FM, c'était vraiment réduire à une portion congrue les avantages de ce nouveau système ! Les sans-filistes attendaient de la FM autre chose que ce qu'ils pouvaient déjà entendre sur les ondes moyennes et longues.

Mais revenons à l'Allemagne. Ce sont donc des raisons politiques qui l'obligèrent à chercher son salut dans la modulation de fréquence. Avec des possibilités économiques très restreintes, il n'était pas question de fabriquer des appareils incluant la bande de fréquence FM. Alors, les fabricants de radios ont lancé des petits blocs de conversion FM pouvant s'ajouter aux récepteurs existants au travers d'un simple raccordement sur l'entrée PU.

Les constructeurs proposèrent d'abord de simples modules employant la technique de détection à superréaction, puis développèrent des composants spécialisés permettant d'aborder des récepteurs FM superhétérodynes dont la qualité de conception et de fabrication s'améliora très rapidement.

La firme allemande Görler, pour ne citer qu'elle, fit figure de pionnière dans ce domaine et connut un succès commercial indéniable. Il fallut quelques années aux autres constructeurs pour prendre conscience de la réalité économique de cette technique et réagir en conséquence, car la FM avait bel et bien séduit le monde.



Figure 1-1-4

### La FM en France dans les années 50 :

En France, la FM débute concrètement fin 1953 avec l'installation d'une nouvelle station de 15 kW sur 96,1 MHz à Paris rue de Grenelle qui remplace un émetteur expérimental sur 99 MHz, déjà installé au même endroit. La nouvelle fréquence est plus basse afin que l'harmonique 2 ne vienne pas brouiller la télévision. Un programme spécial FM est diffusé aux heures de grande écoute entre 18 et 23 heures et le reste du temps c'est le programme de Paris IV.

Au dire des spécialistes, la Tour Eiffel aurait sans doute été un endroit plus propice !

Après ce premier pas dans la réalisation du vaste plan qui doit doter la France d'un réseau complet FM, d'autres émetteurs sont prévus, avec en premier lieu, l'érection des stations de Strasbourg et Nancy.

A la fin des années 50, le réseau français est en plein essor. Le premier émetteur de 12 kW est installé sur la Tour Eiffel en 1959 (figure 1-1-4).

Ces émissions s'effectuant en ondes très courtes, la propagation a lieu essentiellement par l'onde de sol, en rayonnement direct (les ondes qui se dirigent vers l'ionosphère ne sont pas ou peu réfléchies).

C'est la raison pour laquelle les antennes sont toujours installées sur des points hauts, comme pour la télévision. Ainsi le réseau FM bénéficia des mêmes sites d'installation. Alors que les câbles de la modulation n'étaient pas toujours de qualité suffisante pour véhiculer un signal à haute fidélité, les émetteurs transmettent au début la modulation de la télévision, faute de programme, avec le son de la première chaîne ou de la deuxième chaîne. Seuls quelques-uns transmettent le programme spécial FM.

Le tableau 1-1-1 donne un aperçu de l'état du réseau français en 1958.

Tableau 1-1-1

Jusqu'au début des années 60, les français semblent « boudier » la FM, à en croire un article paru dans Radio-Constructeur de novembre 1961 (voir la figure 1-1-5), et la bande reste limitée, de 88 à 100,5 MHz, alors qu'elle s'étend déjà de 88 à 108 MHz chez la plupart de nos voisins. La limite haute est passée ensuite à 104 MHz, puis à 106 MHz pour s'étendre de nos jours de 87,5 à 108 MHz. Mais le CSA ne distribue aucune fréquence inférieure à 87,6 MHz ni supérieure à 107,9 MHz.

Pour la réception, cette gamme faisant partie du domaine des THF (on dit aussi OTC pour Ondes Très Courtes ou VHF, de l'anglais Very High Frequency), il

| Emetteurs                   | Fréquences en Mc/s | Puissance en kW |
|-----------------------------|--------------------|-----------------|
| Lille ....                  | 92,2               | 2               |
|                             | 87,8               | 12              |
| Caen ....                   | 91,5               | 12              |
|                             | 95,6               | 12              |
| Paris ...                   | 96,1               | 5               |
| Luttange ..                 | 89,7               | 12              |
| (Metz) ..                   | 93,3               | 12              |
| Nancy ...                   | 96,9               | 0,25            |
| Strasbourg                  | 95                 | 2               |
| Mulhouse.                   | 91,1               | 12              |
|                             | 88                 | 2               |
| Dijon ...                   | 95,8               | 2               |
|                             | 89,4               | 12              |
| Bourges ..                  | 93                 | 12              |
| Mont-Pilat ..               | 92,7               | 12              |
| Bordeaux.                   | 98,1               | 0,25            |
| Toulouse.                   | 91,5               | 0,25            |
| Marseille.                  | 95,4               | 12              |
| Pic du Midi ..              | 87,9               | 2               |
| Réseau FM en France en 1958 |                    |                 |

était indispensable d'améliorer les performances en fréquence des tubes électroniques de réception.

On pouvait bien sûr employer la détectrice à superréaction. Malheureusement, en dehors de sa simplicité, ce montage présentait de nombreux inconvénients, telle la difficulté du réglage de l'accord accompagnée d'une distorsion audio importante, ce qui s'accorde mal avec la qualité attendue de la FM.

Cependant, à titre expérimental, cette technique de réception fut largement employée par les amateurs au début, mais depuis bien longtemps, tous les récepteurs sont à changement de fréquence.

Lorsque la modulation de fréquence a effectivement démarré en France, on a d'abord développé des adaptateurs qui se branchaient sur l'entrée PU des postes à modulation d'amplitude existants, puis avec l'apparition de la stéréophonie, sur les deux entrées d'un amplificateur BF.

C'est à ce moment-là que le mot anglais « tuner » est apparu pour dénommer ce dispositif. Aujourd'hui, par extension, ce mot tend à désigner un récepteur complet AM/FM ou FM.

Comme il fallait profiter de l'amélioration de la qualité de l'audition due à ce nouveau mode de radiodiffusion, les amplificateurs basse fréquence ont été encore perfectionnés. En France, il semble bien que la modulation d'amplitude ait pris un coup de vieux depuis la libéralisation de la bande FM en 1981 et après le développement des grands réseaux nationaux et périphériques en FM dans les années quatre-vingt-dix. Mais encore aujourd'hui, les Grandes Ondes gardent la préférence, lorsque c'est encore possible, ou par habitude, des français qui écoutent la première radio de France. N'êtes-vous pas contraints, encore aujourd'hui de basculer votre autoradio en GO dans les zones mal desservies ?

Mais domestiquer des ondes de l'ordre de 100 MHz n'a rien de comparable avec les habitudes pratiquées par les techniciens de la T.S.F. traditionnelle de l'époque. L'instrumentation, les procédés, les composants mis en œuvre et même les habitudes de travail sont radicalement différents... comme les prochains volets de cet ouvrage le montreront. Pour le diffuseur ou l'auditeur, comme pour le radioélectricien, la FM est aussi un autre monde.

## LES FRANÇAIS CONTINUENT A BOUDER LA FM et pourtant

Les statistiques portant sur la production des radio-récepteurs en 1960 confirment éloquentement ce que nous savions déjà : le public boude un peu la modulation de fréquence.

Il a été vendu, en France, l'année dernière, 1564 291 récepteurs portatifs à transistors, et 449 893 récepteurs d'appartement à tubes. En regard de ces deux chiffres on relève que seuls 38 136 appareils récepteurs pour la FM ont trouvé acquéreurs !

Pourtant ni la R.T.F. ni les constructeurs n'ont ménagé leurs efforts. L'implantation des émetteurs FM se poursuit méthodiquement, et la gamme des récepteurs FM est aussi variée que possible. Alors ?

Un constructeur nous a dit que la modulation de fréquence « prendra » en France lorsque Radio-Luxembourg et Europe n° 1 s'y mettront (ce qui est techniquement impossible en l'état actuel de la législation sur le monopole de la R.T.F.). Cette réflexion amère est assurément une boutade. En fait c'est toute l'éducation du public qui reste à faire... et ce peut être long.

Pourtant cette situation n'a nullement empêché certaines marques d'ajouter à leur production des récepteurs FM à transistors. En fait la présentation de tels postes a été l'une des principales curiosités du 23<sup>e</sup> Salon de la Radio qui vient de fermer ses portes.

### Encore un nouvel émetteur FM

★ Un nouvel émetteur à modulation de fréquence va relayer « France IV ». Après quelques semaines de fonctionnement expérimental, un émetteur FM est, en effet, entré en service à Clermont-Ferrand. L'antenne est située au sommet du Puy-de-Dôme, la puissance est de 2 kW. Fréquence d'émission : 90,0 MHz.

★ L'émetteur à modulation de fréquence de Reims-Montvilliers, qui assure la diffusion du programme haute fidélité de « France IV », a changé de fréquence depuis le 1<sup>er</sup> octobre. Il fonctionne maintenant sur 90,8 MHz au lieu de 99,2 MHz précédemment.

Radio-Constructeur Novembre 1961

Figure 1-1-5

## RAPPEL DES DIFFÉRENTES BANDES EMPLOYÉES EN RADIODIFFUSION QUI PERMET DE MIEUX APPRÉHENDER LES CARACTÉRISTIQUES DE LA BANDE FM.

■ **Les ondes longues** (Grandes Ondes) concernent des fréquences comprises entre 150 et 300 kHz environ. Ces ondes kilométriques se propagent au ras du sol et suivent la courbure de la terre. Elles se dispersent donc assez peu dans l'atmosphère, si bien qu'un seul émetteur de forte puissance suffit à couvrir un pays tout entier. Si un tel émetteur arrive fréquemment à être entendu à plus de 1 000 km, c'est aussi au prix d'une puissance d'émission colossale de l'ordre de 1 à 2 Mégawatts...

■ **Les ondes moyennes** (Petites Ondes) mobilisent une bande située globalement entre 500 kHz et 1,6 MHz. Ces ondes hectométriques se propagent de deux façons différentes ; elles suivent le sol et « s'envolent » également vers la haute atmosphère. La nuit les couches réfléchissantes de l'atmosphère agissent plus ou moins comme un miroir pour les ondes à ces fréquences en les réfléchissant à quelques centaines de kilomètres plus loin...

Ainsi, la couverture diurne d'un émetteur OM est d'environ 150 à 300 km pour une puissance d'émission de l'ordre de 100 kW, d'où la vocation régionale des émissions en PO. La nuit, le programme peut être entendu à 800 km avec une netteté saisissante... revers de la médaille : les brouillages sont fréquents car ces intrusions lointaines imputables à la propagation perturbent très sérieusement les émissions locales... En France nous n'avons pas - malheureusement - de perturbations, puisque dès la tombée de la nuit, plus aucune émission ne subsiste en Petites Ondes...

En revanche, nos T.S.F. semblent fonctionner beaucoup mieux sur cette gamme d'ondes le soir, à en croire la multitude de stations étrangères entendues !

■ **Les ondes courtes** (OC, BE : bande OC étalée) concernent un large spectre de fréquences morcelées dans plusieurs bandes situées globalement entre 3 et 20 MHz (ondes décimétriques). Cette fois l'onde de sol rapidement absorbée est quasi inexistante : seules les ondes réfléchies sont exploitables. En fonction des régions (tropiques) et de l'activité solaire, la propagation est plus ou moins accentuée, c'est la raison pour laquelle les émissions doivent changer constamment de fréquence et qu'il faut être un auditeur éclairé pour suivre un même programme OC sur 24 heures d'affilée !

La puissance des émetteurs est très variable : de quelques dizaines à plusieurs centaines de kW, en fonction des antennes dont certaines, très performantes, sont capables de multiplier la puissance de l'émetteur par un facteur de 30, 50, voire plus... soit plusieurs mégawatts effectivement rayonnés dans des directions privilégiées avec des portées de plusieurs milliers de km !

■ **Les ondes très courtes** (ondes métriques), utilisées en FM et objet de notre étude, n'obéissent à aucune des règles précédentes...

Aux alentours de 100 MHz et au-delà, la propagation des ondes peut s'assimiler à une portée « à vue ». Tel un rayon lumineux, l'onde trace une droite entre l'antenne de l'émetteur et celle du récepteur.

Ainsi, tout obstacle situé entre l'émetteur et le récepteur agit comme une barrière potentielle. Par ailleurs, la courbure de la terre constitue une limite naturelle pour la couverture d'une émission FM, puisque cette dernière n'accepte que la ligne droite ! Heureusement, l'onde se prête assez bien au jeu des réflexions sur tout ce qui est non absorbant ; comme si un rayon lumineux était dirigé vers une ville où chaque colline, chaque bâtiment, maison était recouvert de miroirs... le rayon lumineux se propagerait de miroir en miroir pour aboutir jusqu'à chez vous, parfois au travers de multiples trajets combinés. Ce principe constitue l'essentiel (du moins en zone urbaine) de la propagation de la FM !

Enfin, pour s'affranchir de la courbure de la terre, pas d'autres solutions que de

placer les antennes rayonnantes de l'émetteur le plus haut possible au-dessus du sol ! C'est pourquoi les émetteurs bénéficiant de la plus forte dénivellation avec leur zone naturelle de diffusion sont les plus aptes à aller loin (Les émetteurs du pic du Midi arrivent aux portes de Bordeaux, à près de 300 km de distance...).

La puissance des émetteurs FM dépasse rarement 10 kW. En effet, la longueur d'onde très courte permet la réalisation d'antennes peu encombrantes et économiques pour un facteur multiplicateur (gain) couramment usité de plus de 20. Malgré cela, la portée n'excède que rarement 50 km. La FM peut donc susciter surtout des couvertures locales. En revanche, la stabilité de la diffusion se moque de l'activité du soleil, de la température et des conditions atmosphériques. Lorsque la radio est entendue, c'est pour toujours, à quelques exceptions près.

A titre d'exemple, en France, alors qu'un seul émetteur suffit à couvrir quasiment 100 % de la population en grandes ondes, environ 140 émetteurs sont nécessaires en FM pour atteindre 80 % des Français et près de 400 sont requis pour diffuser un même programme vers 95 % d'auditeurs potentiels...

## 2 - PRINCIPES DE LA MODULATION DE FRÉQUENCE

### 1) GÉNÉRALITÉS :

Avec la modulation d'amplitude (AM), l'information est contenue dans les variations de l'amplitude de l'onde porteuse, alors que le procédé de modulation de fréquence consiste au contraire à maintenir une amplitude de signal la plus stable possible et de faire varier sa fréquence (figure 1-2-1).

Les composantes du signal AM, si le procédé est linéaire, sont sinusoïdales, alors qu'un signal FM dont la fréquence varie constamment **n'est pas sinusoïdal**, c'est la raison pour laquelle son approche théorique est beaucoup plus complexe.

Note : Pour les détails et la théorie mathématique, se reporter à l'appendice.

Deux composantes, accompagnées de leurs paramètres respectifs sont à considérer dans l'étude d'un signal modulé en fréquence :

- Le signal basse fréquence de modulation, avec son amplitude  $V$  et sa fréquence  $f_{BF}$ .
- Le signal haute fréquence avec sa fréquence de repos, la porteuse  $F_0$  et sa variation de fréquence qui est appelée **excursion ou déviation, de symbole  $\Delta F$** .

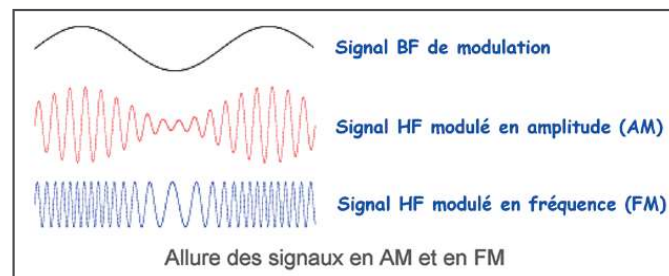


Figure 1-2-1



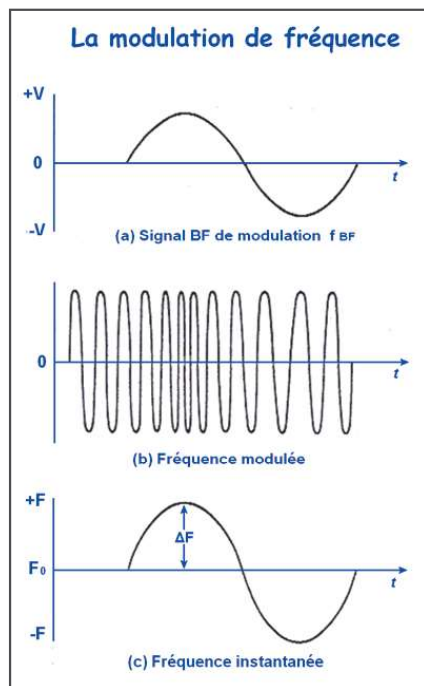


Figure 1-2-2

L'élaboration d'un signal FM consiste à faire varier, en appliquant convenablement une modulation, la fréquence d'un oscillateur, tout en maintenant son amplitude constante. Si la fonction de modulation est linéaire, la fréquence du signal varie autour de la fréquence centrale  $F_0$ , de  $\pm \Delta F$ , proportionnellement à l'amplitude du signal modulateur, la fréquence  $f_{BF}$  de ce dernier imposant le rythme des variations, c'est-à-dire le nombre de  $\Delta F$  par seconde. Ainsi la fréquence de la porteuse augmente durant l'alternance positive du signal BF et décroît durant l'alternance négative, voir la figure 1-2-2.

La figure 1-2-3 montre l'oscillogramme d'un signal modulé en fréquence.

**En résumé :**  
*La modulation de fréquence se caractérise par une excursion dont l'importance est proportionnelle à l'amplitude du signal BF et dont la vitesse de variation est proportionnelle à la fréquence BF: plus la fréquence BF est élevée, plus la variation de fréquence est rapide.*

A titre d'exemple, considérons un signal de modulation de fréquence  $f_{BF} = 1000 \text{ Hz}$  ; cela signifie que la fréquence instantanée de l'onde porteuse va varier mille fois par seconde autour de sa position de repos.  
 Pour une fréquence d'émission  $F = 100 \text{ MHz}$  et une excursion de fréquence  $\Delta F$  fixée à  $\pm 75 \text{ kHz}$ , la fréquence instantanée passe mille fois par seconde de 99,025 à 100,075 MHz. Si le même signal BF de 1000 Hz est transmis avec une intensité moindre, c'est l'excursion de fréquence qui est réduite (par exemple à  $\pm 20 \text{ kHz}$ ), mais il y a toujours mille variations par seconde de la porteuse. En radiodiffusion la valeur maximale de cette excursion est fixée, par normalisation à  $\pm 75 \text{ kHz}$  de la fréquence porteuse ( $\pm 50 \text{ kHz}$  dans certains pays).  
 On a choisi un paramètre qui caractérise bien le procédé. Il s'agit de l'**indice ou index de modulation M** qui est défini par le rapport suivant :

$$M = \Delta F / f_{BF}$$

On constate que celui-ci peut prendre théoriquement toutes les valeurs possibles, ce qui représente un avantage certain pour la reproduction des thèmes musicaux avec une très grande dynamique.  
 Mais la fréquence de modulation se trouvant au dénominateur, il apparaît évident que le rapport diminue à mesure qu'elle augmente, ce qui signifie que les signaux aigus ont tendance à être désavantagés.

Pour pallier cet inconvénient, le signal sonore subit, à l'émission, une augmentation du niveau des fréquences aiguës : c'est la **préaccentuation** (**preemphasis** en anglais), donc l'action est d'autant plus importante que la fréquence audio est élevée (jusqu'à 15 kHz) ; le signal passe à travers une cellule RC qui est chargée de cette fonction et dont la constante de temps est normalisée.

\*Note : on appelle l'onde non modulée onde porteuse, par analogie avec l'AM, bien que, contrairement à celle-ci, elle ne peut être dissociée dans un signal modulé en fréquence. Le terme de fréquence centrale serait plus approprié.

Afin de conserver la fidélité de reproduction, l'opération inverse est effectuée dans les récepteurs, par un circuit inverse de **désaccentuation** (**deemphasis** en anglais). Grâce à cette astuce, le rapport signal sur bruit de la transmission est amélioré.  
 Nous verrons ultérieurement que ces circuits sont très simples à mettre en œuvre.

## 2) AVANTAGES DE LA MODULATION DE FRÉQUENCE :

Etant donné que, contrairement à l'AM, l'information n'est pas contenue dans des variations d'amplitude, la distorsion et les variations intempestives de l'amplitude de l'onde porteuse n'affectent pas l'information. La majorité des parasites, qui sont des impulsions électriques à fortes variations d'amplitude, ne provoquent aucune perturbation dans les récepteurs. Les amplificateurs HF n'ont donc nullement besoin d'être linéaires, aussi bien à l'émission qu'à la réception.  
 Les émetteurs sont d'une conception plus simple que celle des émetteurs en AM, avec en particulier une modulation générée directement à bas niveau sur un oscillateur pilote. On obtient un rendement élevé des tubes ou transistors amplificateurs grâce à une polarisation en classe C.  
 Encore plus fort, en réception, un amplificateur est spécialement chargé d'écarter le signal afin de le débarrasser de toutes les variations d'amplitude dues aux parasites et aux phénomènes d'évanouissement (fading) !  
 La qualité de la reproduction sonore est excellente, le rapport signal sur bruit élevé et la dynamique exceptionnelle. Le rapport signal sur bruit global est d'ailleurs meilleur grâce aux actions conjuguées du circuit écarteur, de la densité de bruit plus faible en très hautes fréquences (VHF) qu'en hautes fréquences (HF) et de la préaccentuation.

La radiodiffusion en FM bénéficie de tous ces avantages.

En plus de ces précieux avantages, il n'y a pas de battements d'interférences entre deux stations. En effet, grâce, encore une fois, à l'action de l'écarteur, pratiquement seul le signal le plus fort est audible. Le brouilleur n'est pas audible tant que son amplitude ne dépasse pas la moitié de celle du signal écouté.

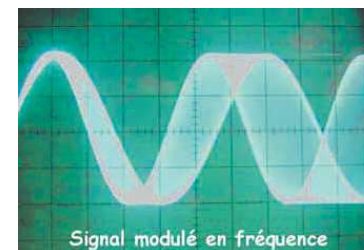


Figure 1-2-3

Ce circuit, qui est en fait un amplificateur non linéaire, est aussi appelé **limiteur**. La grande dynamique autorise le signal de modulation à une reproduction des contrastes musicaux avec une excellente fidélité. Enfin, le procédé offre la possibilité de la transmission d'un signal multiplex pour la stéréophonie et pour d'autres services (le RDS en particulier).

Les chiffres suivants donnent une échelle de grandeur des performances obtenues au travers d'une chaîne complète d'émission et de réception en modulation de fréquence, avec un récepteur de bonne qualité :

- Aucune variation de l'amplitude du signal sonore, quel que soit le niveau HF du champ de l'émission reçu (entre 25 et 100 dBμV).
- Courbe de réponse linéaire de la bande sonore, entre 30 Hz et 15 kHz (variations < 3 dB, aujourd'hui moins de 1 dB).
- Faible distorsion du signal audio démodulé (< 1 %, aujourd'hui < 0,1%).
- Grande dynamique du signal sonore : 60 dB et plus (soit un rapport de 1 000 ! La dynamique est la capacité de reproduire l'écart entre les niveaux élevés et les niveaux faibles dans les contrastes musicaux : en AM 30 dB contre 60 dB en FM).
- Faible bruit de fond (rapport signal/bruit > 60 dB).

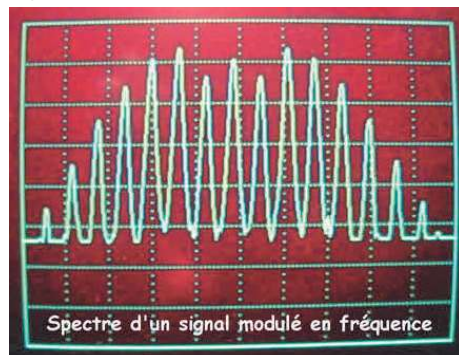
### 3) INCONVÉNIENTS DE LA MODULATION DE FRÉQUENCE :

On estime qu'une émission de radiodiffusion à modulation de fréquence en stéréophonie occupe une bande d'environ 220 kHz, soit un cinquième de la gamme des petites ondes. On ne pourrait donc pas utiliser ce procédé en petites ondes, ni même d'ailleurs en ondes courtes. Rappelons que l'espacement entre deux canaux en AM est seulement de 9 kHz.

On a vu qu'une oscillation dont la fréquence instantanée varie constamment n'est plus de forme sinusoïdale et, par conséquent, est caractérisée par la somme de plusieurs signaux sinusoïdaux d'amplitude et de fréquence différentes.

Dans le cas de la modulation de fréquence, il y a production d'une infinité de fréquences qui se répartissent symétriquement de part et d'autre de la fréquence centrale et qui sont espacées de la valeur de la fréquence de modulation fBF. L'amplitude de chacune des paires de fréquence dépend de l'indice de modulation M. Dans une émission monophonique où la bande passante BF s'étend de 30 Hz à 15000 Hz, avec une excursion fixée à  $\pm 75$  kHz, on considère que la bande requise est égale à 180 kHz. On remarque sur la photo du

Figure 1-2-4



spectrogramme d'un signal modulé en fréquence de la figure 1-2-4 que la bande occupée s'étale symétriquement de part et d'autre de la porteuse et que l'espace entre chaque bande latérale est égal à la fréquence de modulation.

On calcule que la bande occupée par un signal modulé en fréquence par un signal BF est égale à deux fois la somme de la fréquence BF et de l'excursion et l'on considère en pratique qu'elle dépend à la fois de l'indice de modulation M, lorsque celui-ci est élevé et de la fréquence de modulation fBF, lorsque celle-ci est élevée.

### 4) GÉNÉRATION DE LA MODULATION DE FRÉQUENCE :

Un générateur à modulation de fréquence doit fournir un signal dont la fréquence dépend de l'amplitude de la basse fréquence. Afin de parfaire les choses, il faut également que la fréquence centrale en l'absence de modulation soit parfaitement stable ; d'autre part, le niveau de l'excursion doit être constant, quelle que soit la fréquence de modulation entre 30 Hz et 15 kHz. Plusieurs procédés existent pour produire un tel signal ; tous consistent à faire varier l'élément d'un circuit oscillant, self ou condensateur, au rythme de la modulation sonore.

Par conséquent, les modulateurs que nous allons examiner ne se différencient que par les moyens mis en œuvre.

Aujourd'hui, le dispositif le plus communément adopté est la diode à capacité variable.

#### a) Le microphone électrostatique :

La membrane et la base du microphone forment un condensateur. La membrane vibre au rythme des fréquences acoustiques et produit une variation de capacité induisant des variations de fréquence. Ce procédé, simple à mettre en œuvre n'est pas utilisé en radiodiffusion (figures 1-2-5 et 1-2-6).

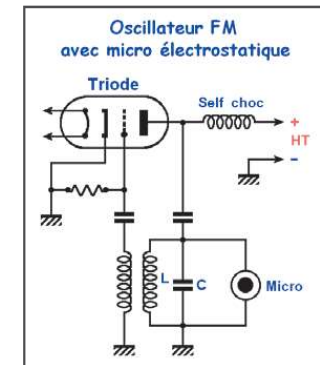


Figure 1-2-5

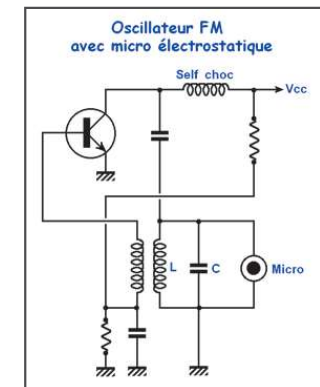


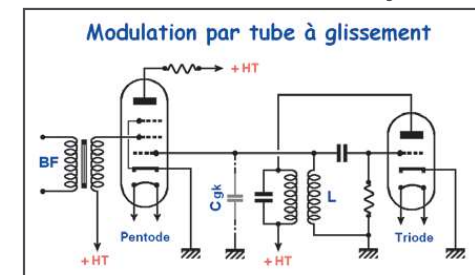
Figure 1-2-6

#### b) Le tube à glissement :

Phénomène nuisible dans les amplificateurs, l'effet Miller est mis à profit avec le tube à glissement pour moduler la fréquence d'un oscillateur.

On dispose la capacité Cgk entre grille et cathode d'un tube penthode en parallèle sur l'oscillateur. Sachant que la valeur de cette capacité dépend du gain du tube, la source basse fréquence est insérée dans la grille écran. La variation de pente qui en découle entraîne celle du gain et de Cgk (figure 1-2-7). Il suffit de modifier le gain du tube en modulant la tension écran au rythme de la modulation pour obtenir une modulation de fréquence.

Figure 1-2-7



#### c) Le modulateur à réactance :

Il s'agit d'un amplificateur à charge

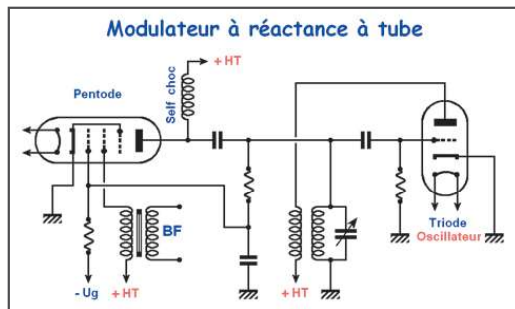


Figure 1-2-8

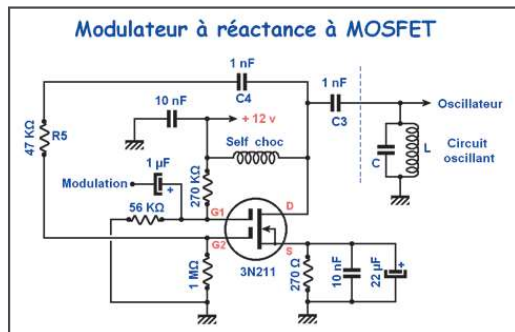


Figure 1-2-9

réactive qui, placé aux bornes du circuit oscillant, se comporte comme une capacité ou une self variable. La tension modulatrice est appliquée sur la grille écran pour produire des variations de pente. Les figures 1-2-8 et 1-2-9 représentent des modulateurs à réactance, l'un à tube et l'autre avec un transistor MOS-FET. On fait varier ici la transconductance du transistor en modulant la gate N°1 et la capacité d'entrée de la gate N°2 est connectée au circuit oscillant à travers R5, C4 et C3. Il s'agit d'une réactance inductive.

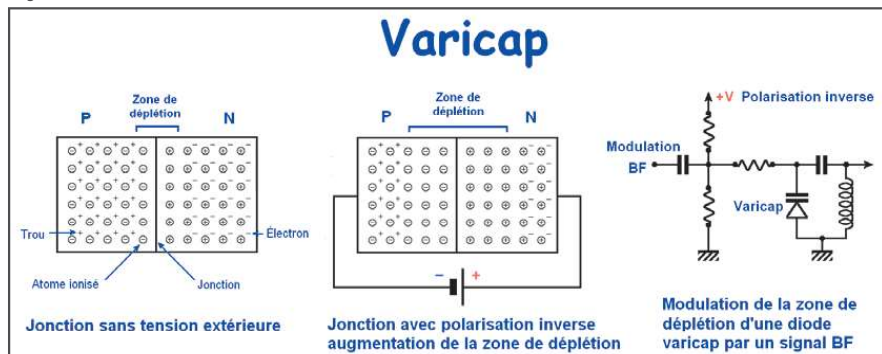
#### d) Le modulateur avec diode à capacité variable ou varicap :

Le principe est le suivant : une diode à semi-conducteur comprend un élément de silicium dopé avec des porteurs positifs et un élément de silicium dopé avec des porteurs négatifs. Ces deux matériaux sont réunis intimement afin de former une jonction. Les porteurs, apportés dans le silicium par l'opération de dopage, peuvent facilement se

déplacer au sein des deux sections, ce qui fait que, au niveau de la jonction, un certain nombre d'entre eux se recombinent, même en l'absence de polarisation externe. La zone dénuée de porteurs libres qui ne comporte plus que des ions (atomes ionisés fixes) est appelée zone de déplétion ou bien zone de charge d'espace. Si on applique maintenant une polarisation inverse, les porteurs mobiles vont être attirés vers l'extérieur et augmenter la zone de déplétion. Cette dernière se comporte comme le diélectrique d'un condensateur dont les armatures sont les régions du semi-conducteur sièges de porteurs libres.

Le principe qui consiste à moduler par un signal basse fréquence

Figure 1-2-10



la zone de déplétion est largement utilisé dans les modulateurs d'émetteurs FM (figure 1-2-10).

#### 5) PRÉACCENTUATION ET DÉSACCENTUATION DU SIGNAL BF :

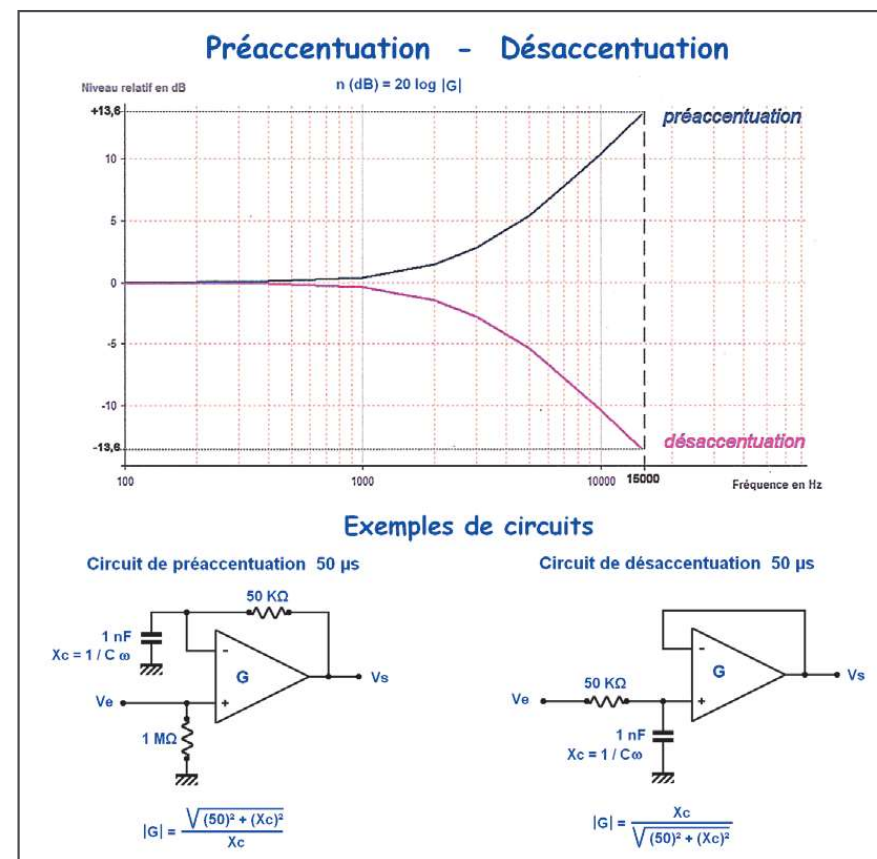
Nous avons vu que l'indice de modulation diminue à mesure que la fréquence de modulation augmente. Cela signifie que pour un niveau de signal BF constant à l'entrée de l'émetteur, le rapport signal sur bruit du signal modulant émis est plus faible dans le haut du spectre sonore que dans le grave.

Ce constat a incité les ingénieurs à trouver une astuce très simple, en modifiant la courbe de réponse des circuits audio afin que la déviation conserve à peu près la même valeur sur tout le spectre basse fréquence. Il suffit de modifier l'allure du signal BF original en accentuant les fréquences aiguës.

Pour cela, avant d'entrer dans le modulateur, le signal subit une accentuation qui est fonction de sa fréquence. Ce procédé est universellement utilisé par tous les émetteurs à modulation de fréquence.

Le bruit subissant l'opération de désaccentuation est ainsi écrasé à la réception (figure 1-2-11).

Figure 1-2-11





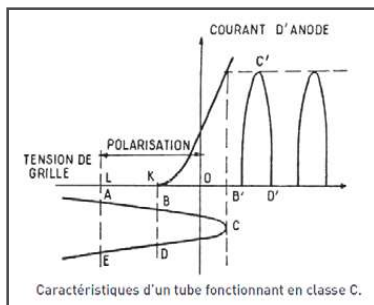


Figure 1-2-12

Pour que les deux corrections à l'émission et à la réception se compensent exactement, la constante de temps des filtres RC doit être rigoureusement identique. Une norme a donc été établie.

Mais, comme il se doit, elle est différente aux Etats-Unis. Outre-Atlantique la norme avait été fixée à 100  $\mu$ s, puis a été ramenée à 75  $\mu$ s.

En Europe, la valeur est égale à 50  $\mu$ s. Dans ces conditions, la courbe de réponse BF subit un accroissement de 13,6 dB à 15 000 Hz (soit un rapport de 4,8) ce qui est très important.

La figure 1-2-11 montre un exemple de dispositif de préaccentuation des aigus. Le circuit formé des deux éléments passifs  $R = 50$  k $\Omega$

et  $C = 1$  nF fait apparaître une constante de temps de 50  $\mu$ s ( $RC = 1 \times 10^{-9} \times 50 \times 10^3 = 50 \mu$ s).

Les collectionneurs de récepteurs FM américains sont donc « pénalisés » lorsqu'ils écoutent des programmes en Europe. En effet la cellule de désaccentuation est plus élevée (100 ou 75  $\mu$ s) que la cellule de préaccentuation des émetteurs européens à 50  $\mu$ s, ce qui atténue d'autant les fréquences aiguës du message sonore restitué par le récepteur !

Mais qu'ils se rassurent ! Bien souvent la courbe de réponse du haut-parleur est bien plus pénalisante dans l'atténuation des aigus que cette seule différence de norme...

Toutefois, la comparaison de la sonorité des postes FM d'origine US et allemande, par exemple, montre un son nettement plus ciselé et chaleureux au crédit des modèles d'Outre- Rhin.

## 6) LES ÉMETTEURS :

Sans trop rentrer dans les détails de la technique des émetteurs VHF à modulation de fréquence, soulignons à nouveau que la génération et l'amplification d'un signal modulé en fréquence sont plus aisées que pour la modulation d'amplitude. Une linéarité parfaite n'a pas lieu d'être ; aussi les circuits de polarisation et de stabilisation sont supprimés, ce qui se traduit par des rendements en puissance qui sont nettement accrus, grâce à un mode de travail en classe C. La figure 1-2-12 nous montre les deux caractéristiques d'un tube fonctionnant en classe C. La tension de polarisation OL est très supérieure à la tension de coupure OK. Toutefois l'amplitude du signal est assez grande, non seulement pour déclencher le courant d'anode, mais même pour rendre la grille positive. Le courant d'anode est constitué par des impulsions.

Bien que le circuit de sortie agisse comme un volant d'énergie, l'onde comporte un taux relativement élevé de distorsion en raison de cette linéarité médiocre et l'émetteur doit impérativement être pourvu d'un filtre passe-bas en sortie très efficace pour ne laisser passer que la fréquence fondamentale de l'émission vers l'antenne en rejetant les harmoniques avec des taux élevés d'atténuation (supérieurs à 10%).

La figure 1-2-13 donne en exemple le schéma synoptique d'un émetteur pilote, dispositif de base d'une station d'émission en FM.

La partie inférieure gauche représente le codeur stéréo dont nous examinerons ultérieurement le fonctionnement. L'organe central, le cœur du dispositif dirons-nous, est constitué des circuits qui génèrent le signal sur la fréquence d'émission. Celle-ci est obtenue grâce à un comparateur et un système de boucle à verrouillage de phase qui compare la fréquence d'un oscillateur VHF commandé en tension (VCO = Voltage Controlled Oscillator) avec celle d'un oscillateur à quartz de haute stabilité. L'exploitant peut choisir sa fréquence entre 87,5 et 108 MHz avec un pas de variation de 10 kHz à l'aide d'une programmation par roues codeuses, depuis l'appareil ou à distance. Le signal logique issu des diviseurs programmables est comparé avec le signal issu de la référence. Le comparateur de phase génère une tension d'erreur soigneusement filtrée qui asservit l'oscillateur commandé en tension.

Le signal de ce dernier, dont la fréquence est aussi stable que celle du quartz auquel il est asservi, est ensuite amplifié jusqu'à obtenir la puissance de fonctionnement. L'amplificateur de sortie comporte un filtre d'harmoniques très efficace suivi d'un coupleur de mesures. La puissance, qui est contrôlée par un système de contrôle automatique de niveau, peut être également réglée par l'exploitant et peut subir également une réduction si le coupleur indique une désadaptation de la charge de sortie.

La modulation peut provenir du signal multiplex issu du codeur stéréo ou bien directement d'un canal du studio via un réglage de niveau, et avec ou sans préaccentuation.

Les puissances pratiquées pour émettre en FM sont plus faibles que celles qui sont mises en œuvre pour l'AM.

D'abord, ces signaux se propageant « à vue », il n'est pas nécessaire de disposer de très grandes puissances pour assurer une zone de confort d'écoute optimum ; ensuite les fréquences VHF permettent la fabrication d'antennes de taille raisonnable et délivrant un gain élevé, ce qui est beaucoup plus rationnel et

Figure 1-2-13

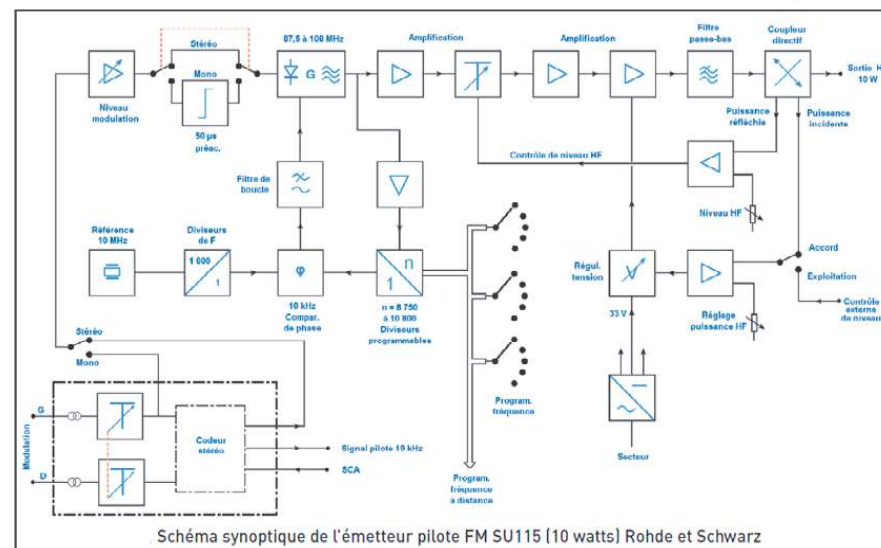
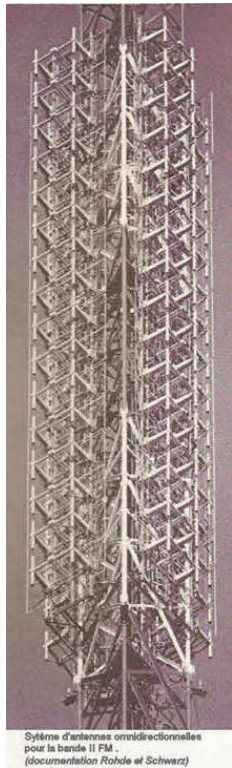


Figure 1-2-14



économique pour augmenter la puissance d'un émetteur ! Le couplage de plusieurs antennes permet d'obtenir des gains de l'ordre de 10 dB (facteur 10 en puissance), ce qui autorise des puissances rayonnées pouvant dépasser 100 kW (Puissance Apparente Rayonnée), voir les figures 1-2-14 et 1-2-15.

Dans les zones de province, la P.A.R. est comprise entre 1 et 3 kW.

Les réémetteurs chargés de couvrir les zones d'ombre (en montagne, notamment) ont des puissances beaucoup plus faibles, de 10 à 100 W en général.

En France, les émetteurs FM diffusant sur les grandes villes (Paris Tour Eiffel, Lille, Pic du Midi, etc.) ont une puissance de l'ordre de 10 kW (quelques dizaines de kW au plus, aujourd'hui entièrement transistorisés).

## 7) PRINCIPE ET THÉORIE DE LA MODULATION DE FRÉQUENCE :

### a) Représentation vectorielle d'une fonction sinusoïdale quelconque :

Comme illustré sur la figure 1-2-19, la fonction sinusoïdale  $a = A \sin \omega t$  est représentée par un vecteur d'amplitude  $A$  tournant à une vitesse angulaire constante  $\omega$  radians/s. L'expression  $\omega t$  est donc un angle qui varie de 0 à  $2\pi$ . Comme on le sait en radioélectricité,  $\omega = 2\pi F$  et  $F = 1/T$ , donc :  $\omega t = 2\pi t/T$ . On a  $\omega t = 0$  lorsque  $t = 0$  et  $\omega t = 2\pi$ , lorsque  $t = T$ .

Et à un instant  $t$ , le vecteur forme par rapport à l'axe d'origine un angle  $\theta = \omega t$  radian.

Figure 1-2-15



### b) Expression mathématique de la fréquence instantanée :

L'expression instantanée du signal audio modulateur  $u$  est :

$$u = U \cos \Omega t \quad (1)$$

avec :

$U$  = amplitude du signal audio

$\Omega$  = vitesse angulaire ou pulsation du signal audio en radian par seconde (le cosinus est préféré pour des raisons de simplicité de calcul).

$t$  = temps en seconde

La variation de fréquence instantanée  $dF$  ne dépend que de l'amplitude instantanée  $u$  du signal modulateur :

$$dF = f(u) \text{ (lire fonction de } u)$$



donc l'expression de la variation de fréquence instantanée est :

$$dF = \Delta F \cos \Omega t \quad (2)$$

avec  $\Delta F = f(U) = k U$  ( $\Delta F$ , l'amplitude de la variation de fréquence et  $U$ , l'amplitude du signal de modulation, sont liés par un coefficient  $k$ ).

Et la valeur de la fréquence instantanée est :

$$f_m = F_0 + \Delta F \cos \Omega t \quad (3)$$

$f_m$  varie autour de  $F_0$  entre deux limites qui sont  $\pm \Delta F$ , en fonction de la valeur du cosinus.

Exemple : Si pour une tension et une fréquence de modulation de 5 V et 1 kHz, respectivement, on obtient une variation de fréquence de  $\pm 10$  kHz, en passant à 10 V on obtiendra une variation de 20 kHz. Mais en gardant 5 V et en passant à 2 kHz, on obtiendra toujours  $\pm 10$  kHz, mais le nombre de variations positives et négatives par seconde sera passé de 1000 à 2000. De même la pulsation modulée est donnée par la formule suivante :

$$\omega_m = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t \quad (4)$$

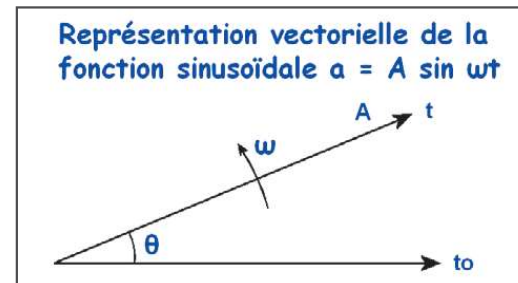
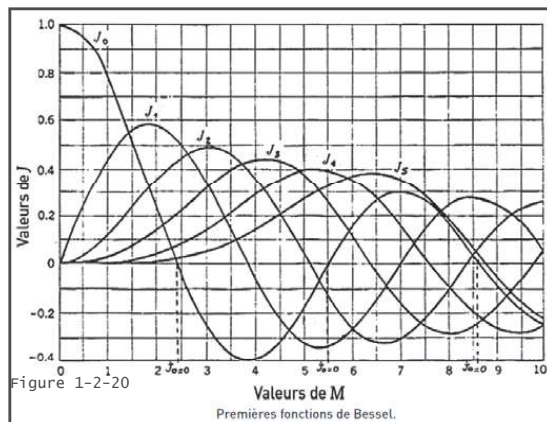


Figure 1-2-19





Si l'on reprend la représentation vectorielle de la figure 1-2-19 avec la modulation, la vitesse angulaire du vecteur est accélérée ou ralentie de  $+\Delta\omega$  à  $-\Delta\omega$ , selon la valeur du sinus.

A un tout petit accroissement de temps  $dt$  correspond un petit accroissement de l'angle  $d\theta$  :

$$\omega_m dt = d\theta$$

Et pour avoir l'angle  $\theta$  que fait le vecteur à un instant  $t$ , il faut intégrer  $\omega_m$  par rapport au temps :

$$\theta = \int \omega_m dt = \int (\omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t) dt$$

ce qui donne :  $\theta = \omega_0 t + \Delta\omega/\Omega \sin \Omega t$

l'expression d'une tension modulée en fréquence devient :

$$u = U \sin(\omega_0 t + \Delta\omega/\Omega \sin \Omega t) \quad (5)$$

La quantité variable:  $(\Delta\omega/\Omega \sin \Omega t)$  représente bien la variation de phase inhérente à la modulation de fréquence avec le rapport  $\Delta\omega/\Omega$ .

Celui-ci, qui est égal au rapport de fréquence correspondant, est appelé **indice ou index de modulation** :

$$M = \Delta\omega/\Omega = \Delta F/f_{BF} \quad (6)$$

Tenant compte à la fois de l'excursion et de la fréquence de modulation, il quantifie bien la FM.

Si l'on se reporte au résultat de calcul de l'angle  $\theta$  que fait le vecteur instantané, on voit que  $M$  représente l'amplitude de la variation de phase.

Avec une excursion maximum égale à  $\pm 75$  kHz, selon les normes d'émission, et une bande passante de fréquence de modulation qui s'étend en mono de 30 à 15 kHz, on remarque que  $M$  peut prendre un très grand nombre de valeurs qui sont très élevées pour les basses fréquences ; il est à noter aussi que l'indice devient faible vers le haut de la bande, où la préaccentuation prend toute sa raison d'être.

### c) Largeur de bande occupée :

Alors qu'en AM la bande est de deux fois le spectre audio, le calcul en FM est beaucoup plus complexe. En effet l'expression de la tension modulée instantanée de l'équation (5) qui est le sinus d'un sinus, implique pour sa résolution, l'emploi des fonctions de Bessel.

On démontre que le développement de l'équation devient :

$$u = U \{ J_0 M \sin \omega_0 t + J_1 M [\sin(\omega_0 + \Omega)t - \sin(\omega_0 - \Omega)t] + J_2 M [\sin(\omega_0 + 2\Omega)t + \sin(\omega_0 - 2\Omega)t] + J_3 M [\sin(\omega_0 + 3\Omega)t - \sin(\omega_0 - 3\Omega)t] + J_4 M [\sin(\omega_0 + 4\Omega)t + \sin(\omega_0 - 4\Omega)t] \dots etc. \}$$

Le spectre comporte une infinité de bandes latérales qui comportent chacune le coefficient  $J$ .

La figure 1-2-20 montre la variation du coefficient  $J$  en fonction de  $M$  pour les premières fonctions.

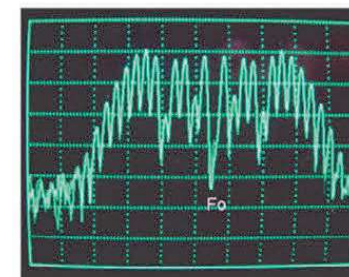
A ce stade, un certain nombre de remarques **très importantes** s'imposent :

- Le signal FM comporte une infinité de bandes latérales qui sont séparées de la porteuse par un espace correspondant à :  $f_{BF}$ ,  $2f_{BF}$ ,  $3f_{BF}$ ,  $4f_{BF}$  etc.
- Les bandes latérales de rang égal ont même amplitude.
- Les coefficients  $J$  déterminent l'amplitude de chaque bande latérale et leur valeur décroît à mesure que  $M$  augmente (voir la figure 1-2-21).
- Pour un  $\Delta F$  constant, si  $f_{BF}$  diminue, le nombre de bandes latérales augmente.
- Quel que soit  $M$ , la puissance totale émise reste la même. Lorsque  $M$  augmente la puissance est distribuée sur une bande plus large. Cela se vérifie lorsque le signal de réception est faible avec une remontée du bruit sur les pointes de modulation qui provoque du chuintement.
- L'amplitude relative de  $F_0$  est affectée par  $M$  et pour certaines valeurs de celui-ci, elle s'annule complètement. On voit par exemple sur les premières fonctions de Bessel de la figure 1-2-20 que le coefficient  $J_0$  s'annule pour les valeurs de  $M = 2,4$ ,  $M = 5,5$  et  $M = 8,6$ . Ceci se vérifie pleinement sur les spectrogrammes de la figure 1-2-21.

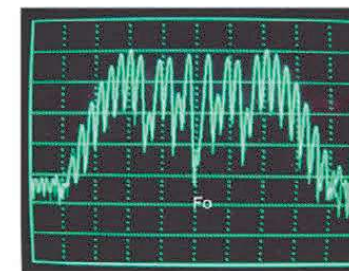
On constate bien évidemment que la largeur de bande est fonction de  $M$ .

Bien qu'en théorie le nombre de bandes soit infini, en pratique celles de rang élevé ont une

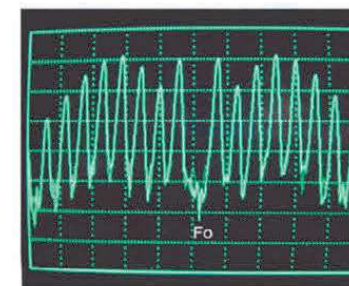
Figure 1-2-21



$M = 2,4, f_{BF} = 15 \text{ kHz}$

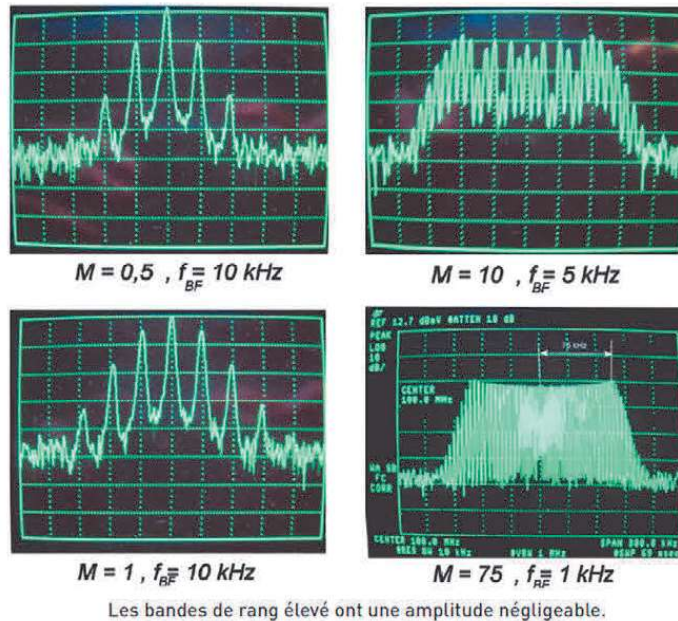


$M = 5,5, f_{BF} = 10 \text{ kHz}$



$M = 8,6, f_{BF} = 5 \text{ kHz}$

L'amplitude relative de  $F_0$  s'annule complètement pour certaines valeurs de  $M$ .



amplitude négligeable. Voir les spectrogrammes de la figure 1-2-22.

Pour la détermination de la bande occupée, une bonne approximation est donnée par la formule ci-dessous :

$$\text{En mono : } B = 2 (75 + 15) = 180 \text{ kHz (7)}$$

$$\text{En stéréo : } B = 2 (75 + 53) = 256 \text{ kHz (8)}$$

Soit deux fois la somme de l'excursion maximum et de la plus haute fréquence audio à transmettre.

#### d) Le bruit en FM :

Le seul risque créé par les parasites qui se produisent dans la bande de réception du tuner est dû au fait qu'ils viennent se mélanger à l'entrée en produisant une modulation d'amplitude. La composition des deux signaux produit un signal résultant ayant subi un écart de phase dont l'influence diminue très rapidement à mesure que l'indice de modulation augmente.

Par exemple pour un parasite égal au quart de l'amplitude du signal utile, si la porteuse est modulée avec un indice de 20, le rapport signal sur bruit est de 2,8 dB, mais passe à 23 dB pour un indice de 200 et 30 dB pour 500.

Les interférences créées par une autre station se trouvant sur la même fréquence sont éliminées, grâce au circuit limiteur, dans la mesure où l'amplitude du brouilleur ne dépasse pas la moitié de celle du signal utile.

Cette propriété, qui ne laisse passer que le signal le plus fort, est nommée **phénomène de capture**.

### 3 - LES RÉCEPTEURS POUR LA MODULATION DE FRÉQUENCE

#### 1) NOTIONS DE BRUIT DANS LES RÉCEPTEURS :

##### a) Origines du bruit :

On distingue communément trois types de bruits différents : les bruits d'origine artificielle ou humaine, les bruits d'origine atmosphériques amenés par le collecteur d'ondes et les bruits générés par les composants eux-mêmes dans le récepteur. Bien évidemment les bruits d'origines artificielle et atmosphérique échappent à notre contrôle. En très haute fréquence où se trouve la bande FM, l'amplitude du bruit est moins importante que sur les bandes basses en PO et GO (figure 1-3-1).

##### b) Bruits à l'entrée du récepteur :

Le bruit est susceptible d'affecter le récepteur dans la mesure où il tombe dans sa bande passante ; la porteuse utile et le signal de bruit se mélangent et donnent une fréquence qui peut interférer avec le signal utile.

Hormis le bruit engendré par les phénomènes naturels, le bruit à l'entrée du récepteur ou tous les signaux qualifiés comme tel peuvent avoir des origines diverses :

- bruit ou brouillage par un canal adjacent si le récepteur a un mauvais rapport de protection (mauvaise sélectivité des filtres de fréquence intermédiaire et mauvaise linéarité de l'étage d'entrée), ou bien surmodulation de l'émetteur brouilleur.

- bruit ou brouillage par l'entrée directe d'un signal de fréquence égale à celle de la fréquence intermédiaire (mauvaise réjection de la FI).

- bruit ou brouillage par la fréquence image ou fréquence conjuguée (mauvaise sélectivité des circuits d'entrée).

Le récepteur peut également être le siège de réponses parasites, par exemple en répondant à des fréquences sous harmoniques du signal utile. Des produits de mélange entre un signal incident et l'oscillateur local peuvent aussi voir le jour.

Selon leur amplitude, ces signaux indésirables seront qualifiés de bruit (augmentation du souffle, chuintements...) ou bien interférences ou brouillages.

Figure 1-3-1

