

La modulation de fréquence

Après avoir étudié les procédés de modulation et démodulation AM et BLU dans notre précédent numéro, il est logique de s'intéresser aujourd'hui à la FM dont l'omniprésence depuis l'émergence des radios locales fait croire, à tort, à nombre de personnes qu'elle est le procédé de modulation le plus utilisé.

Du côté de l'émetteur

Si l'on ne s'intéresse qu'à l'aspect mathématique de la question, la modulation de fréquence est simple puisqu'elle consiste tout simplement à faire varier la fréquence de l'onde porteuse H.F. au rythme du signal modulant. Si l'on veut écrire cela sous forme trigonométrique, et en supposant que le signal modulant soit une fonction du temps notée $f(t)$ on a :

signal FM = $\cos((1 + k \cdot f(t)) \cdot t)$ que l'on peut écrire aussi sous la forme :

signal FM = $\cos((t + k \cdot f(t)))$.

Cette deuxième forme de notation caractérise plus exactement la modulation de phase mais, comme elle est très proche de la modulation de fréquence, on fait rarement la distinction tant que l'on ne s'intéresse qu'aux principes généraux comme c'est notre cas ici. La constante k est évidemment l'indice ou taux de modulation et caractérise en quelque sorte le pourcentage de variation de la fréquence porteuse en fonction de l'amplitude du signal modulant.

La valeur de ce coefficient k permet justement de distinguer deux types de modulation FM bien distincts selon que sa valeur est faible ou importante. Les faibles valeurs de k caractérisent la modulation de fréquence à bande étroite utilisée principalement pour les liaisons dites de communication, tandis que les valeurs de k importantes caractérisent les émissions FM à large bande utilisées principalement en radiodiffusion, notamment sur la célèbre bande FM de 87,5 à 108 MHz. Pourquoi cette distinction ? Tout simplement parce que si l'on examine le spectre d'une émission FM, c'est à dire la plage de fréquence qu'occupe le signal modulé, on constate que sa largeur est à peu près égale à deux fois la variation de fréquence maximale de la porteuse. Les émissions réalisées dans la bande FM utilisent une excursion de fréquence de 75 kHz ce qui signifie que leur spectre s'étale sur 150 kHz.

On comprend mieux, dans ces conditions, pourquoi les émissions FM à large bande sont «reléguées» sur des fréquences élevées. En effet, une

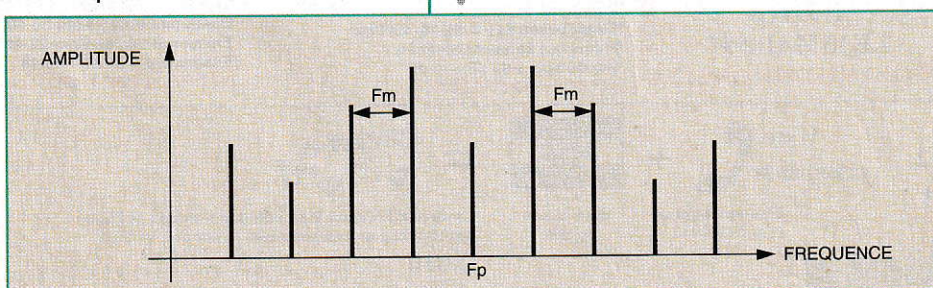
émission FM du même type réalisée par exemple dans la bande grandes ondes classique ne permettrait guère que d'y placer un seul émetteur ... Les émissions FM à bande étroite quant à elles, utilisent des excursions de fréquence beaucoup plus réduites puisque l'on trouve des valeurs telles que 25 kHz, 12,5 kHz voir même 5 kHz. L'encombrement spectral qui en résulte est évidemment bien moindre.

Au vu de cet exposé, vous êtes en droit de vous demander pourquoi tout le monde n'émet pas tout simplement en FM à bande étroite. La réponse est hélas fort simple : la largeur de bande de modulation nécessaire, ou si vous préférez l'excursion de fréquence nécessaire, est directement liée à la qualité de transmission de la modulation et en particulier à la fréquence maximum à transmettre. Ainsi, les émissions de radiodiffusion en bande FM, qui sont stéréophoniques et doivent ainsi transmettre des signaux dont la fréquence maximum s'étend jusqu'à 53 kHz, ne peuvent se satisfaire d'une excursion de fréquence aussi ridicule que les 5, voire 25 kHz des communications FM à bande étroite. Ces dernières par contre, ne véhiculant que de la parole dont tout le monde sait qu'elle se satisfait d'une bande passante dite téléphonique, c'est à dire comprise entre 300 et 3000 Hz, s'accrochent fort bien d'une faible excursion de fréquence. Pour en terminer avec cet exposé purement théorique, vous pouvez découvrir, en figure 1, le spectre type d'une émission FM. Il est caractérisé par de nombreuses bandes latérales, espacées d'une valeur égale à la valeur de la fréquence de modulation et dont l'amplitude est définie par une fonction relativement complexe appelée fonction de Bessel. Nous ne nous étendrons pas plus ici sur ce sujet car cela n'apporte rien à la compréhension de la suite de l'exposé.

Du côté de l'émetteur

La réalisation d'un émetteur FM peut être fort simple ou très délicate selon sa vocation et les critères de qualité que l'on se fixe. En effet, si vous êtes un fidèle lecteur du haut-parleur, vous avez certainement déjà vu les schémas de ces petits «micros-espions» destinés à être dissimulés afin d'écouter ensuite sur un récepteur muni de la bande FM les conversations qu'ils captent ainsi de manière indiscrète. Même si diverses variantes de schémas existent, tous fonctionnent selon un principe analogue à celui schématisé figure 2. L'oscillateur pilote, c'est à dire celui qui génère la porteuse, est un simple oscillateur L-C. Il suffit donc, comme cela est représenté, de lui

Figure 1 : Spectre type d'une émission modulée en fréquence.



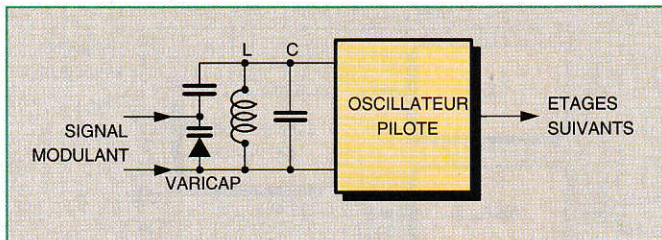


Figure 2 : Principe d'un émetteur FM très simple.

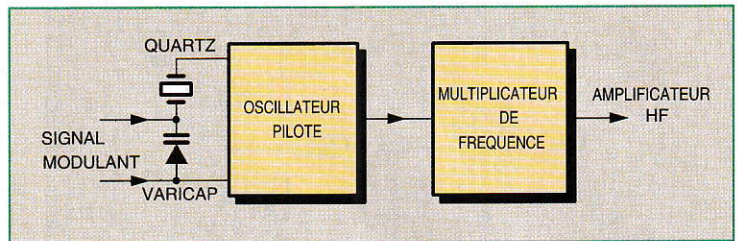


Figure 3 : Procédé utilisable en FM à bande étroite.

adjoindre une diode varicap qui reçoit le signal modulant pour faire varier la fréquence de la porteuse au rythme de ce dernier.

Même si cela fonctionne, c'est un système affublé de multiples défauts ; le principal étant que la fréquence porteuse est très instable puisqu'elle ne bénéficie pas de la précision de fréquence d'un quartz ou d'une boucle à verrouillage de phase. Si d'ailleurs vous avez réalisé un tel montage, vous avez pu constater que sa fréquence se décalait au fil du temps, de la température, de l'environnement de l'émetteur (effet de main) et ainsi de suite. Et encore les récepteurs FM sont-ils munis d'un système dit de contrôle automatique de fréquence capable de rattraper dans une large mesure ce décalage, ce qui le masque artificiellement. Les émetteurs sérieux ne peuvent donc se satisfaire d'un tel procédé, ce qui complique un peu les choses. Dans certains émetteurs de communication simples, ne comportant par exemple qu'un faible nombre de canaux, on fait parfois appel au procédé visible figure 3. On retrouve notre oscillateur mais il est cette fois-ci piloté par quartz et sa stabilité est donc excellente. La varicap placée en série avec le quartz reçoit toujours le signal modulant, et du fait des particularités du quartz, arrive à faire varier très légèrement la fréquence d'oscillation de ce dernier autour de sa valeur de base. Si cet oscillateur est suivi par un nombre suffisant d'étages multiplicateurs de fréquence comme c'est souvent le cas (voir nos précédents articles) on arrive ainsi à obtenir un taux de modulation, certes faible, mais acceptable en FM à bande étroite. Un tel procédé est cependant impossible à utiliser pour les émissions FM à large bande et l'on fait alors souvent appel à un schéma que vous devez commencer à bien connaître : la célèbre boucle à verrouillage de phase ou PLL. On adopte alors le schéma présenté figure 4.

On retrouve bien évidemment le schéma de la boucle à verrouillage de phase «de base», que nous avons vu dans nos numéros de février et mars derniers, puisque c'est elle qui définit la fréquence porteuse de l'émetteur. Mais cette fois-ci on ajoute au signal d'erreur de la boucle, c'est à dire au signal commandant le VCO, le signal modulant. La fréquence du VCO va ainsi varier de manière plus ou moins importante, fonction de ce signal modulant, autour de sa fréquence moyenne définie par la boucle.

Ce procédé fonctionne très bien sous réserve, bien sûr, de dimensionner correctement la boucle et en particulier les différents filtres de la tension d'erreur du VCO. En

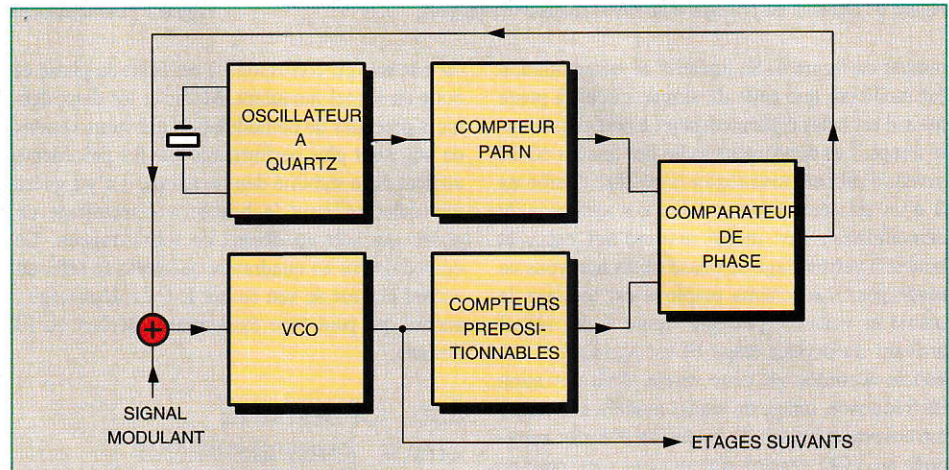


Figure 4 : Modulateur FM à boucle à verrouillage de phase.

effet, il ne faut pas que notre boucle soit trop «énergique» et qu'elle arrive à compenser les écarts de fréquence introduits par la modulation ; écarts que le comparateur de phase voit, lui, comme des erreurs. Si ces conditions sont respectées, on arrive tout de même avec ce schéma à réaliser de la modulation de fréquence de qualité.

La démodulation

Puisque nous savons maintenant moduler, il est logique de s'intéresser à l'opération inverse, réalisée dans les récepteurs, à savoir la démodulation ou l'extraction des informations utiles de notre signal FM. Si l'on ne veut pas trop s'égarer, on peut dire qu'il existe à l'heure actuelle quatre

procédés principaux de démodulation FM dont deux seulement sont encore utilisés de nos jours de façon significative. Le premier, que l'on pourrait appeler le procédé «du pauvre», fait appel tout simplement à la courbe caractéristique d'un circuit accordé parallèle comme le montre la figure 5. En effet, si on «se débrouille» pour décaler l'accord du dernier transformateur FI d'un récepteur, de façon à ce que la fréquence du signal FI ne corresponde plus au maximum de ce circuit oscillant mais se trouve grosso-modo au milieu d'un flanc montant ou descendant, on constate que toute variation de la fréquence FI, et donc toute variation de la fréquence du signal reçu, se traduira par une variation d'amplitude. Un simple démodulateur AM à diode permettra alors de récupérer notre modulation FM.

Ce procédé fonctionne et a fonctionné par le passé, avec diverses variantes destinées à améliorer son comportement. Il est aujourd'hui quasiment abandonné car il présente l'inconvénient majeur d'être assez instable et doit donc faire l'objet de réglages réguliers. On conçoit bien en effet que tout décalage de l'accord du circuit oscillant dans un sens ou dans l'autre peut conduire à une mauvaise démodulation. De plus, si la pente de la courbe d'accord du circuit oscillant n'est pas linéaire, au moins sur la partie utilisée, la démodulation ne peut être non plus linéaire, ce qui engendre des distorsions. Une évolution de ce circuit a fait les beaux jours de nombreux récepteurs FM (dont certains sont d'ailleurs encore en circulation) avec le détecteur de rapport ou discriminateur de Foster-Seeley. Son schéma de principe général vous est présenté à titre d'infor-

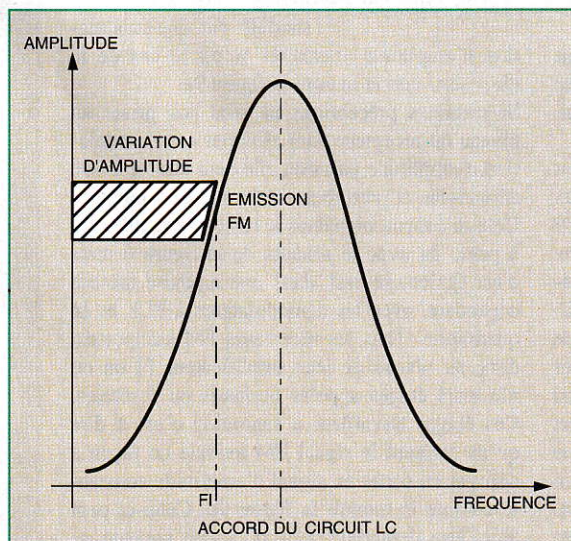


Figure 5 : Démodulation FM utilisant la pente d'un circuit accordé L-C parallèle.

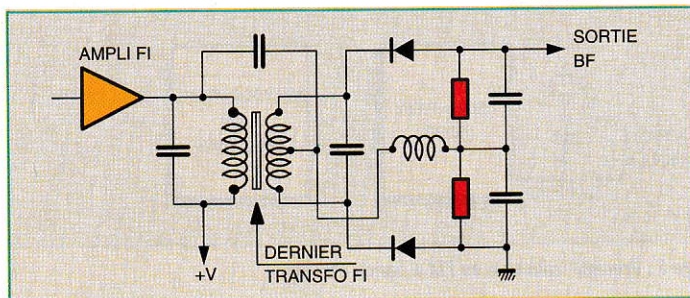


Figure 6 : Schéma de principe d'un démodulateur de rapport.

mation en figure 6. Sa linéarité de démodulation est meilleure que celle du simple circuit à pente mais il est hélas également sujet à dérégage dans le temps. Les dépanneurs radio des années 60-70 savent d'ailleurs tous régler la célèbre courbe en S d'un tel démodulateur ! Un des systèmes de démodulation très utilisés aujourd'hui est... la boucle à verrouillage de phase (mais non vous ne rêvez pas). Le schéma employé est toujours le même et vous est présenté figure 7. Le signal arrivant du dernier étage FI est appliqué à une boucle accordée sur cette valeur. Tout déviation de fréquence, image du signal modulant donc, se retrouvera au niveau de la tension d'erreur appliquée au VCO, tension d'erreur qui sera, pour ce qui est de sa composante alternative, l'image du signal modulant. Remarquez qu'ici, contrairement à ce qui se passe du côté de l'émetteur, nous avons besoin d'une boucle à verrouillage de

«d'erreur» qui correspond à cet écart de phase et donc au signal modulant. Même si les deux derniers procédés de démodulation que nous venons de voir sont plus performants que les précédents au plan de la stabilité dans le temps, il n'y a guère que celui utilisant la boucle à verrouillage de phase qui soit au dessus de tout soupçon. Le démodulateur en quadrature nécessite en effet un accord correct de son circuit L-C de déphasage ; accord qui peut bien évidemment dériver au fil des ans.

La chasse aux parasites

La modulation de fréquence est réputée insensible aux parasites de toutes sortes et, dans le domaine grand public, c'est d'ailleurs ce qui a fait une partie de son succès avant même la meilleure qualité de transmission. Cette insensibilité découle du procédé de modulation lui-même bien sûr mais serait mise à mal s'il n'existait dans les récepteurs FM un circuit adéquat qui a pour nom amplificateur limiteur ou écrêteur. En effet, un parasite, provoqué par exemple par un orage ou par l'allumage d'un véhicule mal réglé, se traduit sur le signal haute fréquence modulé par une modulation

forte activité orageuse par exemple, lorsque le parasite proprement dit a fait disparaître un court instant le signal utile. Il est évident également que si l'amplitude du signal FM reçu est trop faible pour que ce ou ces étages limiteurs puissent effectivement travailler à saturation, la suppression des parasites ne pourra pas avoir lieu. Mais on se trouve dans ce cas en limite de possibilité de réception.

Des modulations bien cachées

Avec cette présentation de la modulation de fréquence, nous avons terminé le tour d'horizon des différents procédés de modulation que l'on peut qualifier d'analogiques. Même s'ils sont tous utilisés pour transmettre directement des informations utiles par la voie des ondes, on les rencontre aussi de manière plus discrète au sein même d'autres émissions. On parle alors de sous-porteuse telle celle utilisée pour transmettre les émissions FM stéréo ou bien encore celle utilisée pour véhiculer le son de la télévision conjointement à l'image. Si vous avez suivi nos exposés sur les différents procédés de modulation, vous verrez, dans notre prochain article, que ces notions de sous-porteuses sont finalement fort simples à appréhender. Et comme cela ne nous demandera que quelques lignes, nous pourrons ensuite vous parler un peu des procédés de modulation «numériques» ou assimilés.

C. Tavernier

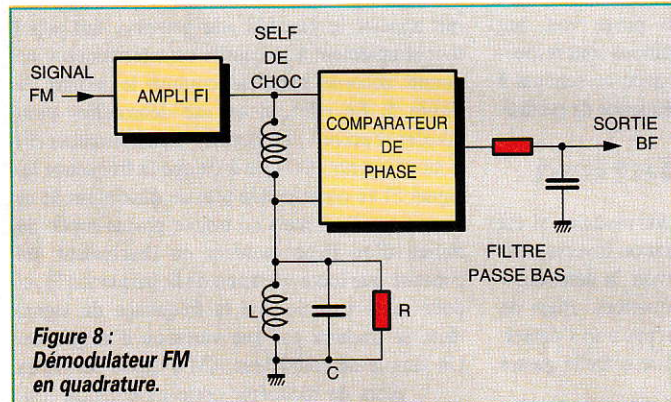


Figure 8 : Démodulateur FM en quadrature.

phase «nerveuse». Il faut en effet qu'elle réagisse très vite à la moindre modification de fréquence du signal qui lui est appliqué. Ce n'est encore qu'une affaire de filtrage de la boucle.

Le dernier procédé de démodulation, très présent dans tous les récepteurs FM qui font appel aux classiques circuits intégrés que sont les CA 3189 et consort, est le démodulateur dit en quadrature. Comme le montre la figure 8, il présente l'avantage de ne faire appel qu'à un simple circuit oscillant amorti dont l'accord n'est pas très critique de surcroît. Son principe est le suivant. Un détecteur ou comparateur de phase que l'on appelle aussi dans ce cas mélangeur équilibré, reçoit d'une part le signal à démoduler et, d'autre part, ce même signal mais dont la phase varie linéairement en fonction de la fréquence par rapport au précédent. Cela s'obtient, comme le montre la figure 8 avec un simple circuit L-C accordé sur la fréquence FI. Dans ces conditions il délivre en sortie un signal

d'amplitude «parasite» (c'est le cas de le dire) ainsi que le montre la figure 9a.

Si certaines précautions ne sont pas prises au niveau du récepteur pour éliminer cette modulation d'amplitude parasite, elle peut arriver à être démodulée et perturber ainsi notre transmission. Cela se conçoit bien dans le cas du démodulateur à pente ou avec le schéma de la figure 6 mais c'est également vrai, dans une moindre mesure cependant, avec les démodulateurs à PLL et en quadrature. Tous les récepteurs FM comportent donc au niveau de leur amplificateur FI un ou plusieurs étages appelés limiteurs ou écrêteurs. Ces étages travaillent à saturation c'est à dire qu'ils écrètent le signal FM modulé de façon à délivrer en sortie un signal d'amplitude constante comme le montre la figure 9b. Celui-ci peut alors être démodulé dans qu'aucun parasite ne soit audible. Tout au plus peut-on percevoir des «trous» dans la modulation, en période de très

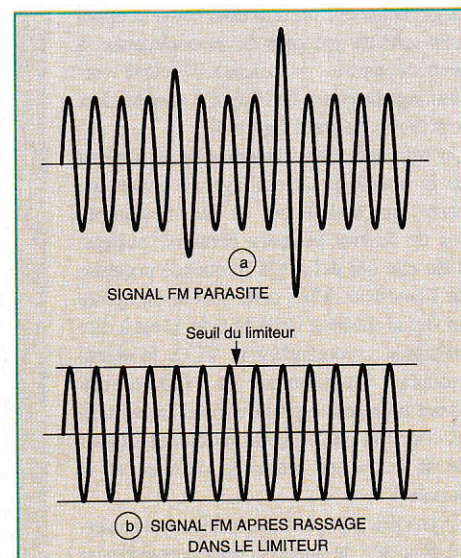


Figure 9 : Mise en évidence de l'intérêt de l'étage limiteur ou écrêteur.