

## Introduction à la modulation

par Bruno VELAY  
Département Mesures Physiques  
IUT - 44600 Saint-Nazaire

---

Les systèmes de télécommunication ont pour objet de transmettre des informations à l'aide d'un signal se propageant dans l'espace ou le long d'une ligne, de son point d'émission à celui de réception. Que ce soit en transmission hertzienne (radio, TV...), en téléphonie ou en transmission de données, le procédé de modulation est la solution considérée comme la plus efficace.

Le signal à transmettre (ou signal modulant) est utilisé pour moduler (faire varier) une des caractéristiques d'un signal porteur, de fréquence plus élevée.

**[i] renvoie le plus souvent à des articles de ce numéro, voir la bibliographie pages 244-245.**

### 1. POURQUOI MODULER ?

Quelques éléments de réponse.

#### 1.1. En radiotransmission

Tout d'abord, rappelons que la voix humaine produit des sons dont les fréquences sont comprises entre 100 et 7500 Hz typiquement. Pour un orchestre la plage est 30/20 000 Hz.

Supposons que l'on veuille transmettre de tels signaux par voie hertzienne.

La transmission directe est impossible, en effet :

- il n'est pas possible à la réception de distinguer ce signal de tout autre signal encombrant la même plage de fréquence (signaux «industriels» à 50 Hz par exemple),
- les dimensions des antennes, de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, auraient des valeurs irréalistes (exemple : pour  $f = 1$  kHz,  $\lambda = CT = \lambda_f = 300$  km),

– de plus, l'éventuelle antenne ne serait pas adaptée pour des signaux de 50 Hz à 15 kHz, par exemple, qui est la plage retenue pour la transmission en radio commerciale.

La modulation utilise des fréquences de porteuses de 100 kHz à 100 MHz typiquement (jusqu'à plusieurs GHz pour les transmissions entre paraboles). Le spectre du signal utile est translaté vers la fréquence de la porteuse, son amplitude relative est réduite d'autant.

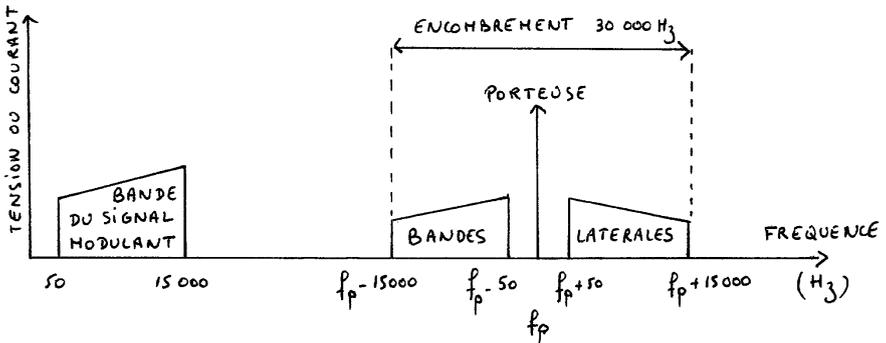


Figure 1 : Spectre d'un signal modulé en amplitude pour une radio commerciale.

Quelques avantages :

- la portée du signal est d'autant plus grande que la fréquence de la porteuse est plus grande,
- les antennes sont d'autant plus petites que la fréquence de la porteuse augmente ; l'amplitude du spectre étant diminuée relativement, l'antenne est mieux adaptée,
- plusieurs signaux utiles peuvent être transportés sur le même faisceau hertzien si leurs porteuses sont de fréquences différentes. Pour être reçu distinctement, les fréquences des porteuses doivent être suffisamment séparées. Il n'y a donc qu'un nombre de places limité sur une bande de fréquence donnée (par exemple : bande FM).

### 1.2. En téléphonie

et plus généralement pour les transmissions par lignes (câbles électriques mais aussi fibres optiques).

La bande passante du téléphone est 300 Hz / 3400 Hz ce qui suffit pour une transmission honorable de la voix.

Le plus souvent, la paire de fils qui relie un usager au central téléphonique est «personnelle», au sens où un seul signal ne transite par ces fils au même instant (usage de commuteur).

Cette situation n'est pas réaliste pour des liaisons entre centraux. Le **multiplexage fréquentiel** (fdm en anglais pour «frequency division multiplex») est conçu pour que de nombreux messages empruntent, sans se mélanger, une liaison entre centraux : chaque signal est décalé dans une bande de fréquence particulière (appelée «canal»), obtenue par modulation BLU.

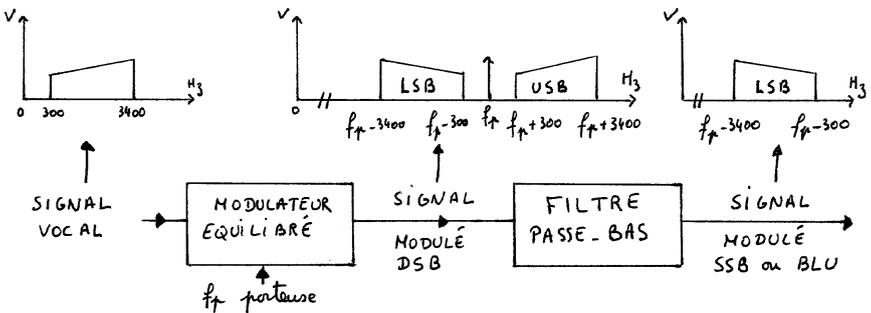


Figure 2 : Translation de fréquence par modulation pour les spectres.

- Sigles : DSB : Double Side Bands - bandes latérales doubles,
- SSB ou BLU : Single Side Band - bande latérale unique,
- LSB : Lower Side Band,
- USB : Upper Side Bande

Plusieurs signaux décalés sont regroupés par addition après décalage selon des fréquences normalisées.

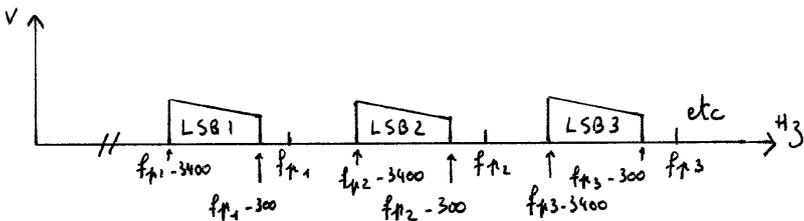


Figure 3 : Signal composite empruntant une ligne multiplexée en fréquence.

Canal n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fréquence de la porteuse	108	104	100	96	92	88	84	80	76	72	68	64
Bande latérale basse (lsb)	104.6 - 107.7	100.6 - 103.7	96.6 - 99.7	92.6 - 95.7	88.6 - 91.7	84.6 - 87.7	80.6 - 83.7	76.6 - 79.7	72.6 - 75.7	68.6 - 71.7	64.6 - 67.7	60.6 - 63.7

**Figure 4 :** Groupe standard de douze canaux bande 60/108 kHz.

Afin de minimiser les nombres de câbles, ces signaux de groupes servent à réaliser des modulations successives (le signal modulé sert lui-même de modulant). Par exemple, cinq groupes permettent de créer un signal de supergroupe (soixante canaux). Cinq signaux de supergroupes produisent un signal de «mastergroup» (trois cents canaux) etc.

Les regroupements compactent les spectres, on arrive à placer dix mille canaux (donc communications simultanées) dans la bande 60 kHz / 40,06 MHz pour une ligne.

La transmission de données binaires par téléphone (données, son ou image numérisés) se fait à l'aide de MODEM. Une méthode, parmi d'autres, est la modulation FSK (pour «frequency shift keying») : concrètement, on attribue à «1» et à «0» des fréquences particulières. Le modem module et / ou démodule le signal transmis selon ce code sous forme d'une succession de fragments de signaux vocaux ne contenant que l'une de ces deux fréquences [1], [2].

La transmission de données binaires par une ligne (entre appareils informatiques) se fait selon des protocoles normalisés (série, parallèle, autre...) [3].

### 1.3. En transmission de mesures

Il est fréquent qu'un capteur soit distant de l'électronique qui fait l'acquisition du signal. Afin d'atténuer les effets du «bruit» qui peuvent être redoutables en milieu industriel (50 Hz et autres), les techniques de modulation analogique sont souvent employées pour améliorer notablement le **rapport signal / bruit** (modulation / démodulation synchrone).

Une fois le signal analogique numérisé [2], les valeurs échantillonnées sont connues sous forme de nombres binaires. La modulation PCM (pour Pulse Code Modulation) consiste à associer une forme particulière d'impulsion à chaque valeur binaire. Le signal numérisé transmis est donc un «train» d'impulsions.

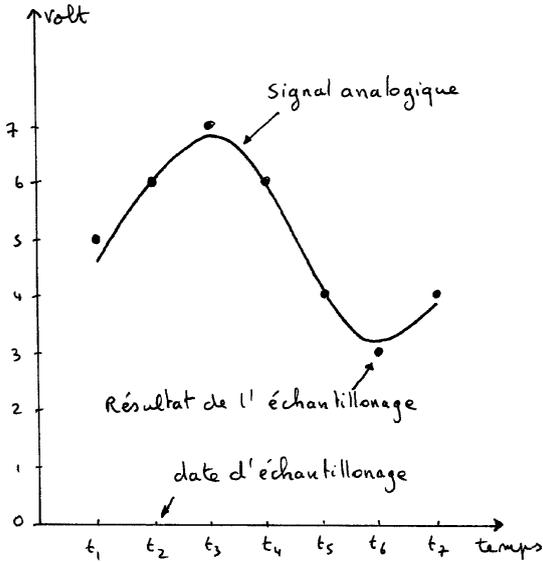


Figure 5a : Signal analogique codé sur trois bits ( $2^3 = 8$ ).

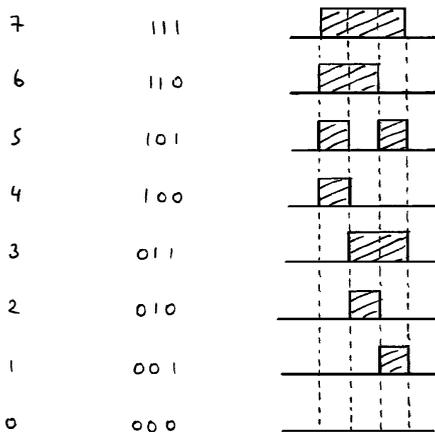


Figure 5b : Forme des impulsions pour un codage sur trois bits.

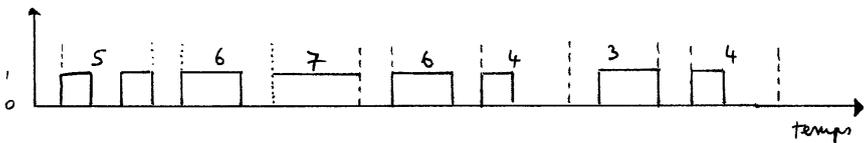


Figure 5c : Train d'impulsions PCM représentant le signal analogique 5a.

Il est fréquent qu'une chaîne d'acquisition de mesures comporte plusieurs capteurs (entrées) pour un seul convertisseur. Le **multi-plexage temporel** (tdm pour «Time Division Multiplex») consiste à relier successivement et périodiquement chacune des entrées à l'unique sortie (l'analogie la plus simple est la composition d'un train dans une gare de triage) [4].

Le multiplexage est de plus en plus employé pour remplacer les faisceaux de fils à bord des automobiles, avions...

## 2. QUE MODULER ?

Le signal à transmettre (signal modulant) est utilisé pour faire varier au cours du temps l'une des caractéristiques du signal porteur.

Si le signal porteur est sinusoïdal  $p(t) = A_p \cos(2\pi f_p t + \varphi)$  il existe trois possibilités :

**a - modulation d'amplitude**<sup>1</sup> :  $A_p$  varie au cours du temps, avec  $f_p$  et  $\varphi$  constantes. On peut moduler en obtenant deux bandes latérales (DBS, Double Side Band) avec ou sans porteuses, ou une seule bande latérale (SSB, Single Side Band ou BLU, Bande Latérale Unique),

**b - modulation de fréquence**<sup>2</sup> :  $f_p$  varie au cours du temps,  $A_p$  et  $\varphi$  restent constants,

**c - modulation de phase** :  $\varphi$  varie au cours du temps. Les modulations de fréquence et de phase consistent toutes deux à moduler l'angle de phase  $2\pi f_p t + \varphi$ .

Si la porteuse est constituée d'une succession d'impulsions en créneau, il existe différentes solutions de **modulations d'impulsions** :

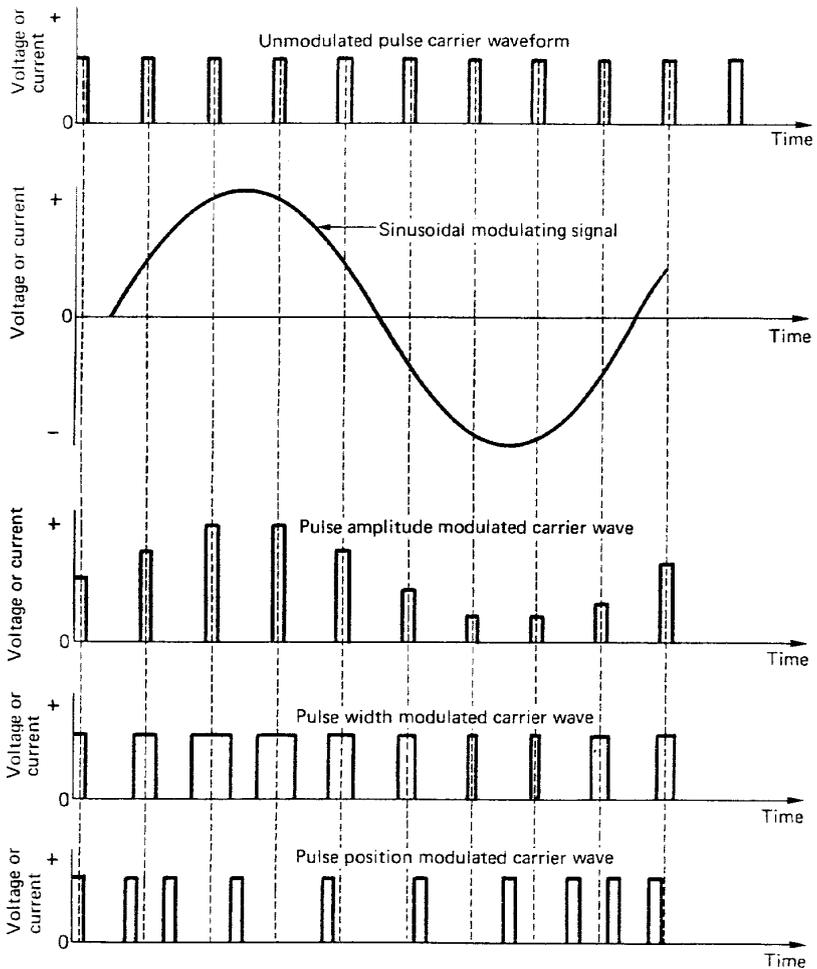
**d - modulation d'amplitude d'impulsion** (PAM pour «Pulse Amplitude Modulation»),

**e - modulation de largeur d'impulsion** (PWM pour «Pulse Width modulation» ou MLI en français) [5],

**f - modulation de position d'impulsion** (PPM pour «Pulse Position Modulation»),

1. AM pour «Amplitude Modulation».

2. FM pour «Frequency Modulation».



**Figure 6 :** Modulation d'impulsions.

Extrait : Telecommunication Systems - Ph. SMALE, Pitman Editor).

**g - modulation codée d'impulsion** (PCM pour «Pulse Code Modulation») voir 1.3.,

**h - modulation FSK et PSK** voir 1.2. et [1].

Il n'y a donc que l'embaras du choix dans la panoplie de l'ingénieur.

### 3. MODULER EN AMPLITUDE

Pour se replacer dans le cadre des communications radio, supposons que les signaux modulants et porteurs soient tous deux sinusoidaux ; soit  $e(t) = A_m \cos 2\pi f_m t$  et  $p(t) = A_p \cos 2\pi f_p t$ .

En général, on recherche la condition  $f_p \gg f_m$ , un facteur 100 convenant tout à fait en pratique. Un facteur 10 à 20 peut suffire pour des expériences didactiques.

Il y a trois manières de procéder :

#### 3.1. Modulation d'amplitude à porteuse supprimée

On dit aussi «sans porteuse». Le procédé est équivalent en fait à une multiplication de la porteuse par la modulante. On procède le plus souvent à l'aide d'un modulateur équilibré constitué d'un simple **multiplieur analogique** (conseil : AD633 de Analog Device  $\approx 50$  F.) [6], [7].

Le signal modulé est :

$$s(t) = K A_p \cos 2\pi f_p t \times A_m \cos 2\pi f_m t$$

$$s(t) = \frac{K A_p A_m}{2} \left[ \cos 2\pi (f_p + f_m) t + \cos 2\pi (f_p - f_m) t \right].$$

Le spectre n'est donc constitué que de deux sinus de fréquences  $f_p + f_m$  et  $f_p - f_m$ , de même amplitude  $\frac{K A_p A_m}{2}$ .

La démodulation, par multiplication et filtrage passe-bas implique, à la réception, de disposer d'un oscillateur local parfaitement synchrone à la porteuse émise. Le défaut de synchronisation est fréquent («Fading»).

Sinon il faut reconstituer la porteuse par une détection synchrone.

L'avantage principal est que la puissance fournie par l'émetteur n'est consacrée qu'au signal utile (pas de pertes pour transmettre la porteuse).

### 3.2. Modulation d'amplitude avec porteuse

Pour éviter d'avoir à reconstituer la porteuse à la réception, celle-ci est ajoutée au signal précédent. Le signal modulé devient [6], [7], [8] :

$$s(t) = A_p \cos 2\pi f_p t + K A_p A_m \cos 2\pi f_p t \cos 2\pi f_m t$$

$$s(t) = A_p \cos 2\pi f_p t \left( 1 + m \cos 2\pi f_m t \right)$$

$m = K A_m$  est l'indice (ou taux) de modulation, noté aussi  $I$ .

$$s(t) = A_p \cos 2\pi f_p t + \frac{m}{2} A_p \left[ \cos 2\pi (f_p + f_m) t + \cos 2\pi (f_p - f_m) t \right]$$

Le spectre du signal AM contient en plus du spectre précédent,  $\left( \frac{m A_p}{2}, f_p + f_m \right)$  et  $\left( \frac{m A_p}{2}, f_p - f_m \right)$ , une raie correspondant à la porteuse, assez intense ( $A_p, f_p$ ).

La puissance d'une telle source modulée AM, chargée par une résistance  $R$  est  $\frac{A_p^2}{2R} \left( 1 + \frac{m^2}{2} \right)$ .  $m$  étant souvent inférieur à 1, la puissance fournie par l'émetteur sert essentiellement à transmettre la porteuse (voir 3.1.).

Par contre le déplacement du spectre du signal modulant autour de  $f_p$  permet de s'adapter aux dispositifs de transmission efficaces.

La production d'un signal AM est essentiellement une opération **non linéaire** (création de raies à une fréquence autre que  $f_m$  et  $f_p$ ) [6].

On procède généralement :

- par **modulation équilibrée**, essentiellement avec un multiplieur / sommateur analogique intégré. Pédagogiquement, le procédé est simple à réaliser et interpréter. Le composant AD633 de Analog Device est facile à mettre en œuvre et de coût raisonnable ( $\approx 50$  F.) [7], [17].

- par **modification du point de repos d'un élément non linéaire**, par exemple une diode de signal [6] [9]. Didactiquement le procédé est plus délicat car l'opération non linéaire (par exemple «partie positive») génère un spectre harmonique plus riche que nécessaire. Une opération de filtrage sélectif passe-bande, centré sur  $f_p$ , est nécessaire. C'est moins immédiat à expliquer en TS.

La démodulation du signal AM peut être obtenue :

- par un **démodulateur à diode** qui détectera l'enveloppe du signal modulé lorsque  $m < 1$  [6], [7], [8]. Didactiquement, c'est le plus simple, à condition d'être rigoureux dans la présentation du filtrage mis en œuvre. Une diode signal genre 1n4148 convient pour des signaux pas trop petits (on peut envisager d'utiliser une diode Germanium ou une «diode sans seuil» à Ampli Op à condition de prendre garde à la limite en fréquence de celui-ci) ;
- par **détection synchrone** [7]. C'est l'idéal pour des signaux reçus faibles, on peut l'améliorer par une boucle à verrouillage de phase (PLL pour «Phase Lock Loop») [8]. Ce type de montage n'est pas exigible en TS ;
- par détection **superhétérodyne**. Malgré son nom compliqué, le procédé est universellement employé pour les postes de radio du commerce. La mise en œuvre du procédé est facilitée par l'existence de circuits intégrés spécialisés (par exemple TBA 570/690/700, TCA 440, TDA 1050/4001) auxquels il suffit d'ajouter un circuit L-C d'accord, une amplification HF et une alimentation continue.

Le procédé est décrit dans [10], la visite d'un poste de radio AM du commerce est proposée.

Enfin on notera que le rapport signal / bruit est d'autant meilleur que  $m$  est grand.

### 3.3. Modulation d'amplitude BLU

Par filtrage (avec des filtres céramiques à haut coefficient de qualité), il est possible de supprimer l'une des deux bandes latérales du spectre du signal AM (cf. figure 2). Il ne reste qu'une **Bande Latérale Unique** (BLU ou SSB pour Single Side Band). Le plus souvent, on supprime aussi la porteuse (voir 1.2. par exemple).

Les principaux avantages sont :

- un encombrement fréquentiel moitié du signal AM usuel, généralement réduit au spectre du signal utile (d'où l'emploi en multiplex par répartition de fréquence, en téléphonie),
- une puissance fournie par l'émetteur entièrement transmise au signal utile (d'où l'emploi en radiocommunication marine longue distance).

Pour faciliter la démodulation, il est courant d'émettre une **fréquence pilote** (souvent la porteuse fortement atténuée).

### 3.4. Signaux modulants

De nombreux signaux BF peuvent être employés issus :

- de générateur BF,
- d'oscillateurs sinusoidaux ou non [7],
- de micro [7],
- de baladeur (par un simple jack et deux fils),
- de circuits intégrés musicaux [11].

### 3.5. Procédé de transmission

On peut imaginer transmettre le signal modulé :

- **par voie aérienne**, à l'aide d'un fil formant antenne [6], [7] les conditions de choix d'une antenne sont vues dans l'Annexe de [10], due à R. MOREAU (1979),
- **par voie lumineuse**, air ou fibre [11], [12],
- **par onde ultrasonore** [7].

On notera que pour améliorer l'efficacité de la transmission par antenne, une technique consiste à charger le modulateur par un circuit RLC accordé (en résonance d'intensité) pour un champ émis optimal.

L'emploi d'un résonateur ultrasonore repose sur la même idée (modèle équivalent RLC série // Co).

Enfin [13] regroupe des données numériques sur différentes fréquences d'émetteurs.

## 4. MODULER EN FRÉQUENCE - WOBULER [19]

### 4.1. Modulation de fréquence, modulation de phase

- Comme vu précédemment en 2., le signal porteur  $p(t)$  peut voir son **angle de phase** varier au cours du temps, à amplitude  $A_p$  constante :

$$p(t) = A_p \cos \theta_p(t)$$

on pose

$$\theta_p(t) = 2\pi f_p t + \varphi(t)$$

- **La fréquence instantanée** du signal porteur modulé est :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \left| \frac{d\theta_p(t)}{dt} \right| = \left| f_p + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \right| \approx f_p + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

car le second terme est généralement très petit vis-à-vis de  $f_p$ .

- Il y a deux manières de moduler (figure 7) :

– **modulation de phase** :  $\varphi(t)$  est proportionnelle au signal modulant  $e(t)$  :

$$\varphi(t) = k e(t)$$

– **modulation de fréquence** : la partie variable de la fréquence instantanée est proportionnelle au signal modulant :

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} \times k \times e(t)$$

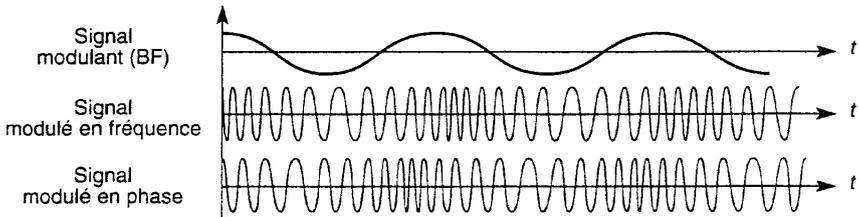


Figure 7

### • Vocabulaire spécifique

On suppose le signal modulant sinusoïdal :  $e(t) = A_m \cos 2\pi f_m t$

- le signal modulé s'écrit :  $s(t) = A_p \cos [2\pi f_p t + \beta \sin 2\pi f_m t]$ ,
- la fréquence instantanée est :  $f(t) = f_p + \beta f_m \cos 2\pi f_m t$ ,
- $\Delta f = \beta f_m$  est l'**excursion** (ou déviation) **de fréquence**,
- $\beta$  est l'**indice de modulation** (ou excursion de phase).

#### 4.2. Spectre du signal modulé sinusoïdalement en fréquence

Bien que la fréquence instantanée soit comprise entre  $f_p + \Delta f$  et  $f_p - \Delta f$ , son spectre n'est pas restreint à cet intervalle.

Des exemples de spectres sont donnés dans l'article de R. MOREAU [15]. Ils sont compatibles avec la décomposition suivante [14] :

$$s(t) = A_p \left[ J_0(\beta) \cos 2\pi f_p t + J_1(\beta) \left\{ \cos 2\pi (f_p - f_m) t - \cos 2\pi (f_p + f_m) t \right\} + J_2(\beta) \left\{ \cos 2\pi (f_p - 2f_m) t + \cos 2\pi (f_p + 2f_m) t \right\} + J_3(\beta) \left\{ \cos 2\pi (f_p - 3f_m) t - \cos 2\pi (f_p + 3f_m) t \right\} + \dots \right]$$

Les fonctions  $J_0(\beta)$ ,  $J_1(\beta)$ ,  $J_2(\beta)$ ... sont les fonctions de Bessel, données par des tables, voir figure 8.

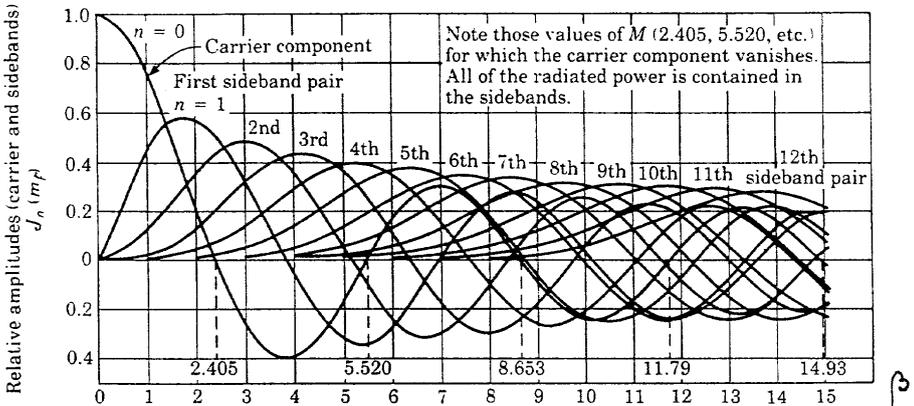


Figure 8 : Extraits d'une table [18].

Le spectre contient donc une raie à la fréquence de la porteuse (d'amplitude  $A_p |J_0(\beta)|$ ) et une infinité de raies symétriques à  $f_p \mp n f_m$  (d'amplitudes  $A_p |J_n(\beta)|$ ).

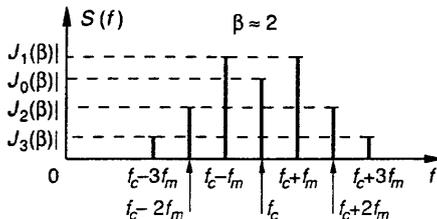


Figure 9 : Exemple :  $\beta \approx 2$  [14].

**Remarque :** La valeur particulière  $\beta = 2,4$  ;  $J_0(2,4) = 0$  a des conséquences pratiques [16].

#### 4.3. Encombrement spectral : bande de fréquence B

En principe, les spectres ont une infinité de raies, mais  $|J_n(\beta)|$  décroît vite avec n. Le signal transmis en FM peut être limité à une bande donnée de fréquence [16].

98 % de la puissance du signal est transmise dans la bande  $f_p \mp (\beta + 1) f_m$  d'où la règle de Carson :

$$B = 2 (\beta + 1) f_m = 2 (\Delta f + f_m).$$

Le rapport signal / bruit est amélioré en augmentant  $\Delta f$ .

**Remarque :** Lorsque  $\beta \gg 1$ , la bande fréquentielle dépend de  $f_m$  en modulation de phase. Elle n'en dépend plus, ce qui est un avantage, en FM.

#### 4.4. Puissance transmise par un signal FM

Le générateur FM, chargé par R, dissipe la puissance moyenne

$$P = \frac{\overline{s^2(t)}}{R} = \frac{A_p}{2R} \left[ J_0^2(\beta) + 2 J_1^2(\beta) + 2 J_2^2(\beta) + \dots \right] = \frac{A_p}{2R} \text{ (grâce à une propriété des fonctions de Bessel [...]) = 1).$$

Il s'agit là d'une propriété importante : P ne dépend pas de l'indice de modulation.

#### 4.5. Production du signal FM

a - Par modulation des paramètres d'un circuit oscillant accordé (diode varicap, inductance saturable).

b - Par un oscillateur commandé en tension (VCO : voltage controlled oscillator). C'est la méthode typique de la wobulation (cf. 4.7.).

c - Par la méthode d'Armstrong [14] (combinaison de fonctions intégration, multiplication, addition, déphasage bien choisies). On est amené à faire dans la pratique des multiplications de fréquence.

#### 4.6. Démodulation d'un signal FM

- a - Par dérivation et détection d'enveloppe (à diode).
- b - Par déphasage.
- c - Par PLL (Boucle à verrouillage de phase).

#### 4.7. Wobuler avec VCO

L'étude d'un quadripôle (par exemple un filtre ou un amplificateur) implique la détermination de sa **réponse en fréquence**. Le wobulateur est l'outil approprié pour obtenir une telle courbe à l'oscilloscope puisqu'il s'agit d'un générateur de signaux dont on fait varier périodiquement la fréquence sur l'intervalle  $[f_0 - \Delta f, f_0 + \Delta f]$ .  $f_0$  est la fréquence centrale,  $\Delta f$  est l'excursion en fréquence.

On aura reconnu un cas particulier de modulation de fréquence où le signal wobulé est la porteuse modulée en fréquence. Le signal modulant ne contient pas d'information utile à transmettre. Il est choisi périodique pour que la fréquence varie périodiquement (problème de la synchronisation de l'oscilloscope analogique). Il est choisi le plus souvent en forme de rampe ou de triangle pour que  $\frac{df}{dt}$  soit constant et que l'axe horizontal de la représentation en fréquence soit gradué linéairement. Il est envisageable d'effectuer un balayage logarithmique (courbe de Bode...).

On a le plus souvent recours à un **oscillateur commandé en tension** (VCO pour Voltage Controlled Oscillator). Qu'il s'agisse d'un montage personnel ou d'un générateur BF du commerce, le circuit intégré «générateur de signaux» voit la fréquence des signaux sur ses broches de sortie (carré, triangle, sinus) varier avec le potentiel appliqué sur la broche «polarisation FM». Typiquement une variation de 1 V, sur cette broche, fait varier la fréquence d'une décade. Il faut bien sûr commencer les essais en appliquant une tension constante.

Les circuits intégrés les plus célèbres, souvent utilisés dans les BF du commerce, sont ICL 8038 (chez Intersil), XR2206/07/09 (chez Exar), NE566 (chez RTC). Ils sont peu coûteux ( $\approx 60$  F). Un schéma performant est donné en [15]. Il faut les utiliser pour obtenir facilement des résultats d'appareils quasi-professionnels.

Cependant, il est possible de faire moins bien mais plus simple avec des schémas à ampli op.

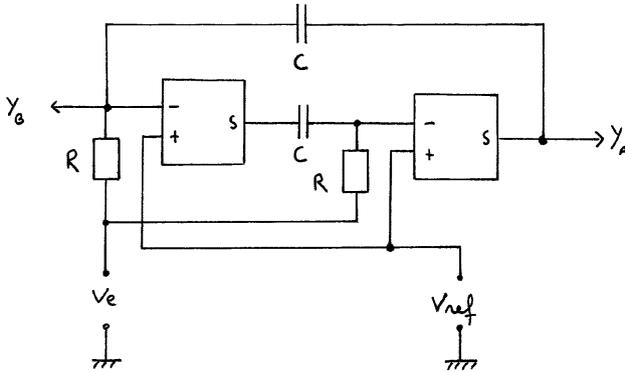


Figure 10 : VCO signal carré.

Par exemple, ce générateur de tension **carrée** modulable est conçu sur la base d'une bascule astable.

Exemple :  $R = 10 \text{ k}\Omega$   $C = 10 \text{ nF}$   $V_e = 4,5 \text{ V}$   $V_{ref} \approx 1,5 \text{ V}$

on montre que : 
$$T = 2 RC \ln \left( \frac{2 V_{sat}}{V_e - V_{ref}} - 1 \right)$$

Un exemple de VCO triangle didactique est donné dans ce numéro [19].

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. ESQUIEU : *Transmissions numériques*, dans le prochain B.U.P. n° 772.
- [2] J. ESQUIEU : *Traitement numérique du signal*, B.U.P. n° 754, mai 1993.
- [3] P. DONNAT : *Utilisation de la liaison série pour la transmission de données*, B.U.P. n° 754, mai 1993.
- [4] P. FRÉTAUD, J.P. HUMEAU et B. VELAY : *Acquisition numérique automatisée d'une tension*, B.U.P. n° 754, mai 1993.
- [5] La M.L.I. n° 0 de la revue 3EI, voir B.U.P. n° 767, page 1460, octobre 1994.

- [6] J. TABUTEAU : *Modulation d'amplitude, démodulation*, dans ce numéro page 263.
- [7] J.-C. FROMONT, J.-Y. GANCEL et P. HALLIER : *Modulation d'amplitude, à propos d'une maquette didactique...*, dans ce numéro page 319.
- [8] R. LE GOFF : *Modulation d'amplitude, détection synchrone*, dans ce numéro page 307.
- [9] B. VELAY : *Simulation d'une modulation d'amplitude avec le logiciel PSPICE*, dans ce numéro page 283.
- [10] J.-C. FROMONT, J.-Y. GANCEL, P. HALLIER et J.-P. LEMEURE : *Récepteur radio AM, visite guidée d'un récepteur super-hétérodyne*, dans ce numéro page 349.
- [11] B. FAGOT : *Réception de sources de lumière modulées*, dans le prochain B.U.P. n° 772.
- [12] R. ALLARD : *Transmission de l'information par infrarouge*, B.U.P. n° 747, octobre 1992
- [13] A. NOËL : *Quelle fréquence avez-vous dit ?*, dans ce numéro page 249.
- [14] F. MANNEVILLE et J. ESQUIEU : *Électronique BTS*, tome 2, chapitre 5, Dunod.
- [15] R. KERAVEC et R. MOREAU : *Moduler en fréquence - Wobuler, Morceaux choisis*, dans le prochain B.U.P. n° 772.
- [16] J. ESQUIEU : *Transmission FM stéréophonique*, dans le prochain B.U.P. n° 772.
- [17] B. FAGOT et D. CHATAIN : *Multiplieur analogique AD633JN*, dans ce numéro page 347.
- [18] R. SCHENBECK : *Electronic communications, modulation and transmission p'83*, Merril Publisher.
- [19] B. VELAY : *Simulation d'une modulation de fréquence avec le logiciel PSPICE*, dans le prochain B.U.P. n° 772.

***Annexe***  
***Construction d'un générateur modulable***  
***en amplitude et en fréquence***

par R. MOREAU<sup>3</sup>

---

Les expériences précédentes supposent que l'on dispose d'une telle source. Les générateurs de fonctions actuels sont généralement modulables en fréquence (entrée V.C.O.), mais il en existe peu qui soient également modulables en amplitude. De toute manière, il faut deux générateurs pour réaliser chacune de ces deux opérations et cela peut se révéler un peu excessif. Le schéma représenté sur la figure 11 est celui d'un générateur de fonctions construit autour du circuit intégré XR-2206 qui est très courant et (donc) peu coûteux.

La fréquence de ce générateur est inversement proportionnelle à la capacité que l'on place entre ses bornes 5 et 6, et elle est proportionnelle à l'intensité du courant qui pénètre par sa borne n° 7.

L'amplitude de la tension de sortie, elle, est réglée par la tension que l'on applique sur la borne n° 1.

Le circuit intégré TL 082 est, en fait, un ensemble de deux amplificateurs opérationnels. L'un sert à mettre en forme la tension modulante appliquée à la borne n° 1 du XR-2206 à partir du signal d'entrée, dans le cas où l'on désire réaliser une modulation d'amplitude, l'autre sert d'adaptateur d'impédance.

Un inverseur I permet, à partir du même signal modulant, d'obtenir une tension modulée en amplitude ou en fréquence.

Le potentiomètre P<sub>1</sub> permet de régler la fréquence de la porteuse. Une fréquence de 40 kHz, compte tenu des possibilités de l'analyseur, est excellente. Le potentiomètre P<sub>2</sub> permet de faire varier légèrement la valeur de la faible composante continue que l'on incorpore au signal de sortie. Cela permet de repérer la raie de fréquence nulle, et sert donc de marqueur.

L'amplitude du signal de sortie est voisine de 0,5 V, elle est donc adaptée à l'analyseur.

---

3. Extrait du B.U.P. n° 675, juin 1985, page 1168.

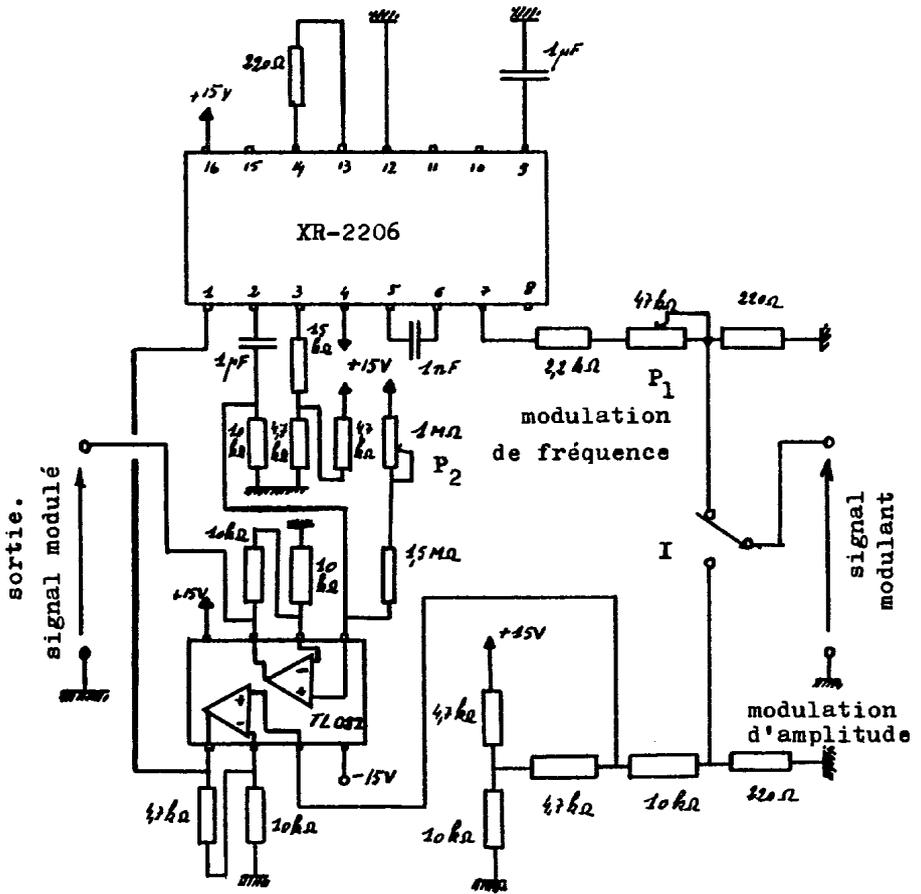


Figure 11