

Modulations

par René TOURNIER

Lycée Charles Coulomb - 16000 Angoulême

Dans la partie «Télécommunications» de l'Enseignement de Spécialités en Terminale Scientifique est prévue l'étude des modulations d'amplitude et de fréquence.

Nous proposons ici, pour chacune de ces modulations, une approche théorique ainsi que des activités expérimentales qui nous paraissent pouvoir être présentées à des élèves de Terminale Scientifique.

Ce document a été utilisé lors de stages de formation qui se sont déroulés dans l'Académie de Poitiers au mois de mai 1994 sous la responsabilité de Monsieur l'Inspecteur Pédagogique Régional R. VOGEL.

REMARQUES PRÉALABLES

a - Pourquoi module-t-on un signal ?

Une boutade consisterait à répondre pour le démoduler.

Soit une dizaine de personnes s'adressant au même interlocuteur sur des sujets aussi variés que la botanique, les dernières vacances, le théorème de Bernouilli, l'augmentation des impôt locaux,... Pauvre récepteur ! Comment choisir l'information ? Notre oreille n'a pas la possibilité de sélectionner un émetteur plutôt qu'un autre.

Transposons cette image en télécommunication : plusieurs stations souhaitent communiquer avec l'auditeur. Elles vont donc émettre (des programmes très divers). L'information constituera le **signal modulant** (basse fréquence ou BF correspondant à la voix humaine ou à la musique dans le cas d'une émission radio). Cette information sera véhiculée par une **porteuse** (signal de haute fréquence ou HF).

Il suffit :

– d'un récepteur,

- de sélectionner un émetteur (HF modulé par BF),
- de démoduler pour que l'auditeur reçoive **une** information.

Si elle ne lui donne pas satisfaction, il a toujours la possibilité de changer sa sélection. ...Il y a là, dans ce schéma, une multitude d'informations qui circulent et qui peuvent être reçues.

En conclusion, il y a modulation pour pouvoir transmettre efficacement davantage d'informations.

b - Tout signal transmis ou modulé peut se mettre sous la forme

$$s(t) = S(t) \cdot \cos [\theta(t)] = S(t) \cdot \cos [\Omega t + \varphi(t)]$$

$\theta(t)$ est la phase instantanée.

Deux cas peuvent se présenter :

- $S(t)$ est une fonction du temps et $\varphi(t)$ est une constante,
- $S(t)$ est une constante et $\varphi(t)$ est une fonction du temps.

Dans le premier cas on parlera de **modulation d'amplitude**, dans le second **de modulation de fréquence ou de phase**.

De plus, on définira la pulsation (et par suite la fréquence) par la dérivée par rapport au temps de la phase instantanée soit :

$$\frac{d\theta}{dt} = \Omega + d[\varphi(t)]/dt.$$

1. MODULATION D'AMPLITUDE

a - Principe

Soient deux tensions $u(t)$ et $v(t)$ définies comme suit :

$$u(t) = U_0 + U_m \cos \omega t \quad v(t) = V_m \cos \Omega t$$

$u(t)$ est donc un signal sinusoïdal avec une composante continue : c'est le **signal modulant**.

$v(t)$ est un signal sinusoïdal (sans composante continue) : c'est la **porteuse**.

La fréquence F de $v(t)$ est très supérieure à la fréquence f de $u(t)$.

En faisant le produit de ces deux tensions, on obtient :

$$\begin{aligned} s(t) &= k u(t) v(t) \\ &= k \left(U_0 + U_m \cos \omega t \right) \left(V_m \cos \Omega t \right) \\ &= k U_0 \left(1 + U_m/U_0 \cos \omega t \right) \left(V_m \cos \Omega t \right) \end{aligned}$$

soit : $s(t) = A (1 + m \cos \omega t) \cos \Omega t$

avec : $A = k U_0 V_m$ et $m = U_m/U_0$

m est appelé le **taux de modulation**.

L'amplitude de la fonction modulée est : $S_m = A (1 + m \cos \omega t)$; c'est bien une fonction du temps qui peut prendre deux valeurs extrémales :

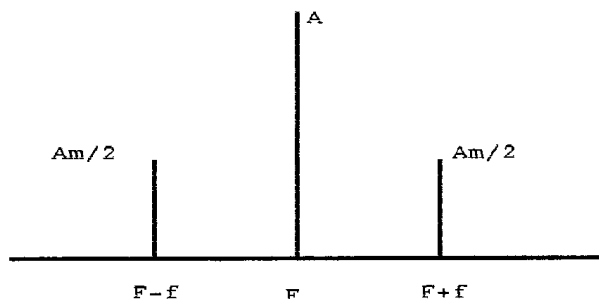
$$A (1 + m) \quad \text{quand} \quad \cos \omega t = 1$$

$$A (1 - m) \quad \text{quand} \quad \cos \omega t = -1$$

Le développement de $s(t)$ conduit à :

$$s(t) = A \cos \Omega t + 1/2 A m \cos (\Omega + \omega) t + 1/2 A m \cos (\Omega - \omega) t$$

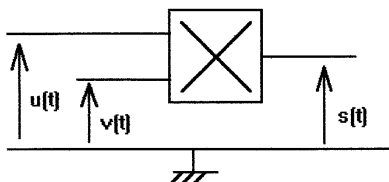
Les termes de cette somme ont respectivement pour fréquences F , $F + f$ et $F - f$; si bien que le spectre de fréquences a l'allure suivante :



b - Manipulation

Les deux signaux sont délivrés par deux GBF.

Le produit des deux signaux sera réalisé par un multiplieur AD534 JD.



Donner, par exemple, à l'amplitude U_m du signal modulant la valeur 3 V, à sa composante continue U_0 la valeur 5 V et régler sa fréquence à 100 Hz.

Donner à l'amplitude V_m de la porteuse la valeur 7 V et régler sa fréquence à 100 kHz.

Appliquer les deux signaux aux entrées du multiplieur.

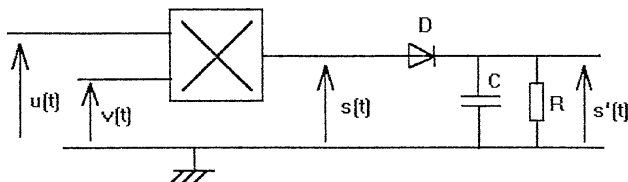
Observer à l'oscilloscope (2 V/div - 2 ms/div) le signal $s(t)$. Synchronisation externe sur la basse fréquence. Voir annexe 1 (la fréquence de la HF a été ramenée à 1 kHz à cause de la capacité mémoire et de la fréquence d'échantillonnage de l'oscilloscope).

Remarques :

- Si le niveau de la basse fréquence est trop important, on obtient une modulation négative. Voir annexe 2 (même remarque que pour l'annexe 1) ;
- Faire varier les différents niveaux (y compris l'offset de la BF), faire varier les fréquences : observer.

c - Démodulation

La démodulation est la récupération du signal basse fréquence.



Multiplieur AD534 JD
 Diode au silicium (1N 4148)
 Condensateur plastique de 22 nF
 Résistance de 47 k Ω - 0,25 W

Elle s'obtient, par exemple, à l'aide du montage suivant que l'on appelle «**montage détecteur de crêtes**» ou «**démodulateur à diode**».

La constante de temps du montage est :

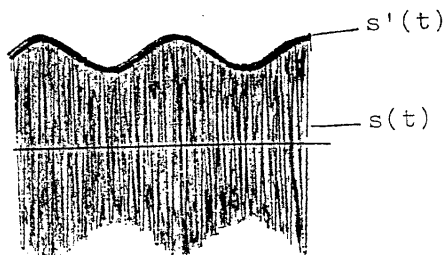
$$\tau = RC = 47\,000 \times 22 \times 10^{-9} = 1 \text{ ms.}$$

Elle est très supérieure à la période de la porteuse :

$$T_{HF} = 1/F = 1/(100 \cdot 10^9) = 0,01 \text{ ms.}$$

Fonctionnement (en supposant la diode idéale) :

- Quand le signal $s(t)$ modulé est positif, la diode est passante et le condensateur se charge. La tension maximale à ses bornes est l'amplitude de la tension $s(t)$.
- Quand la tension $s(t)$ diminue, le condensateur ne peut se décharger que dans la résistance R . Comme la constante de temps du circuit de



décharge est très grande par rapport à T_{HF} , le condensateur n'a pas le temps de se décharger dans R avant le début de la charge suivante, si bien que la tension aux bornes du condensateur a l'allure suivante :

Remarque : conditions d'une bonne démodulation :

1. $\tau > T_{HF}$ (on peut le montrer expérimentalement en faisant varier la fréquence de la porteuse).
2. $T_{BF} \gg \tau$ (faire varier la fréquence du signal modulant).
3. L'amplitude du signal modulé S_m ne doit jamais descendre en dessous du seuil de la diode. Pour le montrer expérimentalement, on peut :
 - soit diminuer U_0 en agissant sur le bouton d'OFFSET du GBF,
 - soit diminuer V_m , amplitude du signal haute fréquence.

2. MODULATION DE FRÉQUENCE

a - Principe

Soit un signal à transmettre $u(t)$: ce sera le **signal modulant** (information à transmettre).

Soit un signal d'amplitude constante A_0 et de la forme :

$$s(t) = A_0 \cdot \cos [\theta(t)] = A_0 \cdot \cos \left[\Omega_0 t + \varphi(t) \right].$$

Ce sera le **signal modulé**.

Sa pulsation instantanée est $\Omega(t) = d[\theta(t)]/dt = \Omega_0 + d[\varphi(t)]/dt$.

Deux cas sont envisagés :

- $\varphi(t) = k \cdot u(t)$: on parlera de **modulation de phase** (non étudiée ici),
- $\varphi(t) = 2\pi k \int_0^t u(t) \cdot dt$: on parlera de **modulation de fréquence**.

Remarque : dans ce cas on peut écrire $d[\varphi(t)]/dt = 2\pi k \cdot u(t)$.

L'expression générale du signal modulé en fréquence sera par conséquent :

$$s(t) = A_0 \cdot \cos \left[\Omega_0 t + 2\pi k \int_0^t u(t) \cdot dt \right]$$

Si le signal modulant est sinusoïdal de la forme $u(t) = U_m \cos \omega t$ alors :

$$s(t) = A_0 \cdot \cos \left[\Omega_0 t + 2\pi \frac{k \cdot U_m}{\omega} \sin \omega t \right].$$

On pose :

- $2\pi k U_m = \Delta \Omega$ appelé «**excursion crête de pulsation**»,
- et $k U_m = \Delta F$ appelé «**excursion crête de fréquence**».

La pulsation instantanée du signal modulé $s(t)$ est :

$$\Omega(t) = d[\theta(t)]/dt = \Omega_0 + \Delta \Omega \cdot \cos \omega t$$

la fréquence instantanée étant $F(t) = F_0 + \Delta F \cdot \cos \omega t$.

$2\pi \frac{k \cdot U_m}{\omega} \sin \omega t$ est appelé **déviatio**n de phase de valeur maximale $2\pi k U_m / \omega = \beta$.

β est appelé **indice de modulation**.

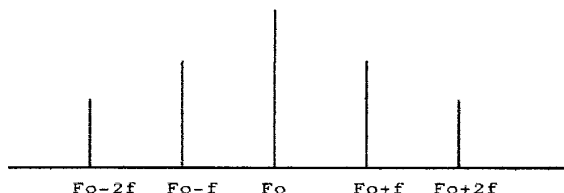
$2\pi k U_m / \omega = \Delta F / f$ et par suite $\Delta F = \beta \cdot f$.

L'expression générale du signal modulé est :

$$s(t) = A_0 \cdot \cos [\Omega_0 t + \beta \sin \omega t].$$

Remarques :

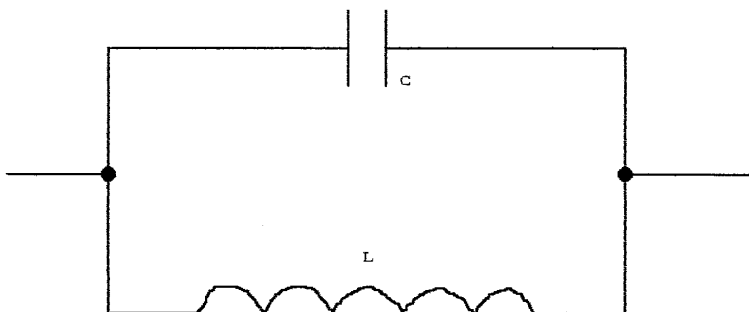
– L'analyse spectrale du signal donne une suite de raies espacées de f , symétriques par rapport à la fréquence centrale F_0 .



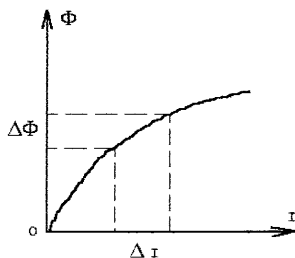
– Règle de Carson : 98 % de la puissance du signal est transmise dans la bande $F_0 - (\beta + 1) f$ et $F_0 + (\beta + 1) f$. Cette bande a donc pour largeur $B = 2 (\beta + 1) F = 2 (\Delta F + f)$. En pratique une station F.M. a droit à une excursion crête de fréquence de 75 kHz soit $B \approx 200$ kHz. Ceci explique que la fréquence centrale soit très élevée (de l'ordre de 100 MHz).

b - Manipulations

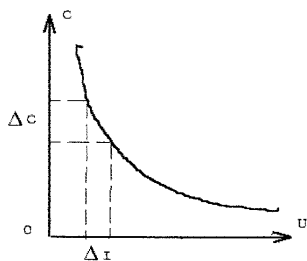
La production la plus «simple» d'un signal modulé en fréquence consiste à faire varier un des paramètres d'un circuit oscillant LC.



Soit on fait varier L , soit on fait varier C au rythme du signal modulant. Dans le premier cas on utilise une inductance saturable, dans le second cas une diode varicap :



Inductance variable



Varicap

Il faut ensuite un oscillateur HF et un signal modulant BF. L'observation d'un signal classiquement modulé en fréquence nécessite l'utilisation d'un oscilloscope de plusieurs dizaines de MHz de bande passante (la HF est de plusieurs MHz et les variations de fréquence dues à la BF sont très faibles).

Aussi nous proposons une démarche didactique pour présenter aux élèves, avec un oscilloscope de base, le phénomène de la modulation de fréquence. Cette modulation, nous insistons, n'a aucune application pratique : on ne module pas un signal de quelques dizaines de kHz par un signal de quelques centaines de Hz.

Matériel nécessaire

- deux GBF dont un avec un «wobulateur» et sa sortie «SWEEP OUT» (to sweep en anglais = balayer), l'autre avec une entrée externe de commande de balayage de fréquence (type METRIX GX 240),
- un oscilloscope (type HAMEG 203 ou METRIX 710, 725, ...),
- un té de dérivation BNC et des cordons BNC-BNC.

Remarque : un «wobulateur» est un dispositif électronique qui permet de modifier la fréquence d'un signal par l'intermédiaire d'une tension dite de commande.

Première étape

Montrer avec le GBF 1 un signal «HF» de 140-150 kHz, sinusoïdal, symétrique, sans offset, d'amplitude quelques volts (4 V par exemple). La sortie signal est reliée à une des voies (A) de l'oscilloscope (2 V/div - 20 μ s/div).

Deuxième étape

Montrer la variation de la fréquence du signal HF précédent en appliquant une tension de commande, continue, réglable de 0 à 10 V, sur l'entrée VCF INPUT (ou entrée externe de commande de balayage de fréquence) du wobulateur. La sortie signal du GBF 1 est toujours reliée à la voie A de l'oscilloscope, la touche SWEEP EXT de la face avant du GX 240 est activée.

Troisième étape

Montrer la tension de commande interne qui est appliquée au wobulateur, en reliant la sortie SWEEP OUT (à l'arrière du GBF 2) à la voie B de l'oscilloscope (5 V/div - 5 ms/div). La touche SWEEP INT de la face avant est activée, la vitesse de balayage est réglée au maximum. Faire varier la pente de la dent de scie en agissant sur la vitesse de balayage.

Montrer alors ce qu'est le signal de sortie du GBF 2 à l'oscilloscope (voie B). Faire varier la vitesse de balayage ainsi que la plage de balayage.

A ce stade, on peut dire que le signal de sortie du GBF est modulé en fréquence (ou wobulé) par la tension de commande en dent de scie.

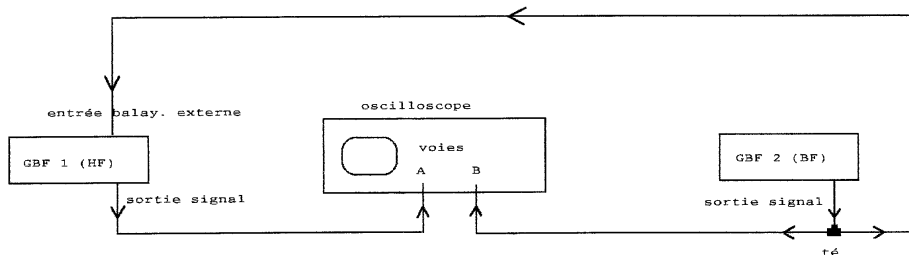
Quatrième étape

A l'aide du GBF 1 appliquer le signal HF de la première étape sur la voie A.

A l'aide du GBF 2 appliquer un signal BF de 10 kHz environ, sinusoïdal, symétrique, sans offset, d'amplitude voisine du volt (1,5 V par exemple), sur la voie B de l'oscilloscope.

Le METRIX 725 sera synchronisé en «VERT. MOD».

Relier la sortie signal du GBF 2 (nécessité d'un té de dérivation) à l'entrée VCF INPUT du GBF 1. Activer le balayage externe (SWEEP EXT) du GBF 1. On a bien le signal HF modulé par le signal BF. Régler le niveau et la fréquence de la BF (GBF 2) de telle façon à observer une modulation de fréquence correcte.



Si l'on dispose d'un oscilloscope à mémoire, il suffit de mémoriser l'acquisition, pour observer la modulation en fréquence. On peut ainsi faire l'amplitude de la BF et montrer la conséquence sur l'excursion crête de fréquence. Voir annexe 3.

Remarque : à l'aide d'un logiciel de Mathématiques on peut obtenir les graphes des fonctions qui représentent les signaux modulant et modulé.

Exemple :

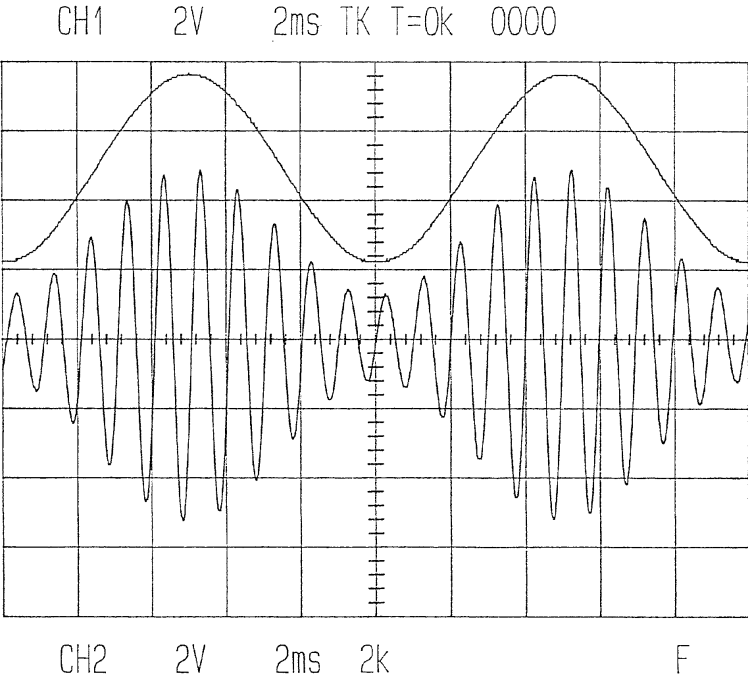
- signal modulant : $2 * \cos (2 * \pi * 0.1 * t)$
- signal modulé : $2 * \cos \left[(2 * \pi * 1.5 * t) + 5 * \sin (2 * \pi * 0.1 * t) \right]$

On peut ainsi observer que lorsque le signal modulant est maximum, la fréquence du signal modulé est maximale et que, lorsque le signal modulant est minimum, la fréquence du signal modulé est minimale. Le signal modulé n'est à la fréquence de la porteuse que lorsque le signal modulant a une élancement nulle.

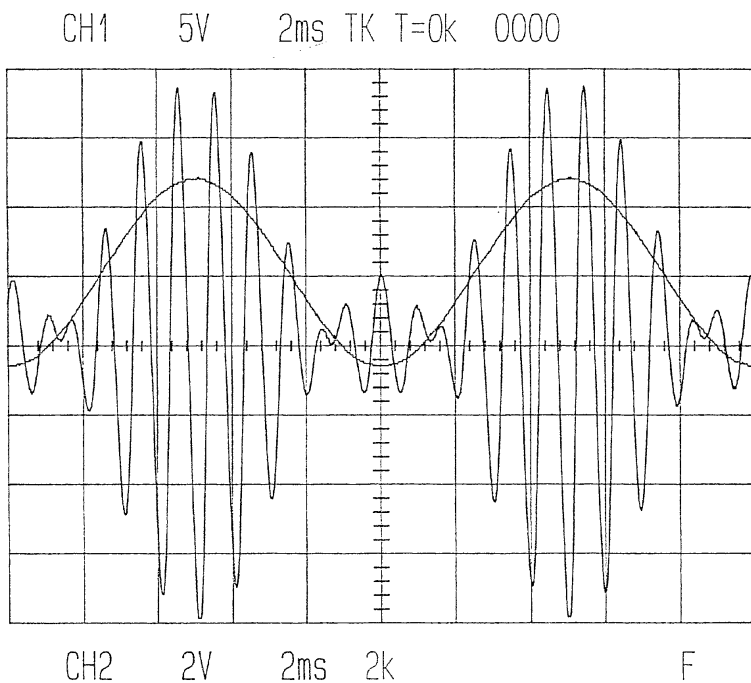
BIBLIOGRAPHIE

- Sciences Physiques pour l'Électronique - Modulations - Éditions E.E. Mokros.
- F. MANNEVILLE et J. ESQUIEU - Systèmes bouclés linéaires, de communication et de filtrage - Dunod

Annexe 1
Modulation d'amplitude



Annexe 2
Modulation d'amplitude dite «négative»



Annexe 3
Modulation de fréquence

