

Modulation et transport d'information

Un peu d'histoire

De tous temps l'homme a cherché à transmettre (le plus rapidement possible) des messages vers un (ou des) correspondant(s) lointain(s).

Loin. ? Avant J.C. loin s'établissait en journée de marche(ou de course à pied) ou de course à cheval par exemple.

Le moyen de transport n'est primordial que pour la notion de vitesse, ou de distance.

Le but final est d'envoyer ou de recevoir un message compréhensible et entier le plus rapidement possible.

Analogie imagée

Si l'on prend le cheval comme moyen de transport, un cavalier comme messenger, nous avons là un moyen de transmission de l'information.

Le cavalier porteur du message l'a reçu soit oralement ou bien est convoyeur d'un support où le message est transcrit en « clair » ou « chiffré ».

Le cheval est assimilable à la porteuse, le messenger à la modulation, le message à l'information et le scellé à un codage éventuel.

A l'arrivée le « récepteur » recevant le message doit être en mesure de le déchiffrer (Figure 1 Analogie d'une transmission).

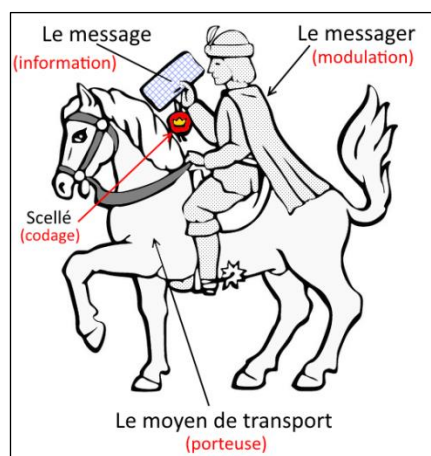


Figure 1 Analogie d'une transmission

Télé ...

Du grec ancien [τηλε](#), *tēle* (« loin ») est la 1^{ère} syllabe des mots télégraphie, téléphonie, télévision etc. etc.[1]¹

Télégraphe électrique

Un des premiers moyens de communication à distance par système « électrique » a été le télégraphe terrestre utilisant le code morse. La terre étant un des deux conducteurs, le second un fil conducteur installé sur des poteaux.

Si le circuit était alimenté (par un manipulateur fermé) à l'autre extrémité un électroaimant fonctionnait en synchronisme, traçant sur un papier des traits et des points.

On lisait le message reçu par interprétation de ces signes (codage en signes).

Il y avait différents types de codages des chiffres et des lettres, celui qui s'est affirmé est le code morse (cf. Samuel Morse)

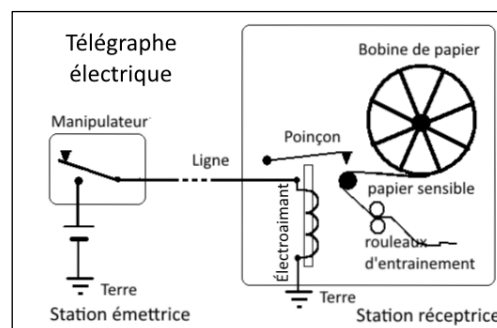


Figure 2 Le télégraphe électrique

Modulation et transport d'information

Télégraphe sans fil

Le télégraphe sans fil utilise les ondes radioélectriques pour être transmis.

Un émetteur manipulé envoie une émission lorsque le manipulateur est fermé comme dans le télégraphe électrique terrestre. C'est un système tout ou rien

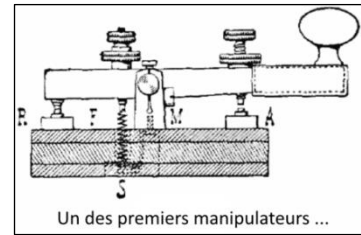


Figure 3 Un manipulateur [1]

Téléphonie et modulation

Si dans les deux exemples du télégraphe (voir ci-dessus) il fallait décoder le message constitué de traits et de points.

Dans le cas de la téléphonie on envoie le message en théorie vocal directement au moyen d'un support : la porteuse.

La modulation contient en général le message.

Les principaux moyens de modulation *analogique* sont :

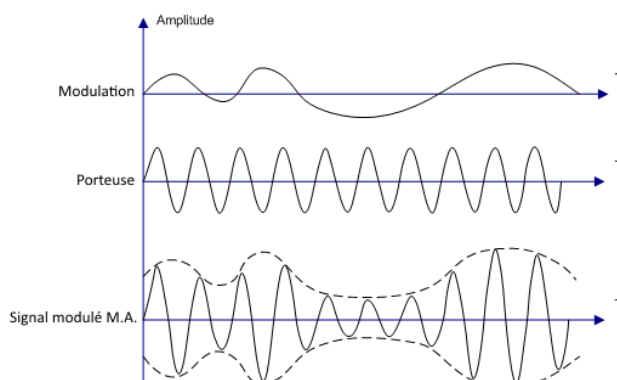
- La modulation d'amplitude M.A. (AM en anglais)
- La modulation de fréquence M.F. (FM en anglais)
- La modulation de phase M.P. (PM en anglais)

Analogique : ce terme provient du fait que la mesure d'une valeur naturelle (ou d'un élément de signal électrique ou électronique) varie de manière **analogue** à sa source.

Modulation d'amplitude MA ou AM

Le signal modulant, la modulation, la voix par exemple est amplifiée en sortie d'un microphone.

Ces signaux vont s'additionner suivant leur phase pour augmenter ou réduire l'amplitude la porteuse.



Principe du modulateur M.A.

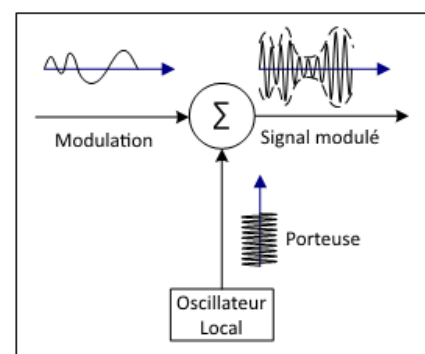


Figure 4 Modulateur AM

Ce signal est appliqué à une entrée d'un modulateur (Σ) dans la Figure 4 Modulateur AM, qui va « sommer » ce signal avec celui de la porteuse.

D'où le nom de modulation d'amplitude.

Modulation et transport d'information

Taux de modulation

Il apparait clairement que pour moduler en amplitude il faut apporter de l'énergie complémentaire pour augmenter le niveau de la porteuse.

Dans la Figure 5 Taux de modulation, partie haute c'est une modulation à 50%.

La porteuse non modulée a une amplitude allant de -1 à +1. Donc $2_{c\grave{a}c}$ (nous n'allons utiliser que des rapports pour nos calculs).

La modulation a un niveau allant de -0,5 à +0,5 = $1_{c\grave{a}c}$.

Le taux de modulation t sera de :

$$t = \frac{Mod.}{Porteuse} (\%) = \frac{1}{2} (\%) = 50\%$$

Figure 5 Taux de modulation, milieu :

Le taux de modulation t sera de :

$$t = \frac{Mod.}{Porteuse} (\%) = \frac{2}{2} (\%) = 100\%$$

Figure 5 Taux de modulation

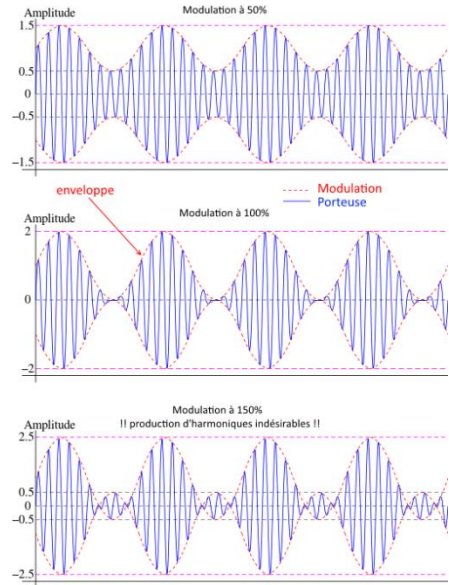


Figure 5 Taux de modulation

Occupation spectrale et bandes latérales

Si l'on observe attentivement la Figure 5 Taux de modulation, on voit que la porteuse est modulée symétriquement de part et d'autre d'une ligne fictive marquée 0.

La réalité c'est que qu'il y a addition et soustraction des fréquences.

Dans la Figure 6 Spectre d'un signal AM, la modulation est un signal de 1000Hz, soit 0,001MHz.

Ceci produit deux bandes latérales égales à :

$$BLS = Porteuse + Modulation = 5,000 + 0,001 = 5,001\text{MHz}$$

Et :

$$BLI = Porteuse - Modulation = 5,000 - 0,001 = 4,999\text{MHz}$$

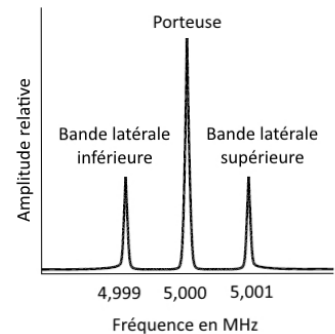


Figure 6 Spectre d'un signal AM

Il faut remarquer que le « message » à transmettre est transmis deux fois ... en BLI et en BLS ce qui induit une occupation spectrale plus importante que nécessaire.

Nous verrons plus loin que la *Bande Latérale Unique BLU* (*Single Side Band* pour les anglo-saxons), permet une efficacité et un rendement accru de transmission (voir : Figure 13).

Modulation MF ou FM

Le signal modulant, la modulation, la voix par exemple est amplifiée en sortie d'un microphone.

Ce signal est appliqué à une entrée d'un oscillateur à réactance dont on va modifier sa fréquence d'oscillation, en fonction du signal modulant.

Ceci soit en faisant varier L ou C, rappelons-nous la formule de Thomson !
$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Au dénominateur se trouvent L et C, si une de ces valeurs varie, la fréquence F variera.

Il est plus pratique de faire varier C, si la capacité varie, on voit bien que F va varier en conséquence.

Il existe néanmoins un système utilisant L pour faire de la FM.

Modulation et transport d'information

Différence temporelle entre AM et FM

Sur la Figure 7 est représenté ce que l'on peut observer sur un oscilloscope lorsqu'un signal module une porteuse par ex. à 5 MHz.

- en amplitude (rouge, milieu)
- en fréquence (bleu, bas)

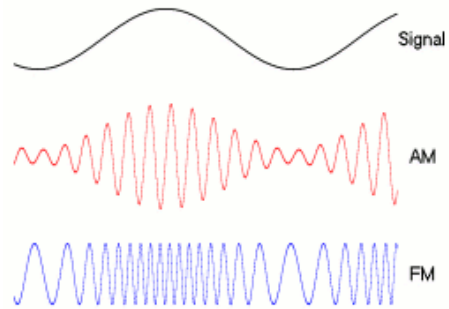


Figure 7 Représentation temporelle comparative entre AM et FM

Le signal modulé en fréquence se comporte comme un ressort que l'on étire ou comprime en fonction du signal modulant.

Analogie mécanique pour créer une FM

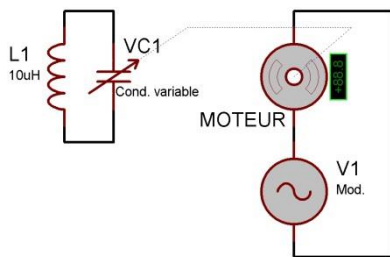


Figure 8 Analogie mécanique de la FM

Imaginons le montage de la Figure 8 pour comprendre la modulation en fréquence.

La modulation V1 fait varier le moteur qui entraîne mécaniquement l'axe d'un condensateur variable à lames mobiles CV1.

La valeur de CV1 variera en fonction de la position angulaire de l'axe du moteur.

La fréquence variera à ce rythme de rotation.

Ceci est quand même un peu compliqué, mais cela fonctionnerait.

Il existe un condensateur variable que l'on commande électriquement : c'est la diode varicap (voir : Figure 9).

Ceci est expliqué dans mon mémo au sujet du transistor et des diodes.

Varicap - VCO et FM

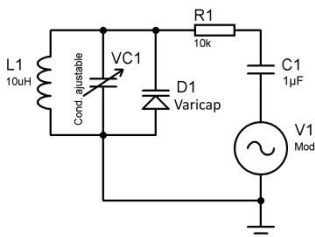


Figure 9 VCO à varicap

D1 est une diode varicap polarisée en sens inverse.

Dans ce type de diode on utilise la variation de la largeur de la barrière de la jonction PN comme condensateur variable.

La tension alternative variable appliquée à la cathode de D1 fait varier la fréquence exactement comme expliqué sur la Figure 8.

VC1 servira à ajuster exactement la fréquence à sa valeur souhaitée.

Le montage de la Figure 8 se nomme en anglais Voltage Controlled Oscillator. (Fr. : Oscillateur contrôlé en tension).

Modulation et transport d'information

FM et VCO

Dans le montage fonctionnel d'un VCO à 5,5MHz Figure 10, la diode varicap D6 est un boîtier incorporant deux diodes en tête bêche.

La modulation est appliquée à D6 via la résistance R31.

L'oscillateur utilise un TEC (transistor à effet de champ).

CV1 permet d'ajuster exactement la fréquence de repos (sans modulation) du VCO.

La FM est disponible sur le curseur du potentiomètre RV3.

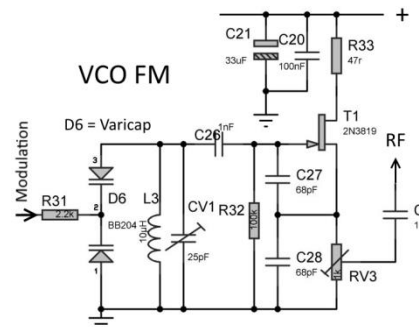


Figure 10 Schéma VCO

Analogie du modulateur FM à réactance L

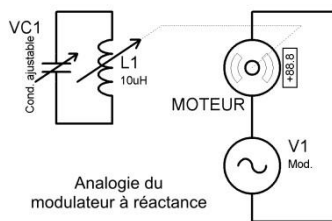


Figure 11 Analogie du modulateur à réactance

Dans le schéma de la Figure 11 c'est la self-inductance L1 qui varie « mécaniquement », suivant exactement le même principe que celui décrit à la Figure 8.

L'index de modulation et l'occupation spectrale

Par opposition à l'AM où le signal modulé produit deux bandes latérales, le signal FM a une occupation spectrale plus grande.

La largeur de bande occupée est égale au rapport entre la fréquence de la modulation m et sa demi excursion crête en fréquence D .

Ce rapport est l'index de modulation :

$$X = \frac{D}{m} = \phi$$

L'amplitude des bandes latérales est fonction de l'index de modulation et non de l'excursion !

La règle de Carson donne l'occupation spectrale (en Hz) :

$$B_W = 2 * (F_d + f_m)$$

- B_W = bande passante occupée
- F_d = fréquence de déviation maxi.
- f_m = fréquence de modulation maxi.

$$D'où : F_d = \frac{B_W - 2 * f_m}{2}$$

Par exemple en bande 2m (144MHz) pour un pas entre canaux de 12,5KHz, et un signal audio maxi de 3KHz, la déviation maximale devra être de :

$$F_d = \frac{B_W - 2 * f_m}{2} = \frac{12,5 - (2 * 3)}{2} = 3,25kHz$$

Modulation et transport d'information

Modulation de phase

Il n'y a pas de différence fondamentale entre la modulation de phase et la modulation de fréquence.

SAUF que l'index de modulation doit être inférieur à 0,5 pour une bonne linéarité !

L'excursion en phase est proportionnelle à la fréquence modulante.

On doit réaliser un système pour obtenir une réponse en amplitude dont le niveau est inversement proportionnel à la fréquence audio

Ceci se nomme préaccentuation à l'émission et désaccentuation, à la réception.

Voir également l'excellent article de F1UGPⁱⁱ

La préaccentuation consiste à favoriser la transmission des fréquences élevées, et à atténuer les fréquences basses, on amplifie en fait au niveau nominal de gain les fréquences hautes. La désaccentuation consiste en réception à effectuer l'opération en sens inverse.

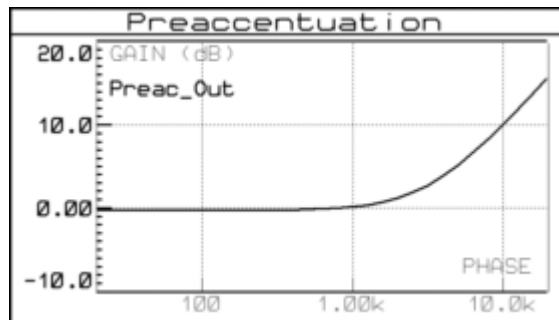


Figure 12 Préaccentuation audio [3]

Modulation et transport d'information

La BLU ou SSB

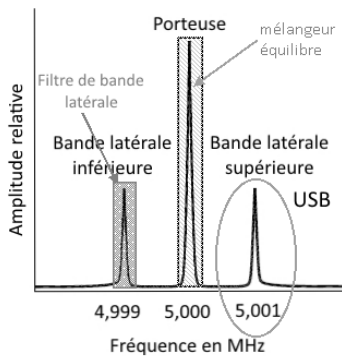


Figure 13 Signal USB

Un signal AM comporte deux bandes latérales et une porteuse. Il existe un moyen de modulation particulier, la BLU ou SSB. Le principe consiste à ne sélectionner que le message utile, c.à.d. uniquement une bande latérale et à « éliminer » la porteuse.

La porteuse sera très très fortement atténuée dans un mélangeur spécial appelé mélangeur équilibré. En sortie de ce mélangeur se trouve un signal sans porteuse mais à deux bandes latérales (DSB).

Un filtre extrêmement sélectif va ensuite éliminer une des deux bandes inutiles, pour obtenir une BLU qui sera BLI ou BLS, si vous préférez en anglais SSB LSB ou USB.

Filtre à quartz

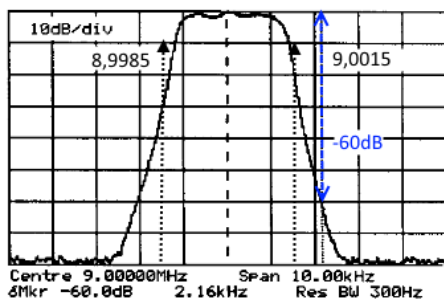


Figure 14 Courbe de réponse d'un filtre à quartz BLU 9 MHz

La Figure 14 montre la courbe de sélectivité d'un filtre à quartz à fréquence centrale 9MHz destiné à la SSB.

En pointillé la position des porteuses :

- 8,9985 → USB
- 9,0015 → LSB

Sélectivité -60dB à 4,2kHz de largeur de bande.

$$\text{Facteur de forme} = \frac{4,2\text{kHz}}{2,16\text{kHz}} = \boxed{1,94}$$

Mélangeur équilibré et SSB

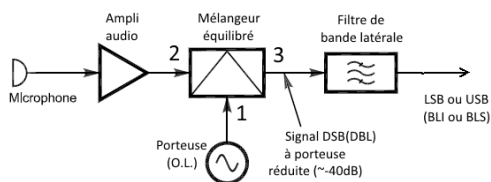


Figure 15 Principe de la SSB

Le mélangeur équilibré reçoit en 1 une porteuse (O.L.) et à sa sortie 3, s'il n'y a pas de modulation appliquée par la sortie de l'amplificateur audio 2, il n'y a pas d'HF (RF) en sortie (en fait atténuée de 40dB).

Dès que l'on applique de la modulation en 2, en sortie 3 apparaissent deux bandes latérales.

Le rôle du filtre de bande est de sélectionner celle que l'on désire.

La SSB n'est que l'application assez particulière de l'AM.

Ce type de modulation a plusieurs avantages :

- occupation spectrale plus réduite
- efficacité accrue puisque l'on émet que lorsque l'on parle
- rendement meilleur des étages d'amplification RF

Références

- [1] Wikipédia
- [2] ARRL Handbook
- [3] Sonelec http://www.sonelec-musique.com/electronique_bases_diffusion_fm_preac_desac.html

ii http://f5ad.free.fr/Liens_coupes_ATV/F1UGP%20La%20TV%20en%20FM.doc