



ELG 4571
Systèmes de télécommunications



GEF 411A
Théorie de Communication



GELE 4521
Télécommunications



Modulation

Partie I

J.-Y. Chouinard/M. Hefnawi/Y. Bouslimani

ELG-4571 Systèmes de télécommunications/GEF 411A Théorie de Communication/GELE4521 Télécommunications

Yassine Bouslimani
Téléphone : 858 4756
Courriel : bousliy@umoncton.ca

MODULATION

Références :

Chapitres 4 & 5:

Digital and Analog Communication Systems, Leon Couch II, (6ème édition), Prentice-Hall, 2001.

Introduction aux systèmes de télécommunications (ELG 3570), Dr. Jean-Yves Chouinard, Université d'Ottawa, 2002.

Chapitres 5, 6 & 10:

Introduction to Communication Systems, Ferrel G. Stremler, (3ème édition), Addison-Wesley, 1992.

Chapitres 4, 5, 6, 10, 11, 12 & 13:

Electronic Communication Systems, William Schweber, (4ème édition), Prentice-Hall, 2002.

Fiches techniques des composants AD534, MC1496, SA601/602 et U279.

Sommaire :

↪ Introduction

↪ Modulations analogiques :

➤ Modulation d'amplitude : DSB(AM&SC), SSB, VSB et QAM.

➤ Modulation d'angle :

→ **Modulation de fréquence (FM)**

→ **Modulation de phase (PM)**

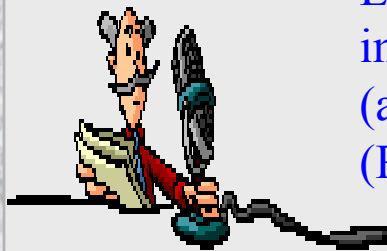
↪ Modulations numériques :

➤ Modulation par déplacement d'amplitude (ASK),

➤ Modulation par déplacement de phase (PSK),

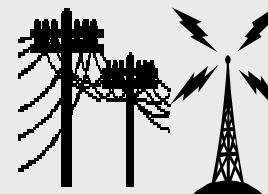
➤ Modulation par déplacement de fréquence (FSK).

Introduction



La possibilité de transmettre un message a toujours été d'une importance essentielle. L'idée n'est pas récente : nuages de fumés (autochtones), feux de bois (Grecs-Perses), torches enflammées (Romains), ...etc.

Un grand pas a été effectué durant les deux derniers siècles avec le développement des systèmes de transmission sur câbles, sur ondes hertziennes et satellites et sur fibres optique.



Dans cette partie du cours, on va s'intéresser à la Modulation :
qui consiste à adapter la représentation d'une information à un support de transmission. Dans d'autres termes, **elle consiste à transformer un signal afin de lui permettre d'être transmis dans un canal.**

Histoire :

En 1837, Samuel Morse met au point le télégraphe électrique. En 1844, Il effectue une transmission entre Washington et Baltimore.

En 1864, James Clerk Maxwell formule la théorie électromagnétique et prédit l'existence des ondes radio dont l'existence est prouvée expérimentalement par Heinrich Hertz en 1887.

En 1875, Alexander Graham Bell invente le téléphone.

En 1894, Olivier James établit une communication sans-fil sur une distance de 140 mètres.

En 1901, Guglielmo Marconi effectue la première transmission transatlantique.

En 1904, John Ambrose Fleming invente le tube-diode, et en 1906, Lee de Forest conçoit la triode, élément de base dans les amplificateurs jusque l'invention du transistor.

En 1918, Edwin H. Armstrong invente le circuit récepteur superhétérodyne.

En 1928, Harry Nyquist publie un article sur la transmission des signaux en télégraphie. En particulier, il publie les critères à observer pour une réception correcte de signaux télégraphiques transmis sur des canaux dispersifs en l'absence de bruit.

En 1933 Edwin H. Armstrong propose un autre concept révolutionnaire : la FM (modulation de fréquence).

En 1939, la BBC (British Broadcasting Corporation) diffuse de la télévision commerciale.

En 1948, la théorie mathématique des communications est établie par Claude Shannon.

En 1948, le transistor est inventé par Brattain, Bardeen et Shockley des laboratoires Bell.

En 1958, la mise au point du premier circuit intégré par Robert Noyce.

En 1971, un projet ARPANET (renommé Internet en 1985), utilise le concept de *commutation de paquets*.

En 1971, Intel développe le 4004.

En 1982, une autre contribution historique est due à G.Ungerboeck qui introduit les modulations codées.

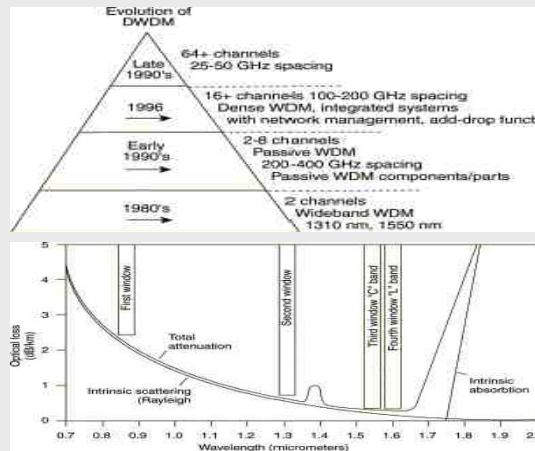
En 1990, l'interface logicielle hypermédia proposée par Berners-Lee, et appelée World WideWeb.

Bandes de fréquences

La répartition est régie par deux facteurs importants :

- Contraintes physiques : caractéristiques du Milieu de transmission et débit d'information.
- Réglementation.

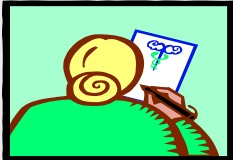
Optique :



J.-Y. Chouinard / M. Hefnawi / Y. Bouslimani
 ELG-4571 Systèmes de télécommunications/
 GEF 411A Théorie de Communication/
 GELE4521 Télécommunications

| Frequency Band ^a | Designation | Propagation Characteristics | Typical Uses |
|-----------------------------|--------------------------------|--|--|
| 3–30 kHz | Very low frequency (VLF) | Ground wave; low attenuation day and night; high atmospheric noise level | Long-range navigation; submarine communication |
| 30–300 kHz | Low frequency (LF) | Similar to VLF, slightly less reliable; absorption in daytime | Long-range navigation and marine communication radio beacons |
| 300–3000 kHz | Medium frequency (MF) | Ground wave and night sky wave; attenuation low at night and high in day; atmospheric noise | Maritime radio, direction finding, and AM broadcasting |
| 3–30 Mhz | High frequency (HF) | Ionospheric reflection varies with time of day, season, and frequency; low atmospheric noise at 30 Mhz | Amateur radio; international broadcasting, military communication, long- distance aircraft and ship communication, telephone, telegraph, facsimile |
| 30–300 MHz | Very high frequency (VHF) | Nearly line-of-sight (LOS) propagation, with scattering because of temperature inversions, cosmic noise | VHF television, FM two-way radio, AM aircraft communication, aircraft navigational aids |
| 0.3–3 GHz | Ultrahigh frequency (UHF) | LOS propagation, cosmic noise | UHF television, cellular telephone, navigational aids, radar, GPS, microwave links, personal communication systems |
| 1.0–2.0 | Letter designation L | | |
| 2.0–4.0 | Letter designation S | | |
| 3–30 GHz | Superhigh frequency (SHF) | LOS propagation; rainfall attenuation above 10 GHz, atmospheric attenuation because of oxygen and water vapor, high water vapor absorption at 22.2 GHz | Satellite communication, radar microwave links |
| 2.0–4.0 | Letter designation S | | |
| 4.0–8.0 | Letter designation C | | |
| 8.0–12.0 | Letter designation X | | |
| 12.0–18.0 | Letter designation Ku | | |
| 18.0–27.0 | Letter designation K | | |
| 27.0–40.0 | Letter designation Ka | | |
| 26.5–40.0 | Letter designation R | | |
| 30–300 GHz | Extremely high frequency (EHF) | Same; high water-vapor absorption at 183 GHz and oxygen absorption at 60 and 119 GHz | Radar, satellite, experimental |

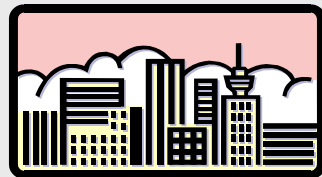
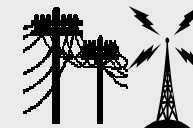
Introduction :



Porteuse



Canal de communication



Au niveau duquel la transmission d'information se fait.

Il y a deux types de canaux :

- les canaux où la propagation est *guidée* (câbles coaxiaux, fibres optiques)
- les canaux où la propagation est *libre* (l'air, l'eau).



Quitter



Modulations analogiques :

La modulation consiste à modifier les caractéristiques (**Amplitude, Phase** ou **Fréquence**) d'un signal modulé «**Porteuse** » produit par un oscillateur sinusoïdal **au rythme** d'un d'un signal modulant «**Message**» produit par une source d'information.

$$c(t) = A_c \cos (2\pi f_c + \theta)$$

1° Modifier l'amplitude :

Modulation d'amplitude (AM :Amplitude Modulation).

2° Modifier la fréquence :

Modulation de fréquence (FM : Frequency Modulation)

3° Modifier la phase :

Modulation de phase (PM : Phase Modulation) qui n'est pas beaucoup différente d'une FM.

Transmission en Bande de Base (Baseband) : consiste à transmettre directement le signal d'information.



Modulation d'amplitude :

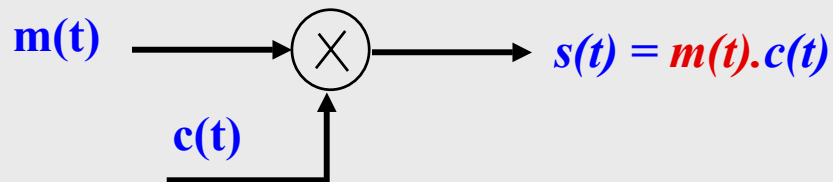
La porteuse est un signal oscillatoire qui peut être exprimé par :

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

Faire varier l'amplitude au rythme d'un du signal modulant

La modulation d'amplitude d'un signal $m(t)$ peut se faire de plusieurs façons :

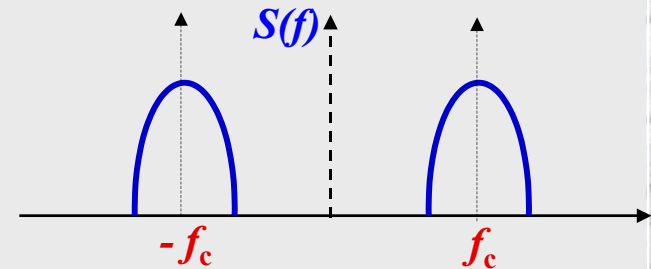
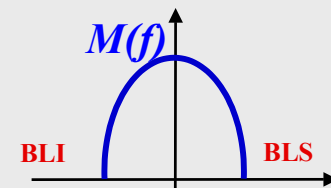
Approche simple : elle n'est pas la plus simple à réaliser.



Le signal modulé : $s(t) = A_c m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)$

En appliquant la transformée de Fourier, le spectre du signal modulé est donné par :

$$S(f) = (A_c/2) \cdot [M(f+f_c) + M(f-f_c)]$$



↳ Modulation d'amplitude : DSB-SC

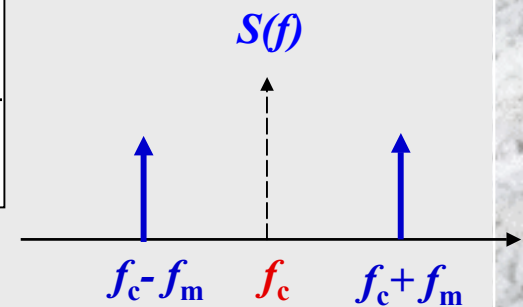
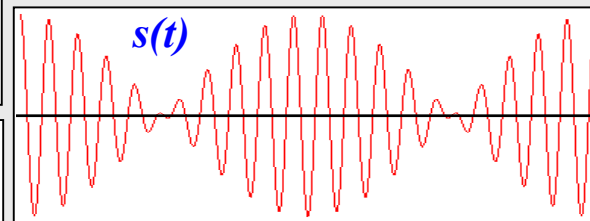
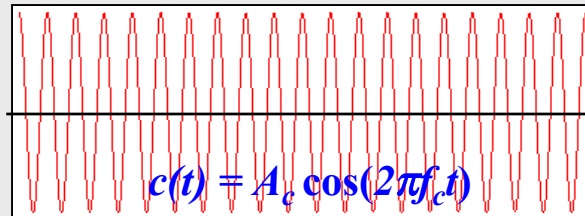
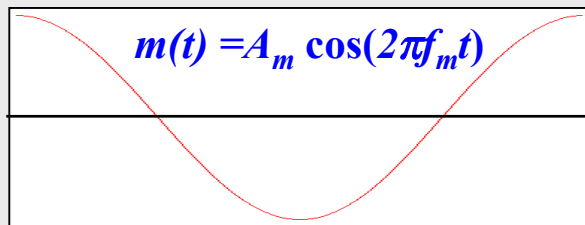
Dans ce cas la modulation est dite à Bande latérale double avec suppression de porteuse :
DSB-SC Double-Sideband Suppressed Carrier

Le produit de deux signaux de fréquences différentes (HF et BF) se traduit par un signal modulé à deux bandes latérales (bande latérale double) sur lesquelles l'énergie se répartie.

Pour un signal $m(t)$ sinusoïdal : $m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$

Le signal modulé :

$$s(t) = A_c A_m \cos(2\pi f_m t) \cos(2\pi f_c t) \\ = \frac{1}{2} (A_c A_m) \cdot [\cos(2\pi (f_c + f_m) t) + \cos(2\pi (f_c - f_m) t)]$$





Modulation d'amplitude : Techniques de modulation

DSB-LC : (AM)

Modulation à Bande latérale double avec porteuse (*Double-Sideband large-Carrier*).

signal Modulé :

$$s(t) = A_c [1 + k m(t)] \cos (2\pi f_c t)$$

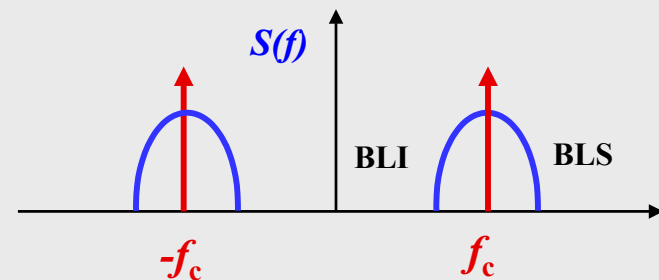
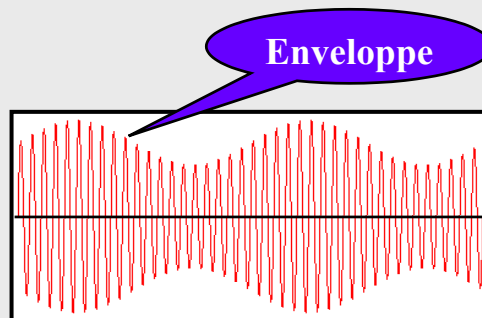
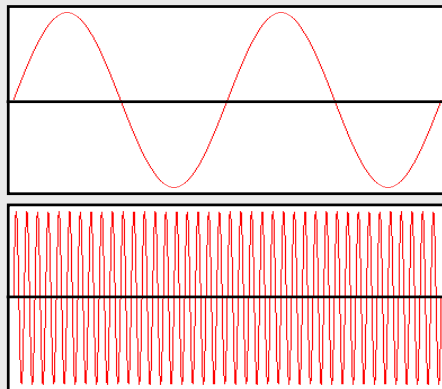
$$= c(t) + A_c k m(t) \cdot \cos (2\pi f_c t)$$

k : c'est le taux de modulation

En appliquant la transformée de Fourier :

$$S(f) = \frac{1}{2} A_c k [M(f+f_c) + M(f-f_c)]$$

$$+ \frac{1}{2} A_c [\delta(f+f_c) + \delta(f-f_c)]$$



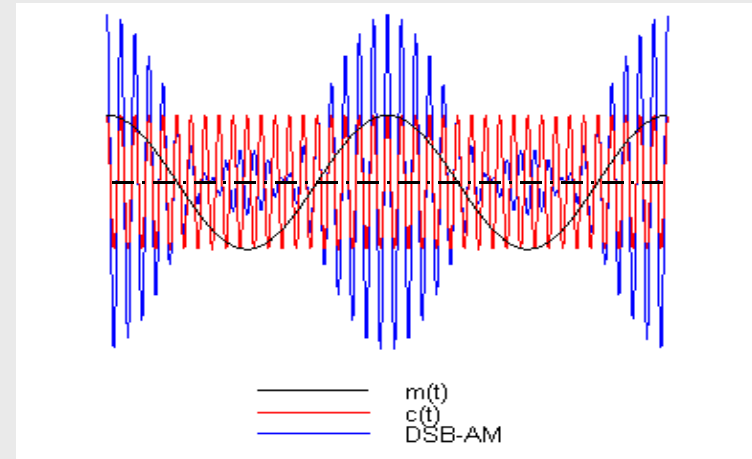
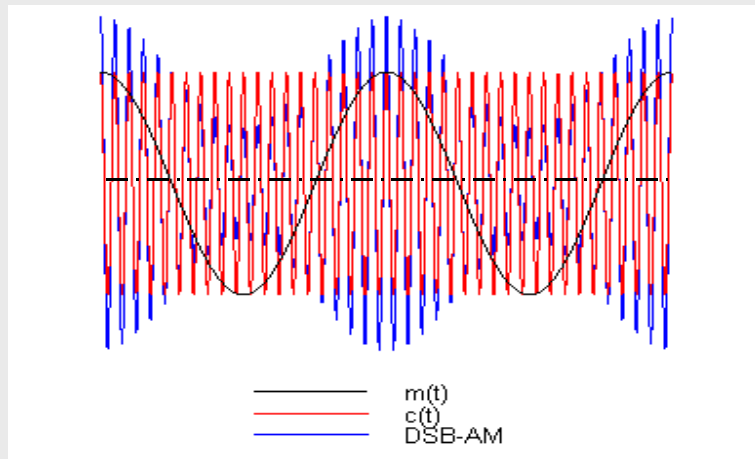


Modulation d'amplitude :

DSB-LC : (AM)

Surmodulation :

Le taux de modulation est trop important au point point que l'enveloppe du signal modulé ne permet pas de reproduire le signal modulant.



$$s(t) = A_c [1 + k m(t)] \cos (2\pi f_c t)$$

On définit l'indice (ou le pourcentage) de modulation par : $\frac{A_{max} - A_{min}}{2A_c}$



Quitter





Modulation d'amplitude : **Techniques de modulation**

La AM est assez simple à produire et à détecter mais il y a un dédoublement (d'énergie) dans les bandes latérales. En plus la porteuse peut être présente et donc le rendement énergétique n'est pas optimal.

SSB :

Modulation à Bande latérale unique BLU (*Single-Sideband*)

- ✓ Transmettre une seule bande latérale qui contiendra tout l'énergie.
- ✓ Ne pas transmettre la porteuse (sans but).
- ✓ Ne pas transmettre un signal quand $m(t)=0$. Exp. pour l'audio, dans les pauses de la parole.
- ✓ Le gain est 10 fois plus grand à la réception (un émetteur de 100W en AM aura la même efficacité qu'un émetteur de 10W en SSB)
- ✓ La mise en oeuvre est plus complexe tant qu'à l'émission qu'à la réception.





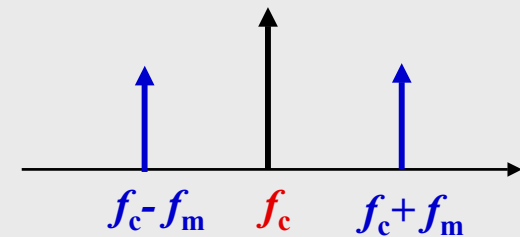
Modulation d'amplitude : Techniques de modulation

SSB : Modulation à Bande latérale unique BLU (*Single-Sideband*)

Cas d'une AM : Le signal modulé par $m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$

$$s_{DSB}(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \cdot A_c \cos(2\pi f_c t)$$

$$= \frac{1}{2}(A_c A_m) \cdot [\cos(2\pi(f_c + f_m)t) + \cos(2\pi(f_c - f_m)t)]$$



U-SSB $s_{SSB}(t) = \frac{1}{2}(A_c A_m) \cos(2\pi(f_c + f_m)t)$

$$s_{SSB}(t) = \frac{1}{2} A_m \cos(2\pi f_m t) \cdot A_c \cos(2\pi f_c t) - \frac{1}{2} A_m \sin(2\pi f_m t) \cdot A_c \sin(2\pi f_c t)$$

$m(t)$

$c(t)$

L-SSB $s_{SSB}(t) = \frac{1}{2}(A_c A_m) \cos(2\pi(f_c - f_m)t)$

$$s_{SSB}(t) = \frac{1}{2} A_m \cos(2\pi f_m t) \cdot A_c \cos(2\pi f_c t) + \frac{1}{2} A_m \sin(2\pi f_m t) \cdot A_c \sin(2\pi f_c t)$$

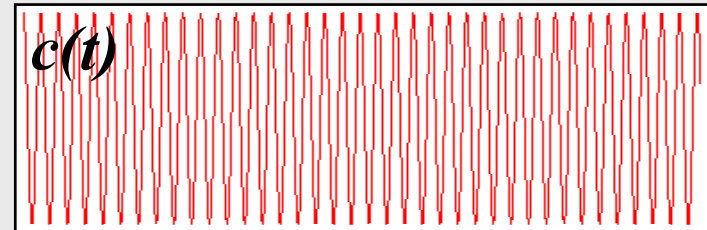
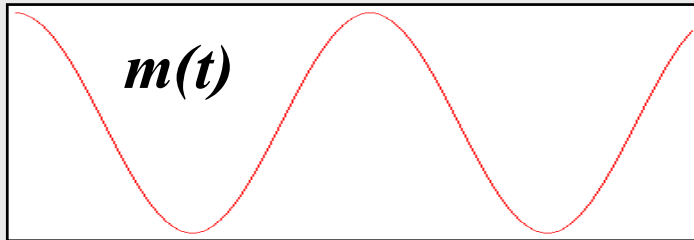


Quitter

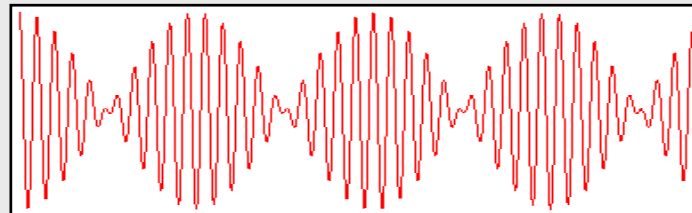




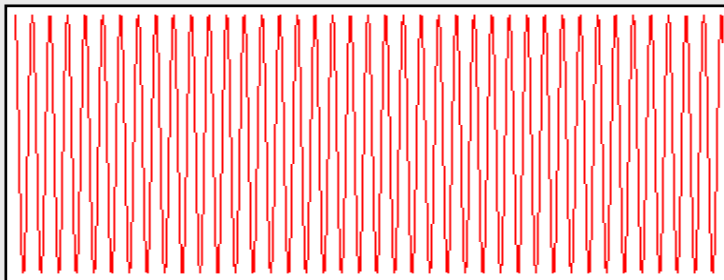
Modulation d'amplitude : Modulation à Bande latérale unique



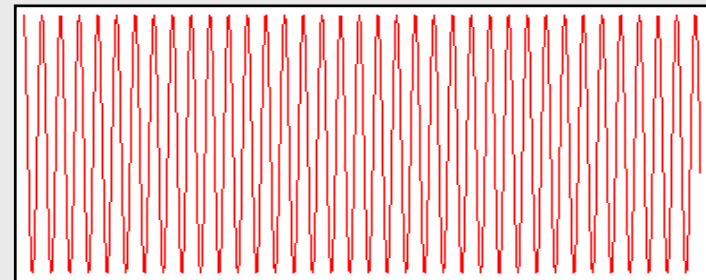
DSB



$S_{USSB}(t)$



$S_{LSSB}(t)$



Quitter





Modulation d'amplitude : Modulation à Bande latérale unique

Pour $m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$,
 $s_{SSB}(t) = \frac{1}{2} A_m \cos(2\pi f_m t) \cdot A_c \cos(2\pi f_c t) \pm A_m \sin(2\pi f_m t) \cdot A_c \sin(2\pi f_c t)$

Cas général d'un signal $m(t)$ non sinusoïdal :

$$s_{SSB}(t) = A_c [m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \pm m_h(t) \cdot \sin(2\pi f_c t)]$$

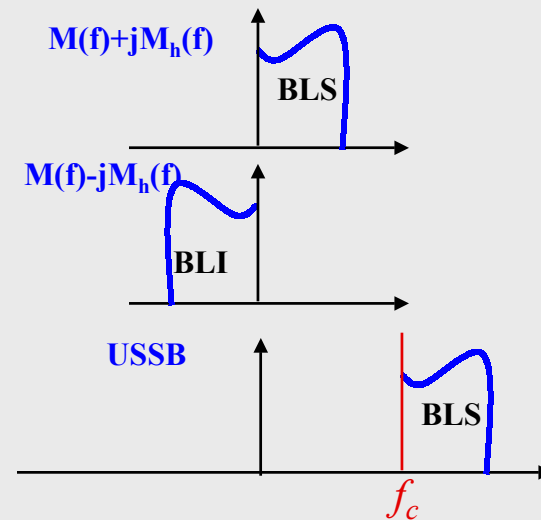
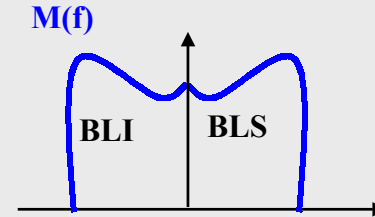
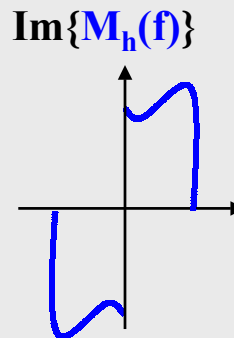
$m_h(t)$: est la transformée d'Hilbert de $m(t)$

$$m_h(t) = m(t) * 1/(\pi t)$$

$$M_h(f) = -j \cdot M(f) \quad \text{si } f > 0$$

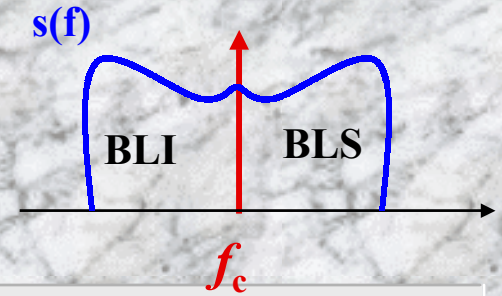
$$= +j \cdot M(f) \quad \text{si } f < 0$$

Déphasage de 90°





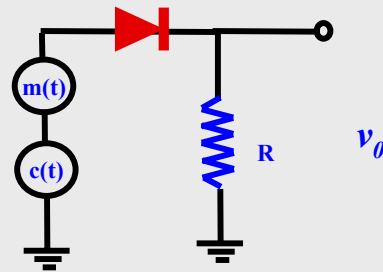
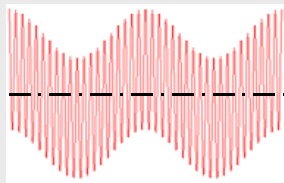
Modulation d'amplitude : Réalisation de la modulation



AM (DSB-LC) $s(t) = A_c [1 + k m(t)] \cos (2\pi f_c t)$

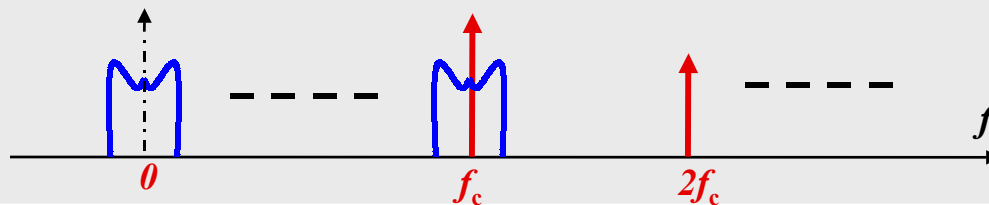


Diode polarisée dans la zone non linéaire : $I_D = I_s \left(e^{k \frac{V_D}{T}} - 1 \right)$



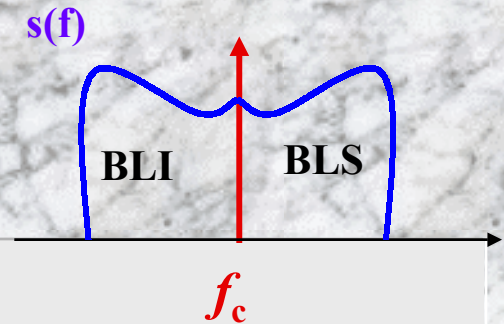
$$e^{(C V_d)} - 1 = C V_d + \frac{1}{2} C^2 V_d^2 + O(V_d^3)$$

$$\cos(x)^2 = \frac{1}{2} \cos(2x) + \frac{1}{2}$$





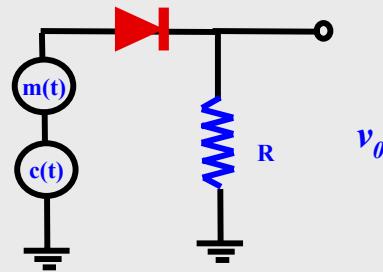
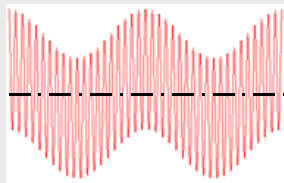
Modulation d'amplitude : Réalisation de la modulation



AM (DSB-LC) $s(t) = A_c [1 + k m(t)] \cos (2\pi f_c t)$

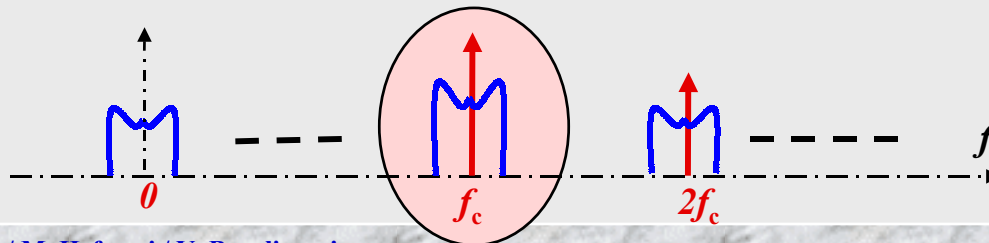


Diode polarisée dans la zone non linéaire : $I_D = I_s \left(e^{k \frac{V_D}{T}} - 1 \right)$



$$e^{(C Vd)} - 1 = C Vd + \frac{1}{2} C^2 Vd^2 + O(Vd^3)$$

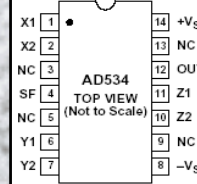
$$\cos(x)^2 = \frac{1}{2} \cos(2x) + \frac{1}{2}$$





Modulation d'amplitude : Réalisation de la modulation

AD534

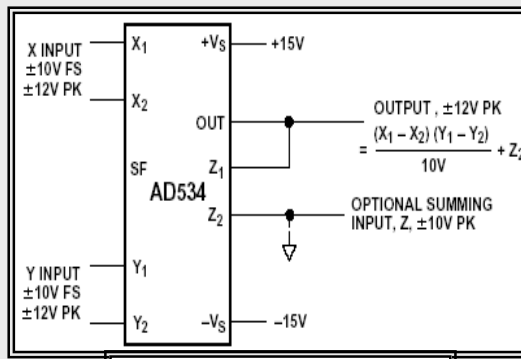
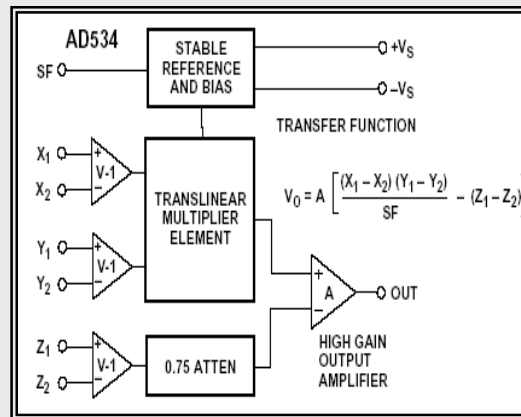
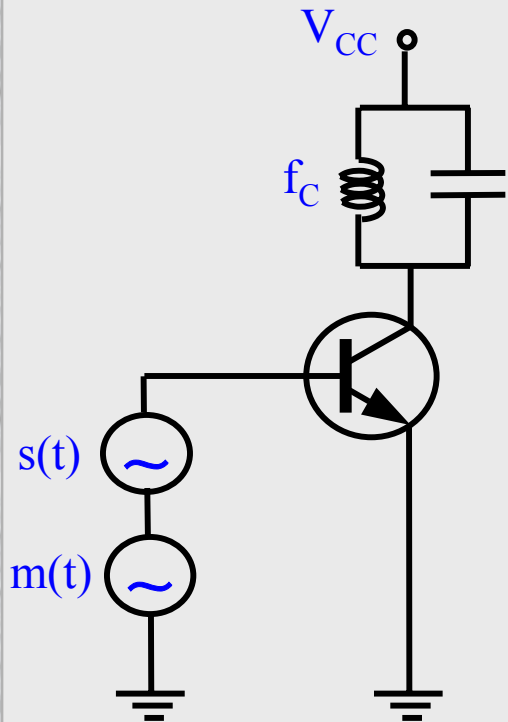


MC1496

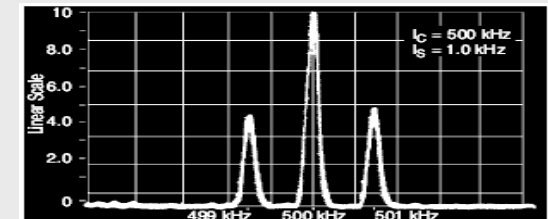
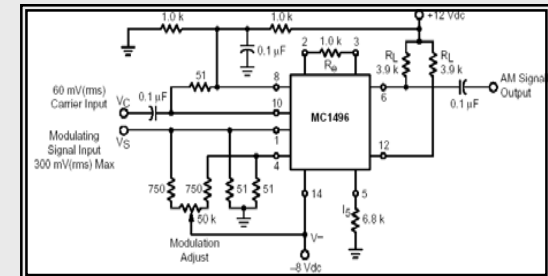
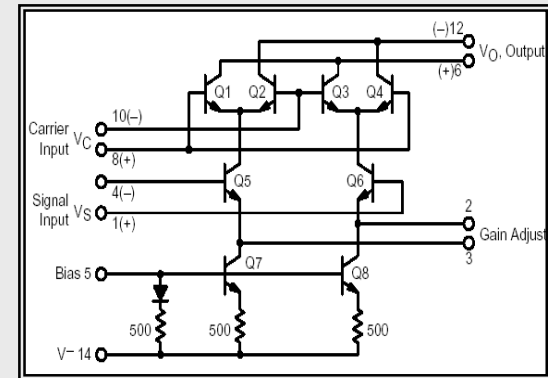


Double Balanced
Modulator

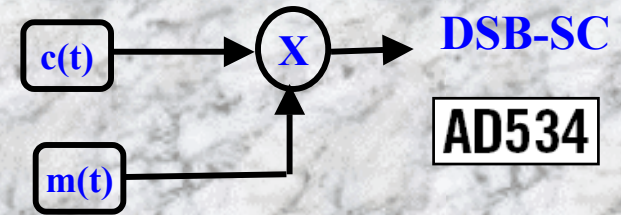
AM (DSB-LC) $s(t) = A_c [1 + k m(t)] \cos (2\pi f_c t)$



Basic Multiplier Connection

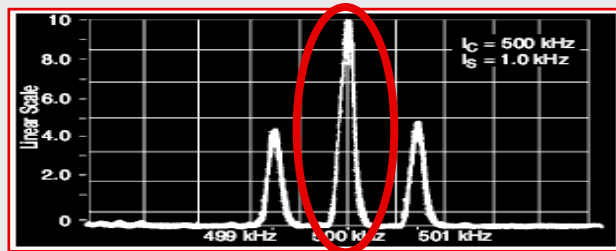


Modulation d'amplitude : Réalisation de la modulation



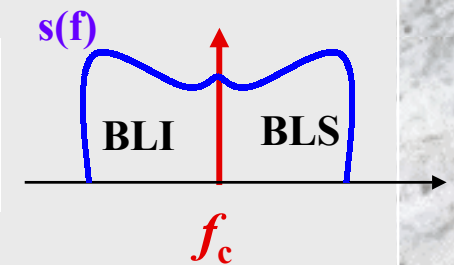
DSB-SC $s(t) = m(t) A_c \cos(2\pi f_c t)$

➤ AM en filtrant la porteuse : $\text{AM} \xrightarrow{\text{Filtre } (f_c)} \text{DSB-SC}$



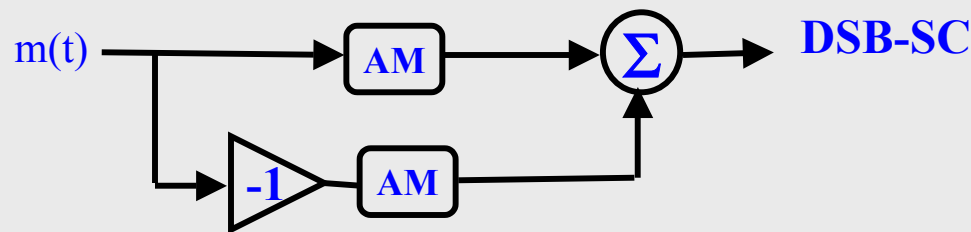
Problème :

Si le spectre du signal $m(t)$ s'étale jusqu'au DC



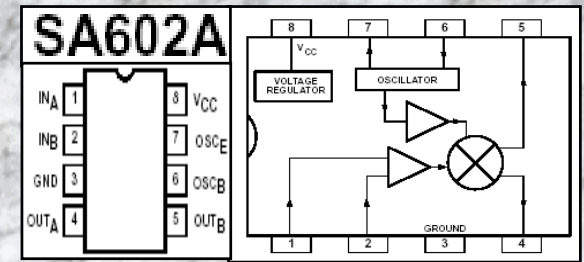
➤ Deux modulations AM :

$$\text{AM} = A_c [1 + k m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$





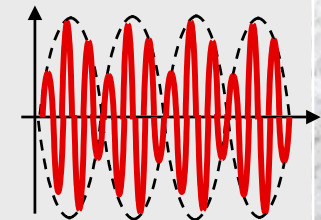
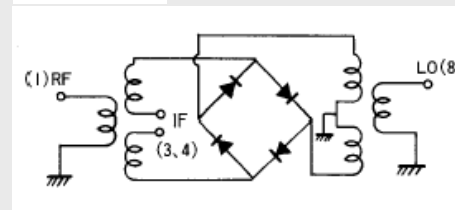
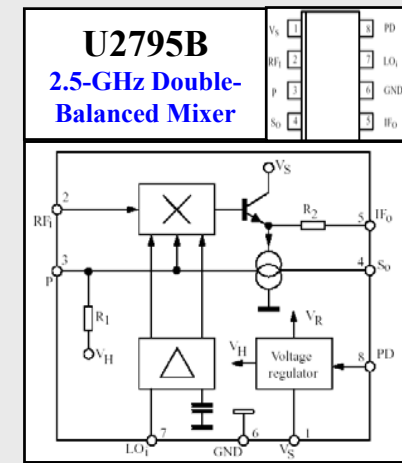
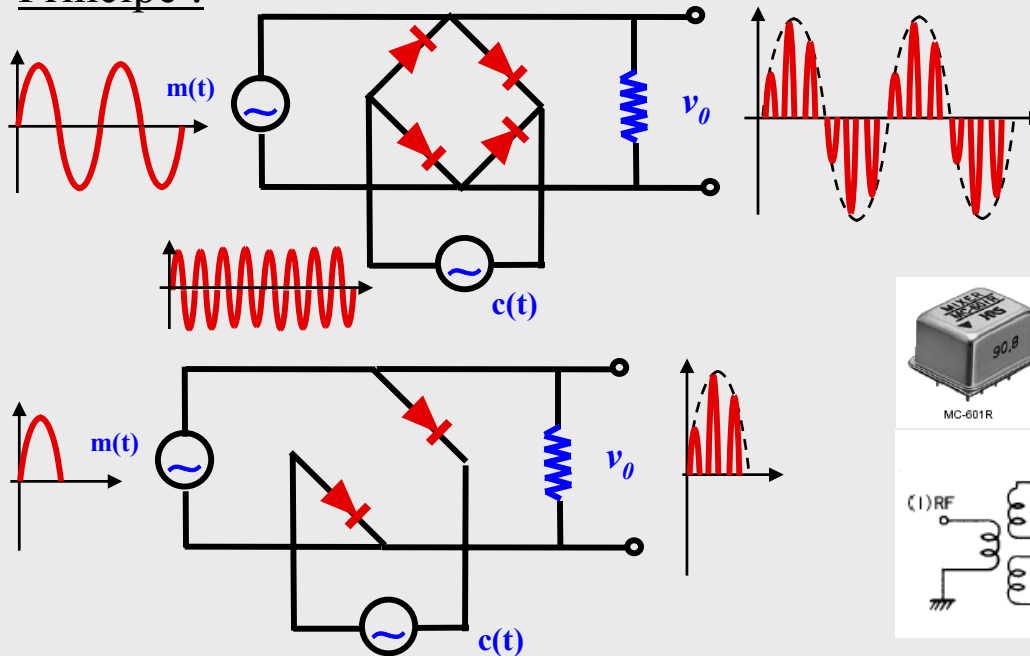
Modulation d'amplitude : Réalisation de la modulation



DSB-SC (suite) $s(t) = m(t) A_c \cos(2\pi f_c t)$

➤ Modulateur balancé :

Principe :



Modulation d'amplitude : Réalisation de la modulation

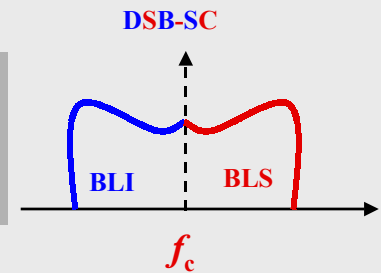
SSB : $s_{SSB}(t) = A_c [m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \pm m_h(t) \cdot \sin(2\pi f_c t)]$

➤ En filtrant une bande latérale :

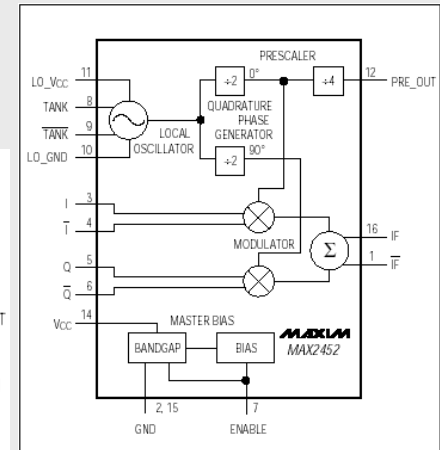
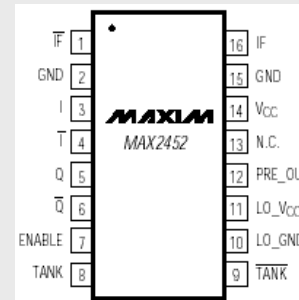
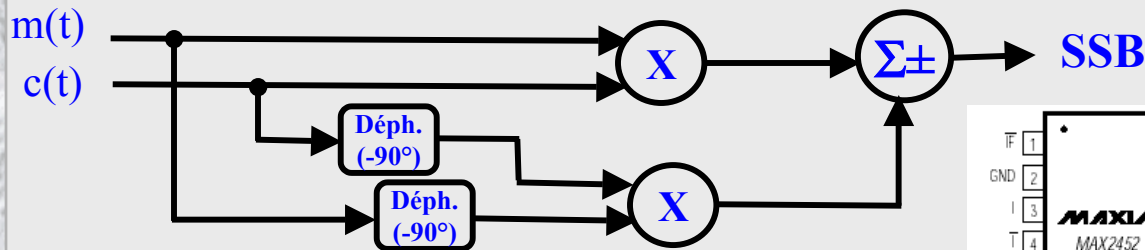


Problème :

Si le spectre du signal $m(t)$ s'étale jusqu'au DC.



➤ Déphasage (très efficace) :



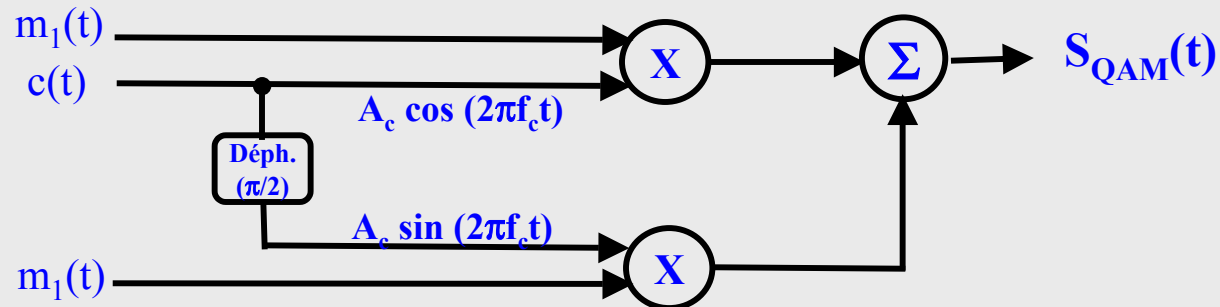


Modulation d'amplitude :

Modulation en quadrature (multiplexage) : QAM

En exploitant l'orthogonalité du sinus et du cosinus et afin d'optimiser l'utilisation des bandes spectrales on envoie deux signaux distincts.

$$s_{\text{QAM}}(t) = A_c m_1(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) + A_c m_2(t) \cdot \sin(2\pi f_c t)$$



Dans le domaine fréquentiel :

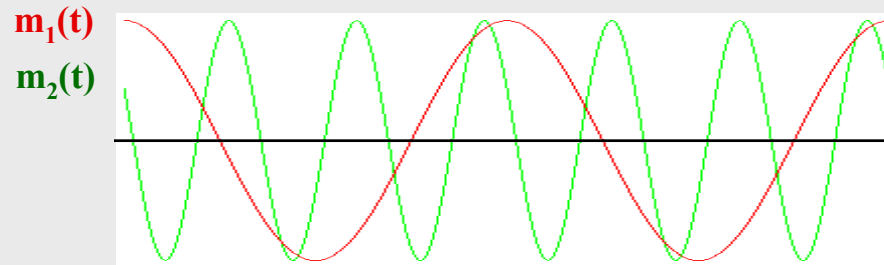
$$S(f) = (A_c/2) \cdot [M_1(f+f_c) + M_1(f-f_c)] + j (A_c/2) \cdot [M_2(f+f_c) - M_2(f-f_c)]$$

Il est possible de reconstruire les deux signaux qui occupent la même bande de fréquence.

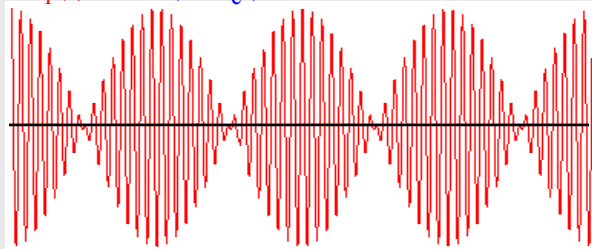


Modulation d'amplitude :

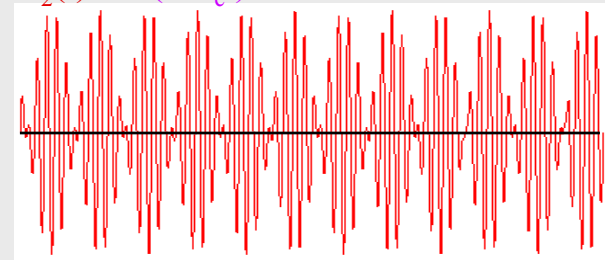
QAM : Modulation en quadrature (multiplexage)



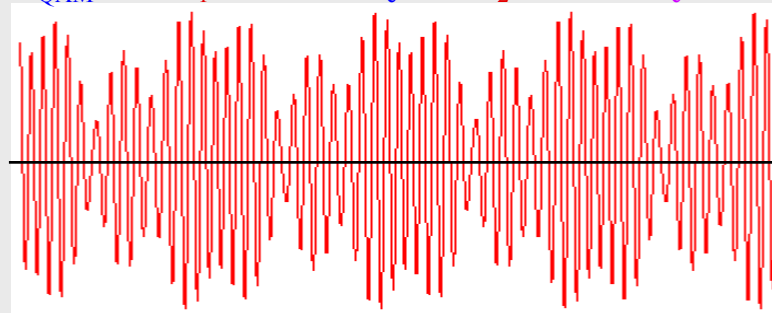
$m_1(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)$



$m_2(t) \cdot \sin(2\pi f_c t)$



$s_{QAM}(t) = m_1(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) + m_2(t) \cdot \sin(2\pi f_c t)$



Quitter

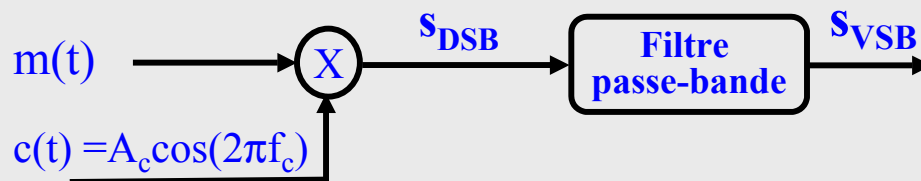




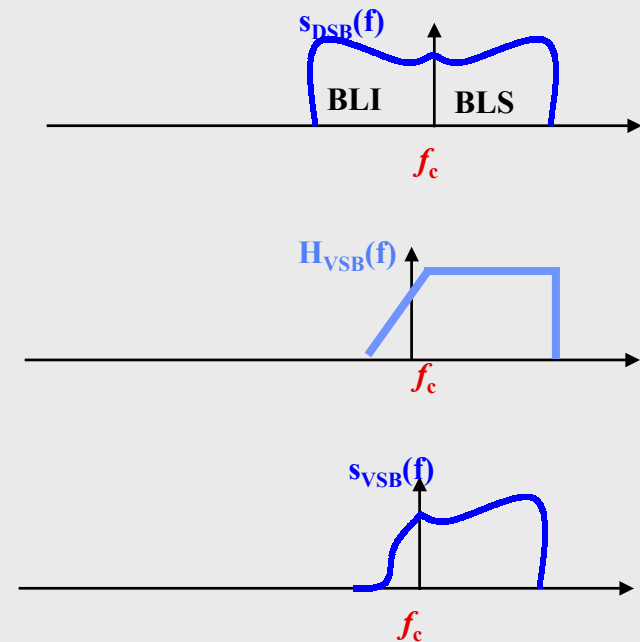
Modulation d'amplitude : Modulation à bande latérale résiduelle (VSB)

Afin d'optimiser l'utilisation du spectre de fréquence de même qu'une SSB mais plus simple à réaliser, on utilise un filtre (non idéal) qui laisse passer une des deux bandes latérales et une partie de l'autre. Donc, on a une réduction importante de la largeur de la bande utilisée.

La modulation à bande latérale résiduelle (VSB : *Vestigial Sideband*) est plus pratique quand la bande de base s'étale jusqu'au DC. La modulation VSB est utilisée beaucoup dans les diffusions des signaux tv.



Comment choisir le filtre pour pouvoir restituer le signal !?





Modulation d'amplitude : Modulation à bande latérale résiduelle (VSB)

Pour un signal DSB-SC :

$$S_{\text{DSB}}(f) = \frac{1}{2} A_c \cdot M(f) * [\delta(f+f_c) + \delta(f-f_c)]$$

$$= \frac{1}{2} A_c \cdot [M(f+f_c) + M(f-f_c)]$$

$$S_{\text{VSB}}(f) = \frac{1}{2} A_c [M(f+f_c) + M(f-f_c)] \cdot H(f)$$

$$= \frac{1}{2} A_c [M(f+f_c) H(f) + M(f-f_c) H(f)]$$

Sachant que : $X(f - f_c) = X(f) * \delta(f - f_c)$

$$S_{\text{VSB}}(f) = \frac{1}{2} A_c [M(f) H(f-f_c)] * \delta(f+f_c) + \frac{1}{2} A_c [M(f) H(f+f_c)] * \delta(f-f_c)$$

$$= \frac{1}{2} A_c [M(f) H(f-f_c) + M(f) H(f+f_c)] * [\delta(f+f_c) + \delta(f-f_c)]$$

$$- \frac{1}{2} A_c [M(f) H(f-f_c)] * \delta(f-f_c)$$

$$- \frac{1}{2} A_c [M(f) H(f+f_c)] * \delta(f+f_c)$$

$H(f)=0$ pour $f = \pm 2.f_c$

$$S_{\text{VSB}}(f) = \frac{1}{2} A_c M(f) [H(f-f_c) + H(f+f_c)] * [\delta(f+f_c) + \delta(f-f_c)]$$

Donc pour pouvoir restituer le signal $m(t)$ de la même façon que pour une modulation DSB, il suffit de prendre un filtre dont :

$$H(f-f_c) + H(f+f_c) = C$$

