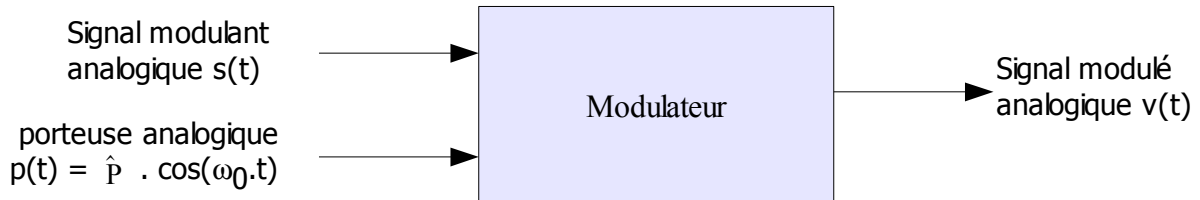


Chapitre 2 : communications numériques.

3) modulations numériques .

A) Rappels sur les modulations analogiques :

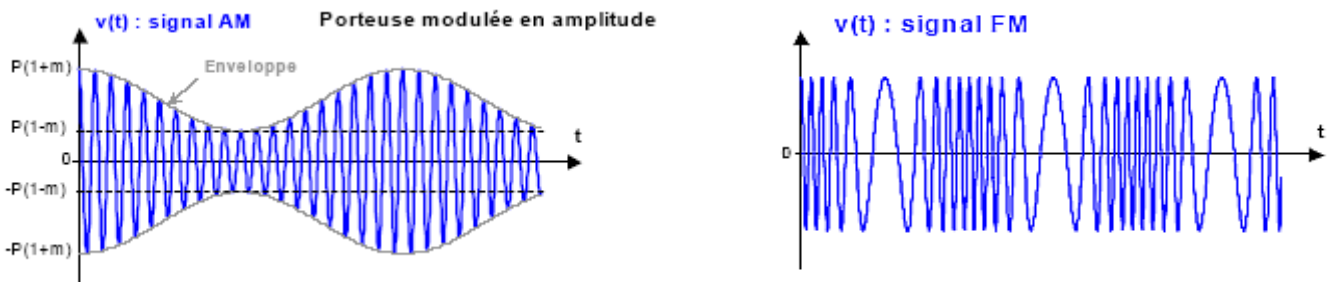


Les trois types de modulations analogiques sont :

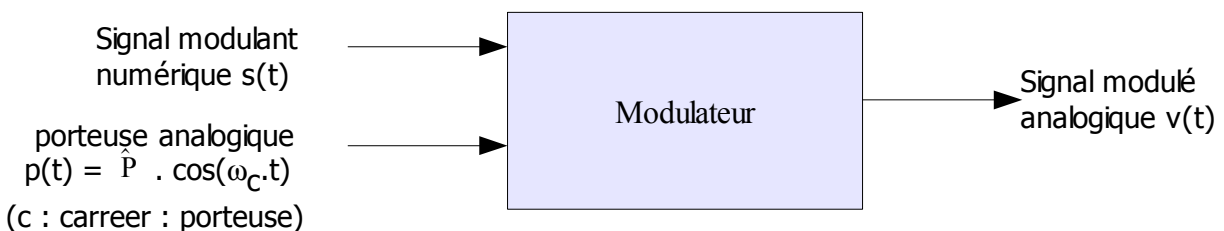
- la modulation d'amplitude AM : le signal modulant se trouve dans l'amplitude (ou l'enveloppe) du signal modulé.
- la modulation de fréquence FM : le signal modulant se trouve dans la fréquence du signal modulé.
- la modulation de phase PM : le signal modulant se trouve dans la phase du signal modulé.

Si le signal modulant est sinusoïdal et s'écrit : $s(t) = \hat{S} \cdot \cos(2.\pi.F \cdot t)$, alors le signal modulé $v(t)$ s'écrit :

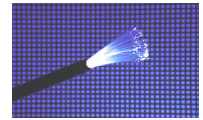
- modulation AM : $v(t) = \hat{P} \cdot (1+m.\cos(2.\pi.F \cdot t)).\cos(\omega_0.t)$ où m est l'indice de modulation.
- modulation FM : $v(t) = \hat{P} \cdot \cos(\omega_0.t + m.\sin(2.\pi.F \cdot t))$ où m est l'indice de modulation.
- modulation PM : $v(t) = \hat{P} \cdot \cos(\omega_0.t + k.\hat{S}.\cos(2.p.F \cdot t))$



B) étude des trois types de modulations numériques de base :

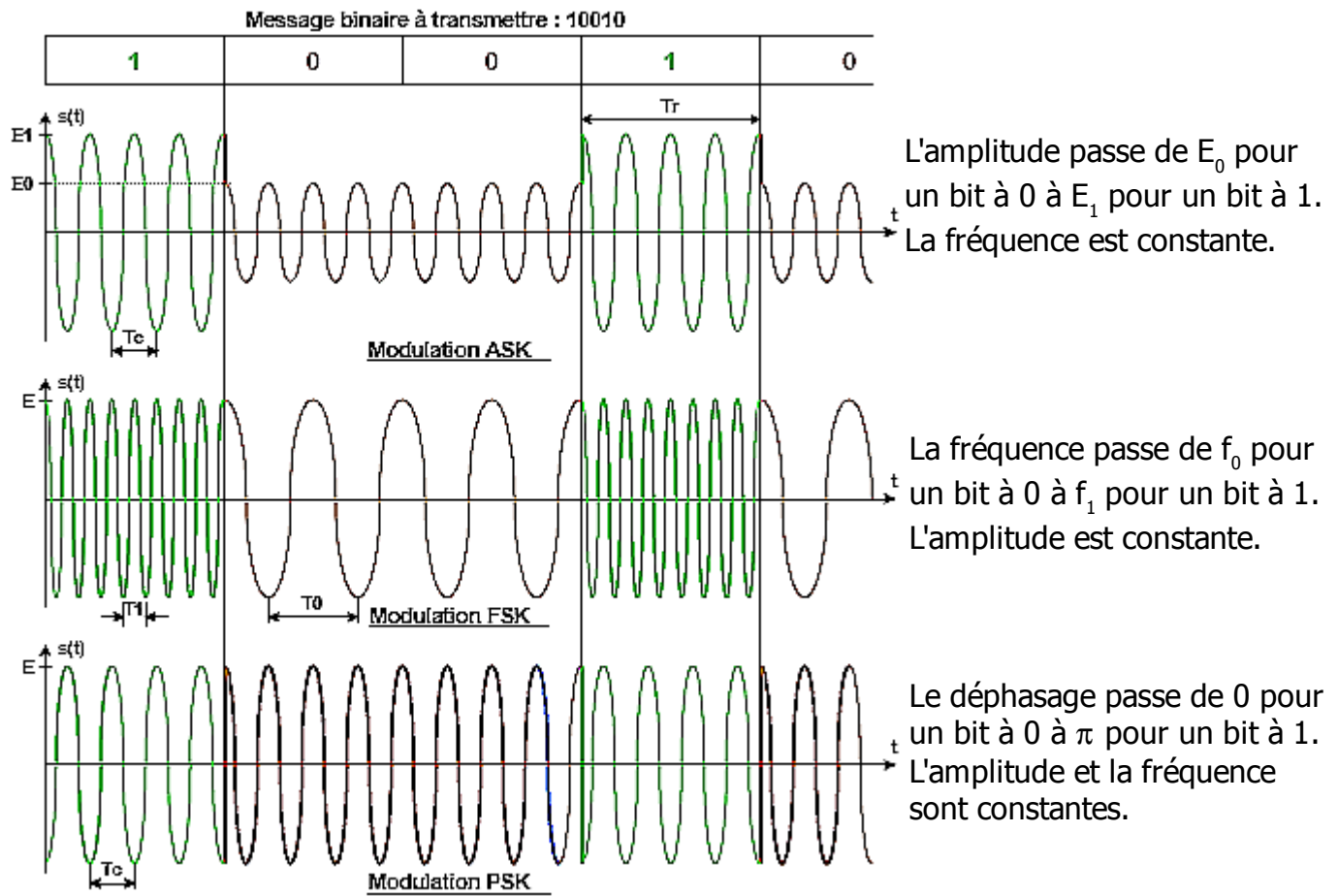


Ce qui change : comme $s(t)$ est numérique, il ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs (par ex 2 en binaire) et le paramètre de la porteuse qui va varier le fera par saut (:Skip en anglais)



Trois types de modulation numérique :

- ASK (Amplitude Shift Keying), ou Modulation par Déplacement d'Amplitude (MDA).
- FSK (Frequency Shift Keying), ou Modulation par Déplacement de Fréquence (MDF).
- PSK (Phase Shift Keying), ou Modulation par Déplacement de Phase (MDP).

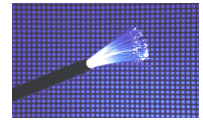


Type de modulation	Expression de $s(t)$	
	Transmission d'un « 0 »	Transmission d'un « 1 »
ASK	$E_0 \cos(2\pi f_c t)$	$E_1 \cos(2\pi f_c t)$
FSK	$E \cos(2\pi f_0 t)$	$E \cos(2\pi f_1 t)$
PSK	$E \cos(2\pi f_c t)$	$E \cos(2\pi f_c t + \pi)$

Remarques

• en modulation ASK : $E_0 = E - \Delta E$ et $E_1 = E + \Delta E$ où E est l'amplitude de la porteuse.
Un cas particulier est : $E_0 = 0$ et $E_1 = +V$: on appelle cette modulation OOK.

- en modulation FSK : $f_0 = f_c - \Delta f$ et $f_1 = f_c + \Delta f$.



C) modulation vectorielle (I,Q) et diagramme de constellation :

On a vu que le signal modulé pouvait s'écrire :

$$v(t) = E \cdot \cos(2.\pi.f \cdot t + \varphi)$$

où les paramètres E (en ASK) , f (en FSK) ou φ (en PSK) portent la valeur numérique du signal modulant.

En ne tenant compte que des modulations d'amplitude et de phase, $f=f_c$ et en décomposant :

$$v(t) = E.\cos(2.\pi.f_c \cdot t).\cos(\varphi) - E.\sin(2.\pi.f_c \cdot t).\sin(\varphi)$$

$$v(t) = I \cdot \cos(2.\pi.f_c \cdot t) + Q \cdot \cos(2.\pi.f_c \cdot t + \pi/2) \text{ avec } I = E.\cos(\varphi) \text{ et } Q = E.\sin(\varphi)$$

Le terme $\cos(2.\pi.f_c \cdot t + \pi/2)$ est en quadrature par rapport à la fonction $\cos(2.\pi.f_c \cdot t)$.
Les paramètres (I,Q) représentent le signal modulé v(t) et on les place sur le graphique :

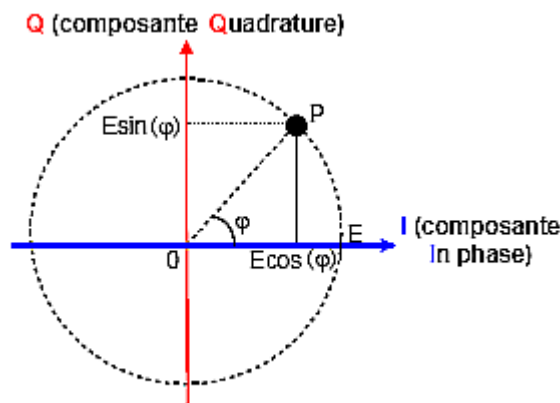


figure 16: Point de constellation

Comme E ou φ peuvent prendre plusieurs valeurs en modulation ASK ou PSK, on obtient ainsi plusieurs points (I,Q) possibles qui forment le diagramme de constellation :

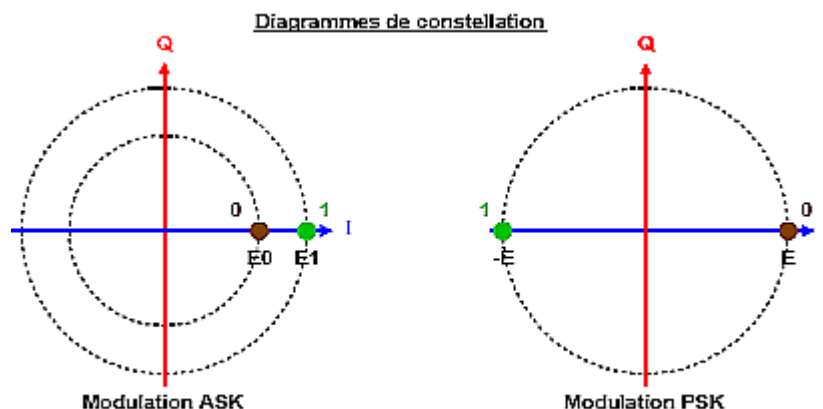
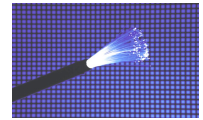
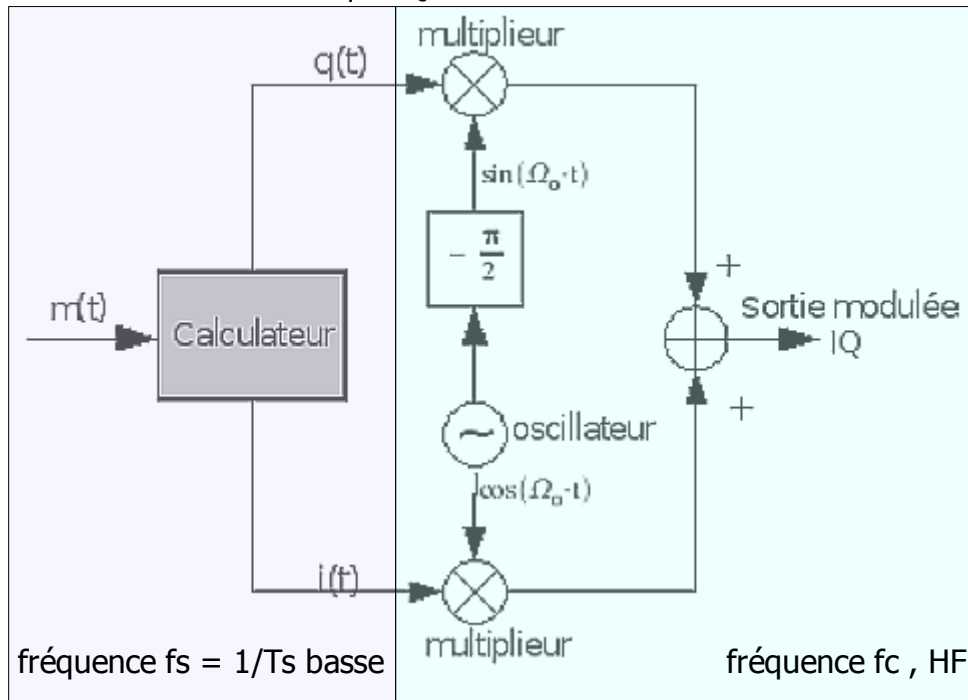


figure 19: Constellations ASK et PSK



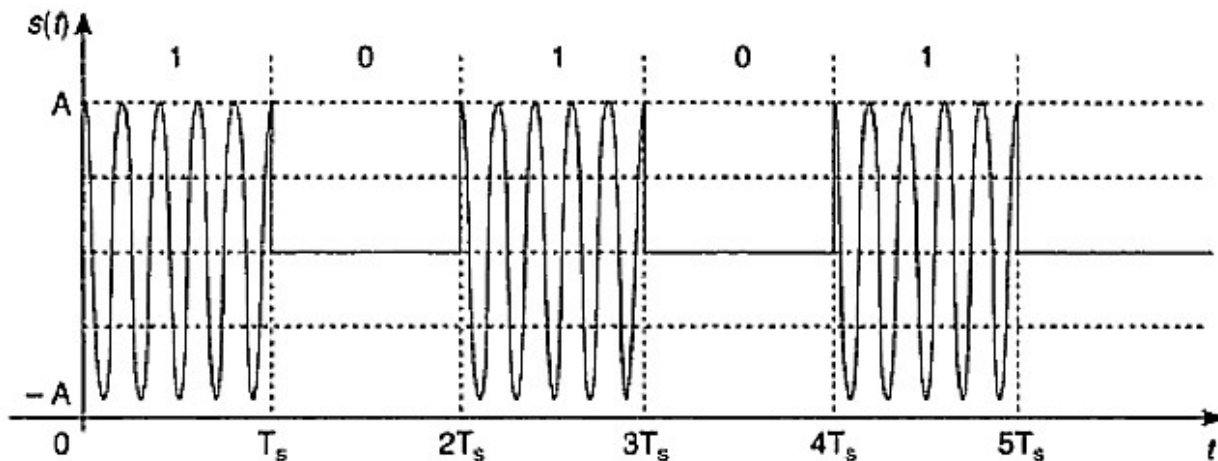
Synoptique d'un modulateur numérique IQ :



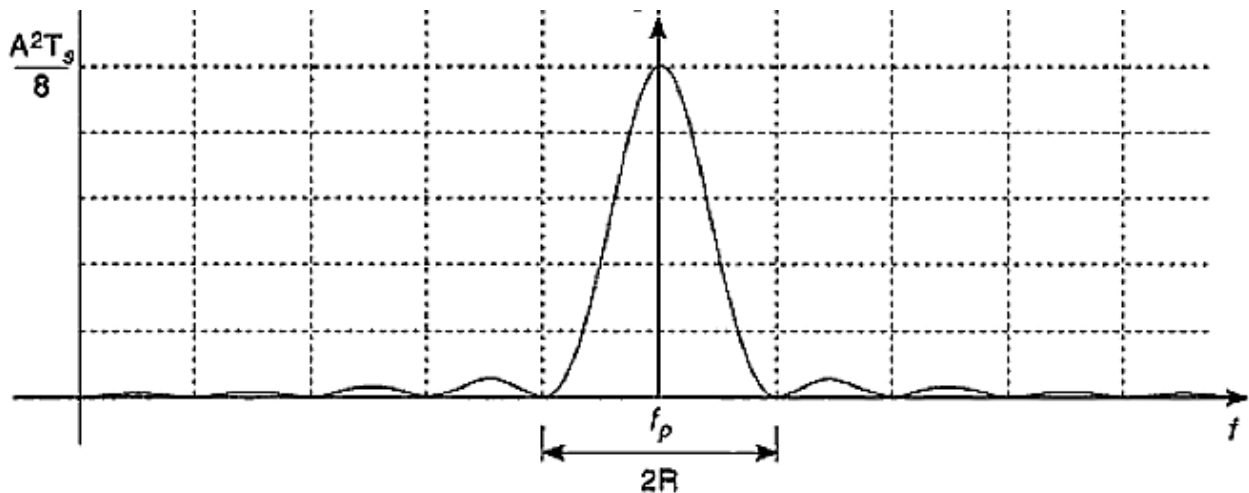
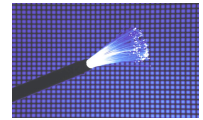
$I(t)$ et $Q(t)$ varient au rythme du symbole choisi pour coder le message $m(t)$ et le signal modulé peut être représenté par le vecteur de coordonnées (I, Q) , d'où le terme de modulation vectorielle.

D) Modulations usuelles OOK, M-PSK et M-QAM

Dans les modulations numériques MDA, on utilise seulement la modulation OOK (On Off Keying)



aspect temporel :

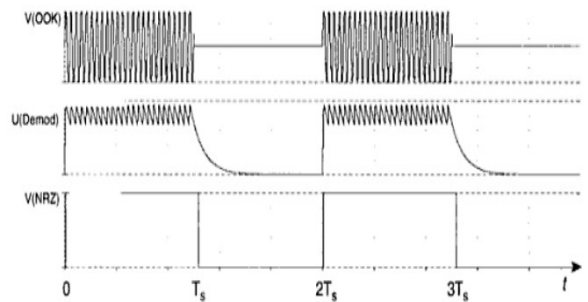
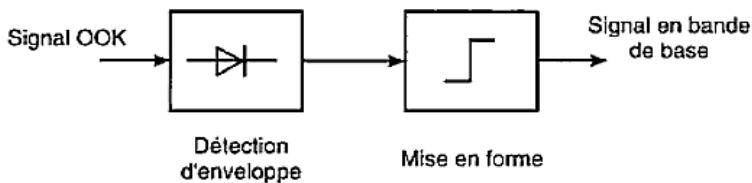


DSP du signal OOK : on constate que le spectre est centré sur la fréquence porteuse et que la bande passante nécessaire à la transmission de ce signal est $B = 2.R = 2.$ Dsymbole

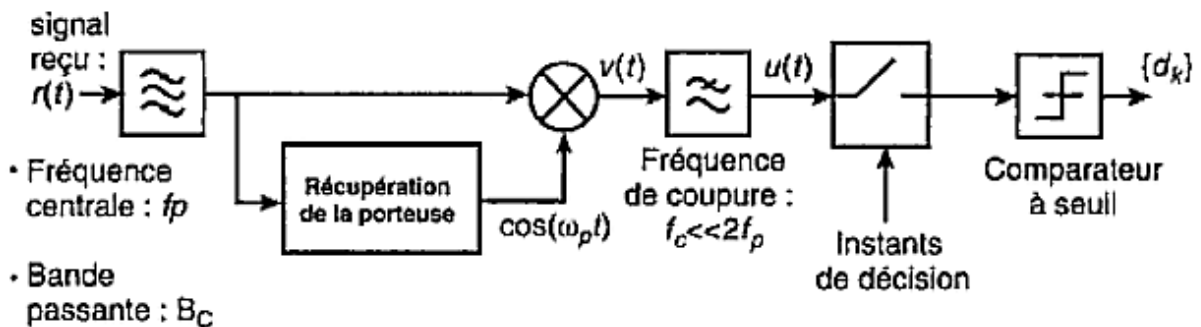
On définit l'**efficacité spectrale** d'une modulation par : $\eta = \frac{\text{débit binaire}}{\text{bande utilisée}}$ en bits/(s.Hz) = $\frac{Db}{B}$

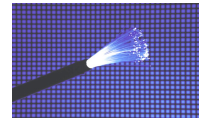
Ici, avec la modulation OOK : $\eta = 0,5$.

Démodulation du signal modulé OOK : on trouve, comme pour la modulation AM, deux méthodes :
démodulation par détection d'enveloppe :



Démodulation par détection synchrone :





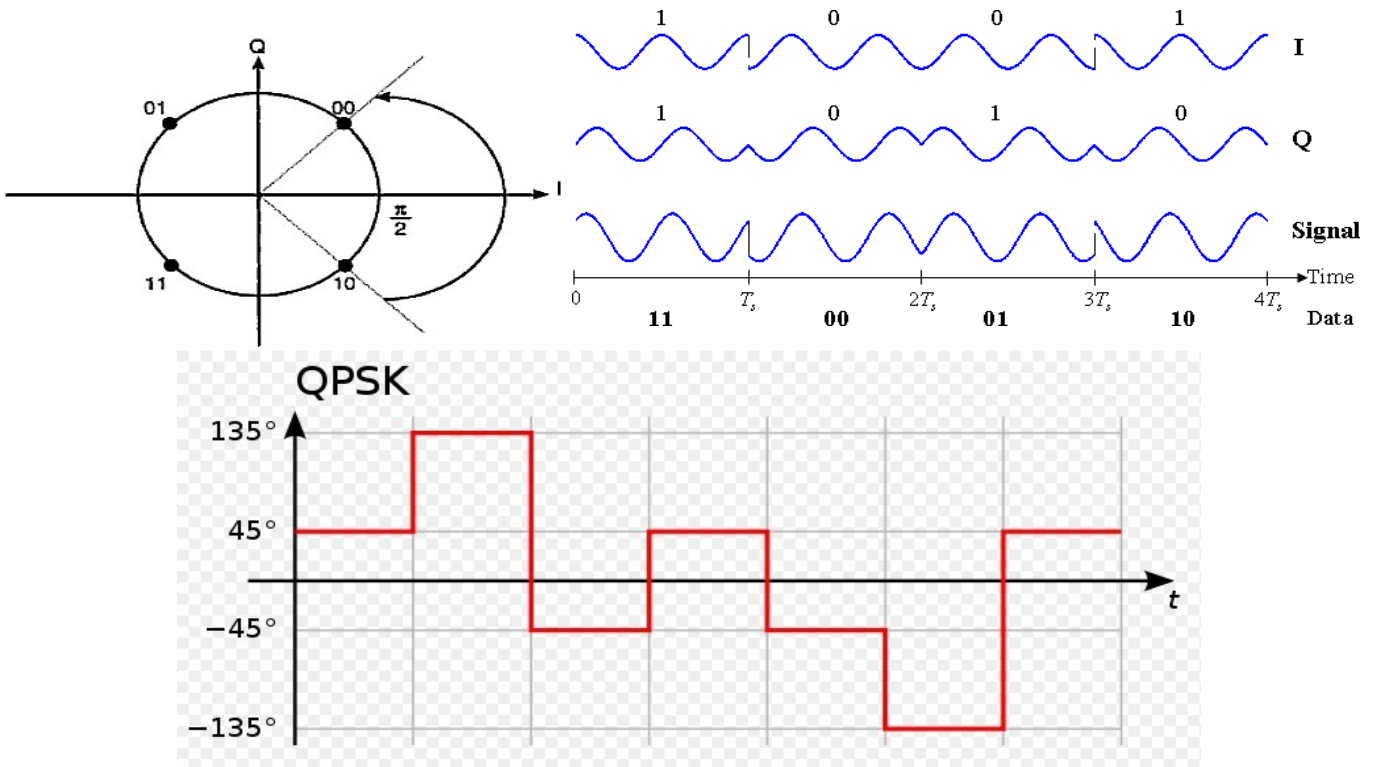
Modulations numériques M-PSK : on représente les symboles par $M = 2^n$ valeurs de déphasages.

• si $n=1$: on a deux états de phase (souvent 0° pour un bit à 0 et 180° pour un bit à 1).

Cette modulation est appelée **BPSK** (B = Binary)

La vitesse de transmission est de $1/T_b = D_b$. Si on veut augmenter cette vitesse, il faut grouper les bits en symboles.

• si $n=2$, on a quatre états de phase et le diagramme de constellation est :



On transmet 2 bits pendant T_s donc $D_b = 2.D_s = 2.R$

La vitesse de transmission est de $2R$ bits/s et la vitesse de modulation de R bauds (symboles/s)

Spectre du signal modulé **QPSK** (Quadrature PSK) pour un débit binaire $D_b = 1$ kbits/s:

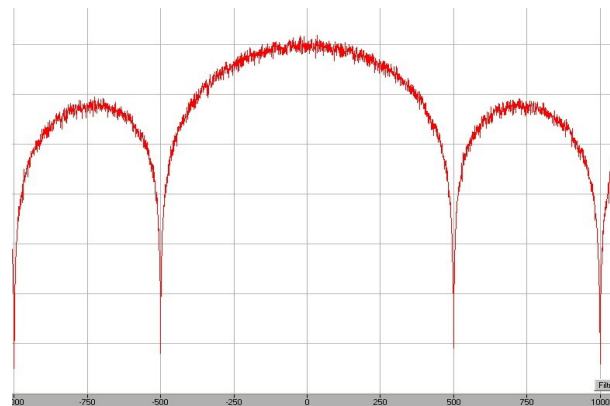
Le lobe principal a pour largeur :

$$B =$$

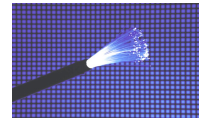
Les lobes secondaires ont pour largeur :

L'efficacité spectrale est de :

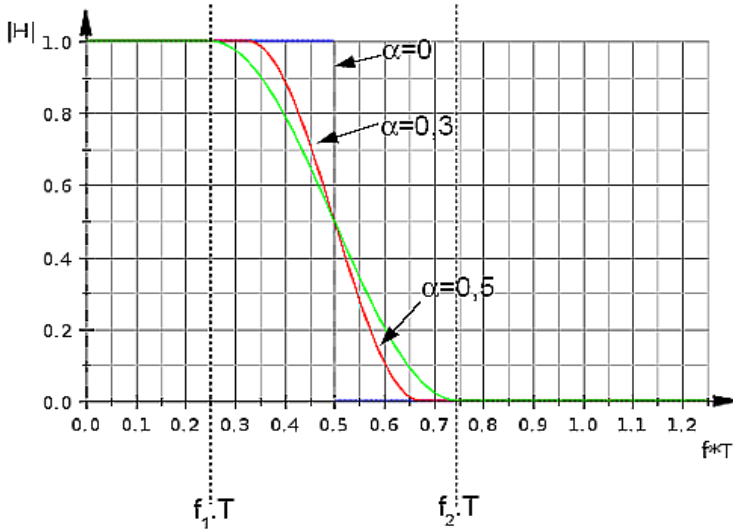
$$\eta = \frac{\text{débit binaire}}{\text{bande utilisée}} =$$



Pour améliorer l'efficacité spectrale, on peut diminuer la largeur B en filtrant les données . Les filtres les plus utilisés sont : le filtre de Gauss et le filtre de Nyquist (en cosinus surélevé).



Filtre en cosinus surélevé (raised cosine) :



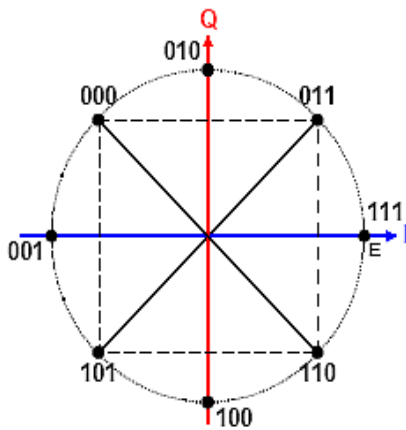
Le filtre est défini par deux fréquences

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{1-\alpha}{2T_s} \\ f_2 &= \frac{1+\alpha}{2T_s} \end{aligned} \right\} \alpha = \text{facteur de roll-off}$$

La largeur utile du filtre est:

$$Lu = \frac{1+\alpha}{T_s}$$

● Modulations M-PSK avec $M > 4$:



Taux d'erreur = BER =

nombre de bits erronés / N bits de la séquence

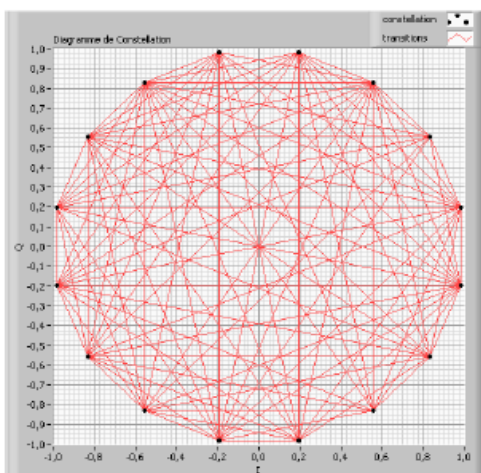
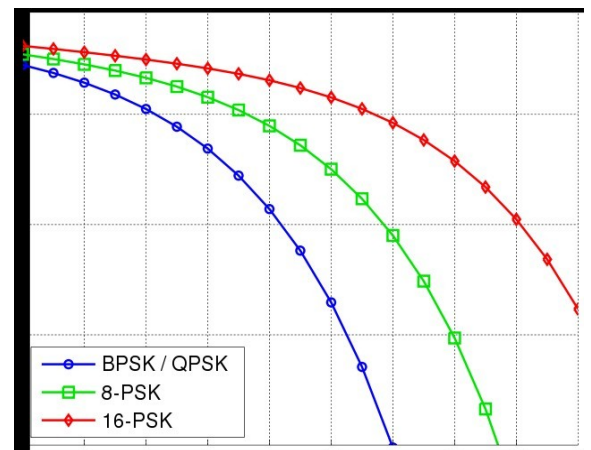


figure 25: Diagramme idéal

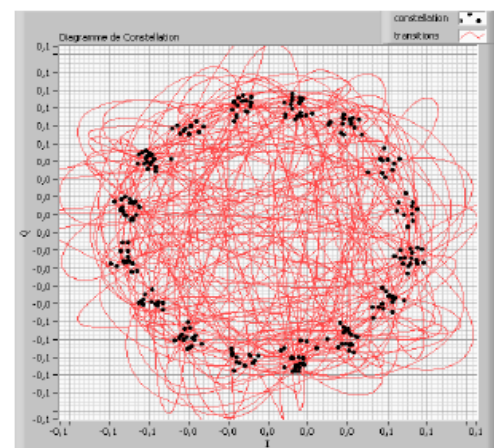
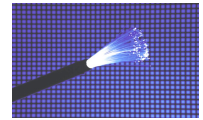


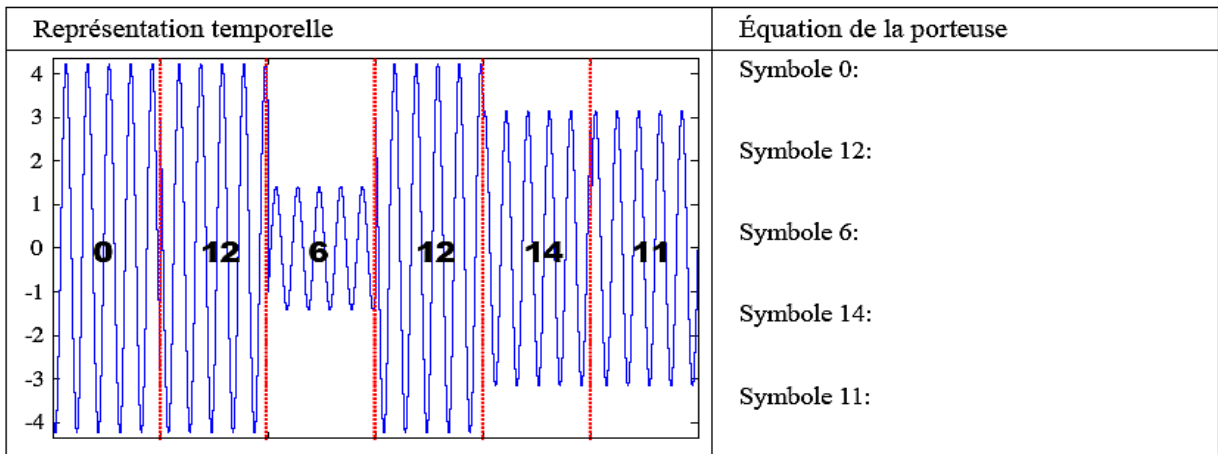
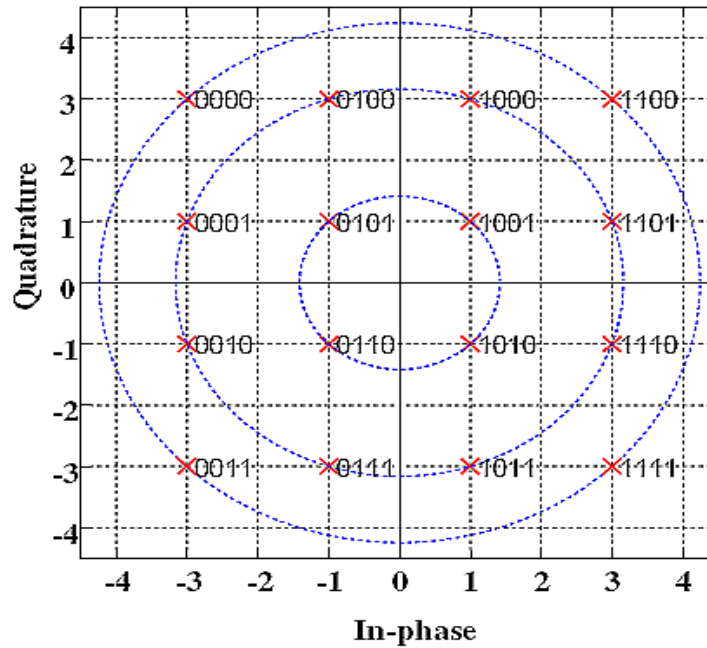
figure 26: En présence de bruit la phase et l'amplitude sont modifiées

L'écart entre les points diminuant, ces modulations ont une efficacité spectrale plus grande mais sont de plus en plus sensibles au bruit.

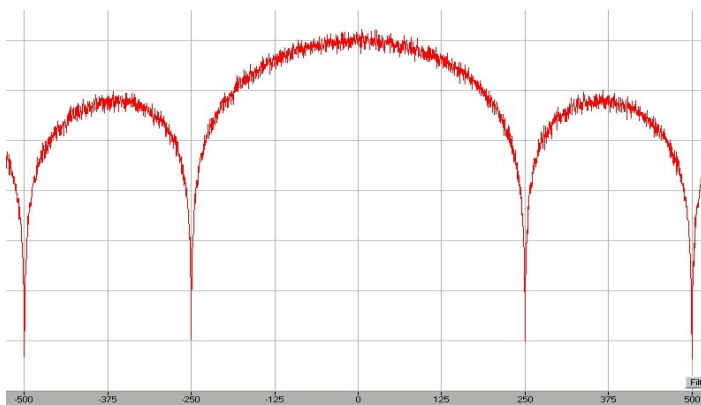


Modulations numériques M-QAM (Quadratic Amplitude Modulation):

on combine un saut de phase et d'amplitude pour obtenir le diagramme de constellation suivant pour une modulation 16QAM :



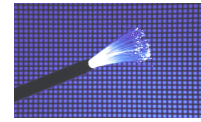
Avantage :



Spectre du signal modulé 16-QAM sans filtre



Spectre du même signal avec filtre de Nyquist



Utilisations de ces modulations :

DVB-S Réseau Satellite

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) ou modulation par déplacement de porteuse en quadrature de phase. Deux bits sont transmis dans le même symbole (constellation), décalés de 90 degrés, ce qui fait 4 états possibles à un moment donné. Le débit est d'environ 20 à 30 Msymboles/s. Un double codage FEC (Reed-Solomon 188,204,8), un entrelacement et un codage redondant (ponctuation entre 1/2 et 7/8) diminuent au maximum l'influence du bruit.

DVB-T Réseau Terrestre (appelée TNT, Télévision Numérique Terrestre dans la francophonie)

COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex) ou multiplexage à répartition de fréquence orthogonale codée. Le flux à haute vitesse est transmis avec 1705 ou 6817 porteuses, chacune étant modulée à bas débit en QPSK ou QAM avec 16 ou 64 symboles. Le débit symboles (somme de toutes les porteuses) varie en fonction de la largeur du canal et se situe entre 5 et 7 Msymboles/s. Comme pour le DVB-S, deux codages FEC sont opérés. Norme : ETSI EN 300 744 V1.4.1 (2001-01)

DVB-C Réseau Câblé

simple et robuste (modulation 16-QAM, 64-QAM) Norme: ETSI EN 300 429 V1.2.1 (1998-04). La modulation est QAM avec 16, 32, 64, 128 ou 257 symboles. Le débit est d'environ 7 Msymboles/s pour un pas de canal de 8 MHz. Un seul codage FEC est utilisé car aucun parasite n'est à craindre sur le câble.

Efficacité spectrale théorique comparées	
Modulation MSK	1 bit/second/Hz
BPSK	1 bit/second/Hz
QPSK	2 bits/second/Hz
8PSK	3 bits/second/Hz
16 QAM	4 bits/second/Hz
32 QAM	5 bits/second/Hz
64 QAM	6 bits/second/Hz

Les types de Modulation et leurs applications	
MSK, GMSK	GSM, CDPD
BPSK	telemetrie spatiale, cable modems
QPSK DQPSK	Satellite, CDMA, NADC, TETRA, PHS, PDC, LMDS, DVB-S, cable, cable modems, TETS
OQPSK	CDMA, satellite * FSK, GFSK : DECT, paging, RAM mobile data, AMPS, CT2, ERMES, land mobile, public safety
8PSK	Satellite, avionique, telemetry pilots for monitoring broadband video systems
16 QAM	liaison numérique hyperfréquence, modems, DVB-C, DVB-T
32 QAM	microonde terrestre, DVB-T
64 QAM	DVB-C, modems, broadband set top boxes, MMDS
256 QAM	Modems, DVB-C (Europe), Video numérique(US)

Modulations MDF :

Pour une modulation FSK, l'information transmise (un seul bit pouvant prendre les valeurs 0 ou 1) est portée par deux fréquences f_0 et f_1 distinctes.

Ces deux fréquences sont liées à la fréquence f_c de la porteuse par les relations $f_0 = f_c - \Delta f$ et $f_1 = f_c + \Delta f$, où Δf désigne l'excursion de fréquence du signal modulé $s(t)$.

Comme on a défini un indice de modulation pour la modulation analogique FM $\left(m = \frac{\Delta f}{f}\right)$ -avec

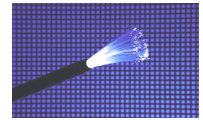
un signal en bande de base sinusoïdale-, on peut définir un équivalent en modulation FSK par

$$\mu = \frac{|f_1 - f_0|}{R} = \frac{2 \Delta f}{R}, \text{ (R étant la rapidité } R=1/T_s=D\text{). On retrouve un équivalent de l'expression de la}$$

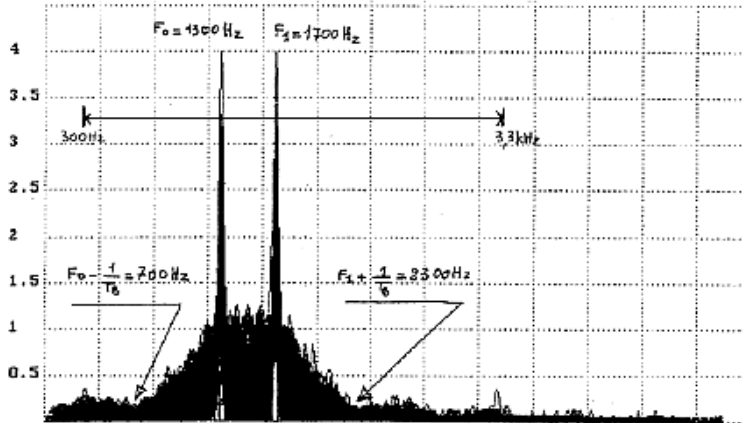
bande spectrale occupée de Carson : $B \approx 2 \cdot (\Delta f + R) = 2 R \cdot (\mu + 1)$.

On trouve deux types de modulations MDF :

- modulation FSK à phase discontinue : f_0 et f_1 sont créés par deux oscillateurs séparés.
- modulation FSK à phase continue : f_0 et f_1 sont créés par un VCO.

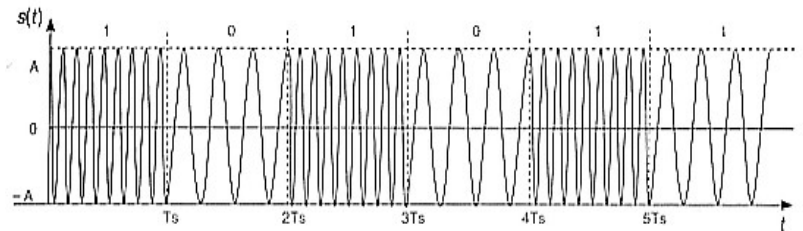
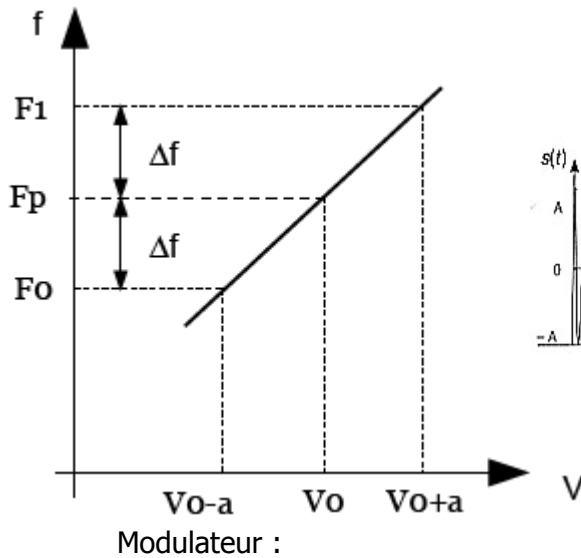


MDF à phase discontinue : le signal modulé est la somme de deux modulations OOK de fréquences f_0 et f_1 .



spectre du signal modulé FSK à phase discontinue.

MDF à phase continue :



aspect temporel de la modulation FSK

Spectre du signal modulé FSK :

Le spectre a une allure qui dépend de l'indice de modulation μ .

Si $\mu = 0,5$, la modulation est appelée MSK (Minimum Shift Keying)
L'occupation spectrale y est minimale.

