

Communication numériques

Chapitre 3

Modulations numériques

1. introduction

Pour des raisons identiques à celles de signaux analogiques, **les signaux numériques modulent une porteuse sinusoïdale** afin de présenter, soit des caractéristiques compatibles avec le canal de transmission utilisé, soit pour transmettre plusieurs signaux simultanément (multiplexage). Les signaux numériques présentent plusieurs propriétés intéressantes pour les télécommunications : souplesse des traitements, signal à états discrets donc moins sensibles aux bruits (il suffit de seuiller le signal) et simple à régénérer, utilisation de codes correcteurs d'erreur, cryptage de l'information. En revanche, à quantité d'informations transmise identique, un signal numérique nécessite une bande de fréquence nettement plus importante.

- *L'occupation spectrale* du signal émis doit être connue pour utiliser efficacement la bande passante du canal de transmission.

2. les modulations numériques

La modulation consiste à modifier un ou plusieurs paramètres d'une onde porteuse

$S(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ centrée sur la bande de fréquence du canal.

Les paramètres **modifiables** sont :

- L'amplitude : A
- La fréquence : $f_0 = \omega_0 / 2\pi$
- La phase: φ_0

Dans les procédés de **modulation binaire**, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui ne prend que **deux valeurs** possibles.

Dans les procédés de **modulation M-aire**, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui prend **M valeurs**. Ceci permet d'associer à **un état** de modulation **un mot de n éléments binaires**. Le nombre d'états est donc $M = 2^n$.

Ces paquets de n éléments binaires proviennent du découpage du train binaire issu du codeur.

Les types de modulation les plus fréquemment rencontrés sont les suivants :

- Modulation par Déplacement d'Amplitude **MDA** (*Amplitude Shift Keying ASK*).
- Modulation par Déplacement de Phase **MDP** (*Phase Shift Keying PSK*).
- Modulation par Déplacement de Phase Différentielle **MDPD** (*Differential Phase Shift Keying DPSK*).

- Modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature **MAQ** (*Quadrature Amplitude modulation QAM*)
- Modulation par Déplacement de Fréquence **MDF** (*Frequency Shift Keying FSK*).

2.1. Vocabulaire

La transmission de signaux numériques fait appel à quelques notions de base qui sont rappelées ci-après :

La bande passante W d'un support de communication (câble, fibre optique etc) correspond à la plage de fréquences où il présente les meilleures caractéristiques de transmission.

Pour transmettre des signaux numériques (signal carré) il faut que la ligne de transmission possède une grande bande passante. Les signaux analogiques utilisent une bande passante plus étroite. Le RTC (réseau téléphonique commuté) offre un intervalle de fréquence de 300 à 3400HZ ce qui limite la bande passante à 3,1kHz.

Le message est constitué d'une suite d'éléments binaires -ou bits- mutuellement indépendants et prenant des valeurs 0 et 1.

Le symbole : c'est un élément d'un alphabet.

Signaux m-aires

En fait, le propre des signaux numériques est qu'ils sont caractérisés par des états quantifiés qui ne sont pas nécessairement binaires (2 valeurs discrètes, "-1" et "1" ou "0" et "1"), mais peuvent prendre M valeurs discrètes (par exemple, pour M=4 valeurs discrètes, "- 3", "-1" "1" ou "3"). On parle alors d'un alphabet M-aire.

En pratique, les valeurs de M seront de la forme 2^n (par exemple : 2, 4, 16...) car **les symboles** sont créés à partir d'une suite de n bits. Un mot de n bits forme alors un symbole M-aire.

- En groupant, sous forme d'un bloc, n symboles binaires indépendants, on obtient un alphabet de **$M = 2^n$** symboles M-aires.
- Ainsi un symbole M-aire véhicule l'équivalent de **$n = \log_2 M$** bits.

Etat : - une amplitude

- une fréquence
- une phase
- Valeur constante

La valence V (=M): le codage associe une valeur physique (signal électrique) à une valeur logique (signal binaire), la valence notée V est le nombre de valeurs que peut prendre l'état physique à un instant t.

C'est le nombre d'états significatifs du signal numérique. (Significatif : représentatif d'un symbole)

T_b : Temps bit exprimé en seconde (durée d'un bit).

La rapidité de modulation R (ou vitesse de modulation) : c'est le nombre de valeurs physiques émises par seconde.

$R = 1/T = D/\log_2 M$ s'exprime en "**bauds**". Où T est la durée d'un état

On ne peut dépasser une valeur $R_{\max}$.

Ce dernier résultat a été démontré par **Nyquist** (1928) qui établit un rapport entre la rapidité maximum et la bande passante W , $R_{\max} = 2 W$ (Ce résultat est théorique et, dans la pratique, $R_{\max} = 1,25 W$).

Exemple : une ligne téléphonique a une bande passante comprise entre 300 et 3400 Hz. La rapidité de modulation maximale est donc de $R_{\max} = 2.(3400-300) = 6200$ (bauds).

Le débit binaire D : également appelé vitesse de transmission, c'est le nombre de valeurs logiques (bits) transmises par seconde.

$D = 1/T_b$ s'exprime en "**bits par seconde**". Où T_b est la durée d'un bit

Il sera égal ou supérieur à la rapidité de modulation selon qu'un changement d'état représentera un bit ou un groupement de n bits.

Pour un **alphabet M-aire**, on a la relation fondamentale : $T = nT_b$ soit $D = n R$.

Le taux d'erreur par bit T.E.B :

$T.E.B = \text{nombre de bits faux} / \text{nombre de bits transmis}$

On notera la différence entre la probabilité d'erreur **Pe** et le TEB. Au sens statistique, on a $Pe = E(\text{TEB})$. Le TEB tend vers Pe si le nombre de bits transmis tend vers l'infini.

L'efficacité spectrale η : L'efficacité spectrale s'exprime en bit/s/Hz. Elle caractérise la capacité d'une modulation à "passer" un débit maximum dans une largeur de canal minimum. Elle est comprise entre 2 et 8 pour des modulations dites performantes d'une modulation se définit par le paramètre

$\eta = D/B$ s'exprime en "**bit/seconde/Hz**".

Où D est le "débit binaire" et B est la largeur de la bande occupée par le signal modulé.

Pour un signal utilisant des symboles Maires, on aura : $\eta = \log_2 M / B T$ bit/sec/Hz.

Remarque :

Pour B et T donnés, l'efficacité spectrale augmente avec le nombre $n = \log_2 M$. C'est la raison d'être de la modulation M-aire.

Interférence inter symbole : le symbole transmis précédemment affecte le symbole actuellement reçu.

Bruit : présent pendant la transmission (propagation, bruit équipements, brouilleurs)

Caractérisé par sa densité de probabilité, généralement supposé Bruit Additif Blanc Gaussien (BABG).

La quantité de bruit dans un canal est mesurée par le rapport signal-bruit S/N , rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit : $S/N = P_s/P_n$ (en dB : $10 \log_{10} S/N$),

$P_s = \text{puissance du signal reçu}$, $P_n = \text{puissance du bruit reçu}$.

La source de bruit la plus répandue dans les systèmes de télécommunications est due à l'agitation thermique.

La puissance de bruit thermique dans une bande de fréquence de largeur B est:

$P_{Nth} = kTB$ Où B est la bande passante du dispositif considéré, k la constante de Boltzmann ($K=1.381.10^{-23} Jk^{-1}$) et T température ambiante

La densité spectrale de puissance du bruit thermique en entrée d'un récepteur chargé par une résistance à la température de T_0 ($T_0=290$ K) est de -174 dBm par Hz.

Limitations dues au bruit :

Theoreme 2 (Shannon) : La capacité maximale (en bit/s) d'un canal de bande passante W et de rapport signal à bruit S/N est : **$C = W \log_2(1 + S/N)$**

2.2 Le phaseur

Quelque soit le type de modulation, le signal modulé peut s'écrire :

$$x_m(t) = R(t) \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t + \varphi(t)) \quad \text{Eq. 1}$$

où : $R(t)$ est l'amplitude du signal modulé

f_p est la fréquence de la porteuse

$\varphi(t)$ est la phase instantanée

La fréquence instantanée est donnée par :

$$f_{\text{inst}} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d}{dt} (2\pi f_p \cdot t + \varphi(t)) = f_p + \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\varphi}{dt}$$

On introduit le terme (forme exponentielle):

$$\underline{X}_m(t) = R(t) \cdot e^{j\varphi(t)} \quad \text{Eq. 2}$$

Qu'on appelle *le phaseur*, ce phaseur dépend du temps, mais seulement par les grandeurs amplitude et phase. Avec cette notation, le signal $x_m(t)$ est :

$$x_m(t) = \text{Re}(\underline{X}_m(t) \cdot e^{j2\pi f_p t})$$

La forme algébrique du phaseur est :

$$\underline{X}_m(t) = I(t) + jQ(t) \quad \text{Eq. 3}$$

où $I(t)$ est le signal en phase (inphase signal) et $Q(t)$, le signal en quadrature (quadrature signal).

On illustre très souvent le parcours du phaseur dans le plan complexe :

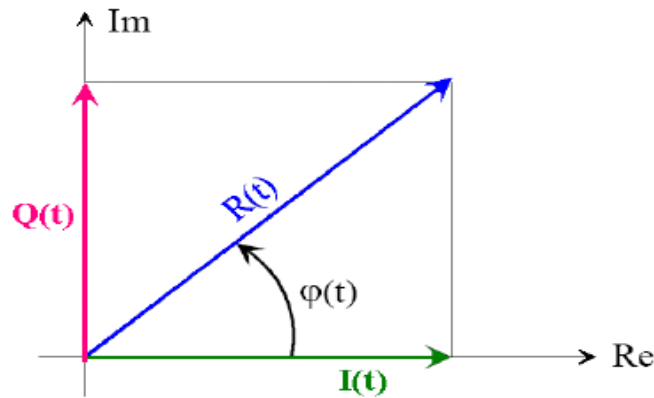


Figure 2.1 – Parcours du phaseur dans le plan complexe.

Les formules de transformation sont les suivantes :

$$\begin{cases} I(t) = R(t) \cdot \cos(\varphi(t)) \\ Q(t) = R(t) \cdot \sin(\varphi(t)) \end{cases} \text{ et } \begin{cases} R(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \\ \varphi(t) = \text{Arc tan}\left(\frac{Q(t)}{I(t)}\right) \end{cases} \quad \text{Eq. 4}$$

La forme exponentielle du signal $x_m(t)$ est donnée par l'équation 1. Si on veut la forme algébrique, on doit introduire l'équation 4 dans l'équation 3. On obtient :

$$\begin{aligned} x_m(t) &= \text{Re}[(I(t) + jQ(t)) \times (\cos(2\pi f_p t) + j \sin(2\pi f_p t))] \\ x_m(t) &= I(t) \cdot \cos(2\pi f_p t) - Q(t) \cdot \sin(2\pi f_p t) \end{aligned} \quad \text{Eq. 5}$$

En général, les appareils de modulation ont comme entrée les signaux I et Q. Le schéma de modulation est donné par :

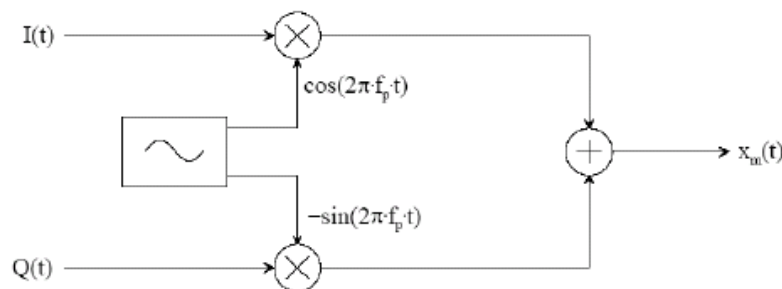


Figure 2.2 – Modulateur ayant les signaux en phase et en quadrature comme entrées.

ou plus globalement :

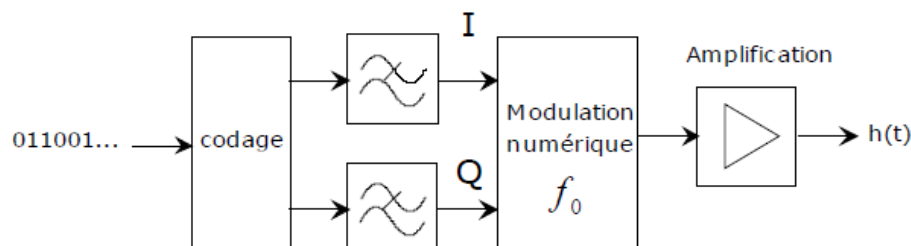


Figure 2.3 – Modulateur numérique

3. Modulation numérique d'amplitude

3.1 Modulation par déplacement d'amplitude - ASK

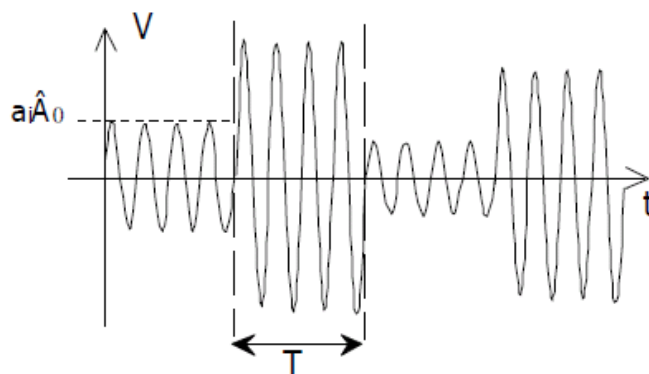
La Modulation d'Amplitude Numérique ou modulation à saut d'amplitude [ASK, Amplitude Shift Keying] affecte à chaque état ou symbole numérique une valeur d'amplitude de la porteuse $h(t)$.

$$h(t) = a_n \hat{A}_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

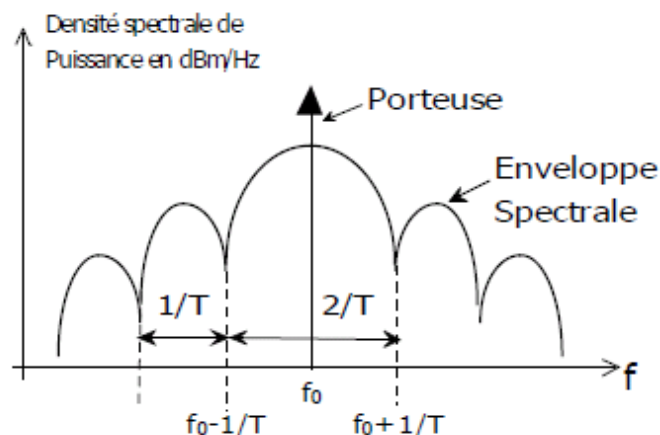
Où a_n est une valeur numérique et n le nombre total de symboles possibles.

Cette modulation est en réalité une modulation d'amplitude avec un message modulant de forme carrée à un ou plusieurs niveaux.

- **Représentation temporelle :**



- **Représentation spectrale :**



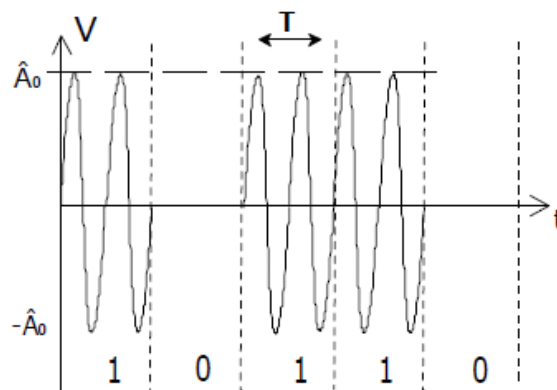
Le spectre de modulation correspond à celui de la modulation AM analogique : la porteuse au centre avec deux bandes latérales symétriques correspondant au spectre du signal modulant.

3.2 Modulation par tout ou rien -OOK- (On Off Keying)

C'est le cas le plus simple et le plus utilisé des modulations d'amplitude, c'est un cas de modulation ASK :

- _ à l'eb "1" correspond l'émission de la porteuse,
- _ à l'eb "0" correspond son interruption.

- **Représentation temporelle :**



- **Représentation spectrale :**

Elle est identique à celle de l'ASK. On peut identifier cette modulation à une modulation d'amplitude (AM) où un signal NRZ occupe la place du signal modulant : deux bandes latérales et la porteuse au centre.

4. Modulations numériques de fréquence - FSK

4.1 Définition

La Modulation de Fréquence Numérique ou modulation à saut de fréquence FSK, Frequency Shift Keying ou bien encore MDF (Modulation par déplacement de fréquence) affecte à chaque état ou symbole numérique une valeur de fréquence différente.

$$h(t) = \hat{A}_0 \cos(2\pi(f_0 + f_i)t + \varphi)$$

où f_i désigne l'écart de fréquence avec la porteuse, écart associé au symbole à transmettre. Pour un nombre m de symbole, on parle de modulation FSK- m .

L'amplitude est constante, et on retrouve les avantages de la modulation de fréquence en radiodiffusion :

- Insensibilité aux variations des conditions de transmissions,
- Possibilité de contrôle du gain.

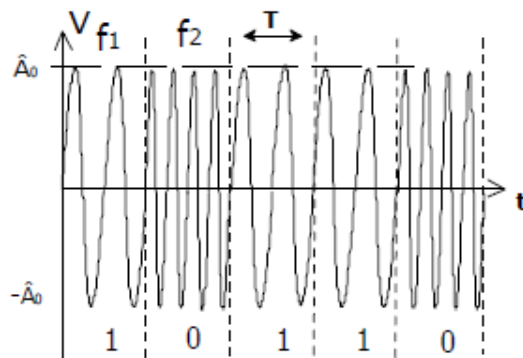
4.2 FSK-2

Même s'il est possible de moduler à un grand nombre d'états, en pratique on fait surtout de la modulation à deux états. On parle alors de FSK 2 ou MDF 2:

- à l'eb "0" correspond f_1
- à l'eb "1" correspond f_2 (peu importe le signe de $f_1 - f_2$)

• Représentation temporelle :

En FSK-2 on associe à chacun des deux états une fréquence particulière.



On définit par analogie avec la FM un taux de modulation ($x = \delta / F_{\max BF}$):

$$x = \frac{|f_2 - f_1|}{R}$$

avec $R = \frac{1}{T}$ [Bd]

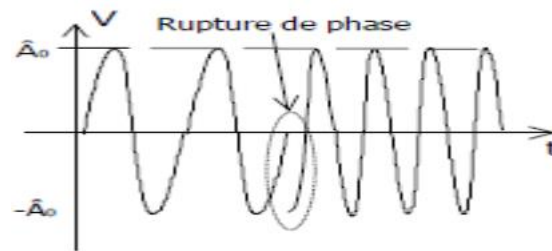
Remarque : si on utilise la déviation par rapport à la porteuse, alors le taux de modulation vaut : ($\Delta f = f_2 - f_0$ ou $\Delta f = f_0 - f_1$) d'où :

$$x = \frac{2 \cdot \Delta f}{R}$$

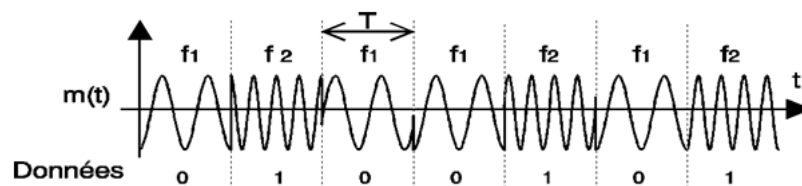
où $R/2$ remplace donc la valeur de la fréquence maximale du signal modulant.

4.3 FSK sans continuité de phase:

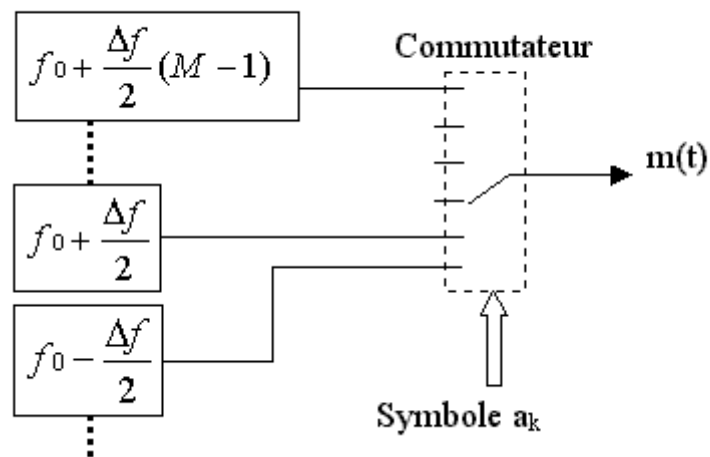
Dans les Modulations par Déplacement de fréquence, on trouve les MDF à phase discontinue pour lesquelles la phase aux instants de transition kT peut sauter brusquement



Dans le cas d'une MDF binaire, a_k prend sa valeur dans l'alphabet $\{-1, 1\}$ en fonction de la donnée "0" ou "1" à transmettre. Un chronogramme est présenté figure suivante où l'on observera les discontinuités de phase.



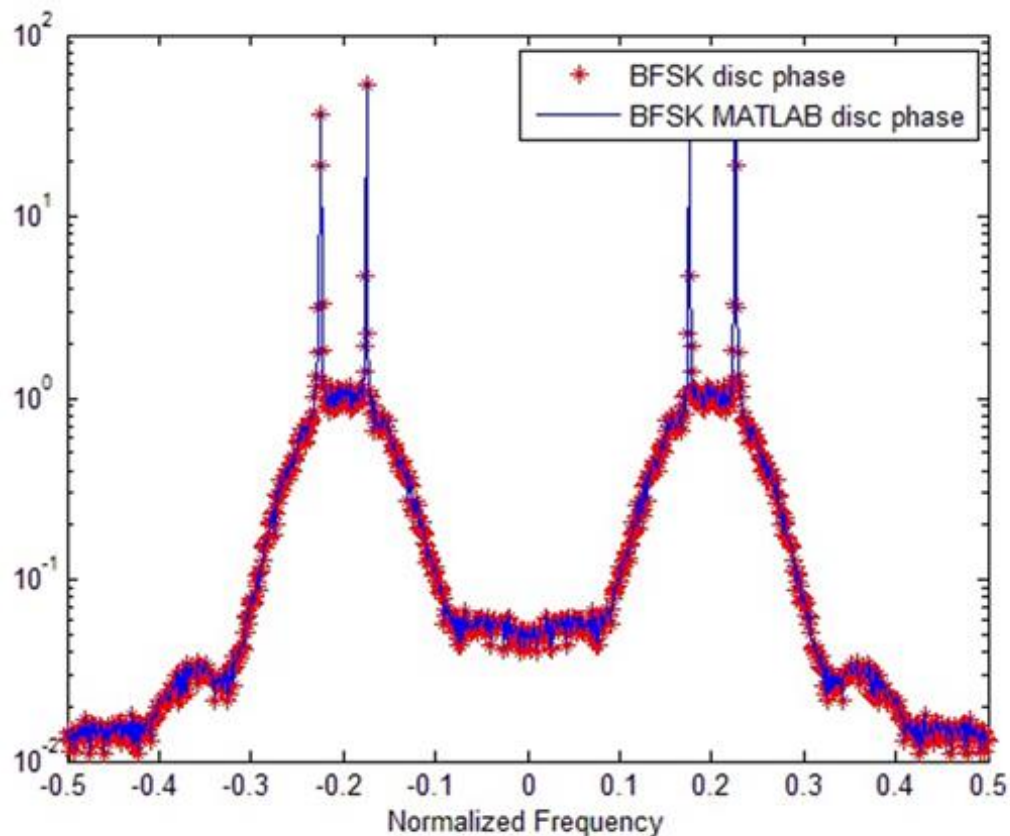
Le modulateur MDF le plus simple, est constitué d'oscillateurs différents. La différence de fréquence entre deux oscillateurs voisins est Δf . La fréquence instantanée du signal modulé saute d'une valeur à l'autre à chaque changement de symbole. Ceci ne permet pas de garantir la continuité de phase de $x_m(t)$ et, par conséquent, le spectre occupé par ce type de modulation est très large.



Exemple: MDF binaire à phase discontinue

Cette méthode a été très utilisée compte tenu de sa simplicité de réalisation (Modem filaire téléphonique, transmission radio en ondes courtes, sauvegarde de données sur des supports audio...)

Le spectre de la BFSK :



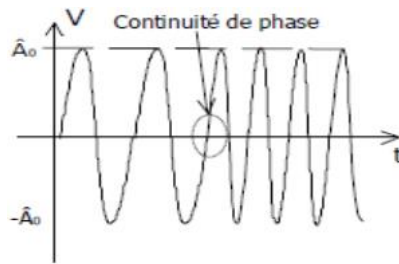
*Représentation fréquentielle du signal passe-bande
d'une BFSK sans continuité de phase*

On remarque toujours que le spectre du signal passe-bas a été dupliqué pour former le signal passe-bande. On a donc quatre pics, symétriques deux à deux par rapport à l'ordonnée, les deux pics de droite correspondant aux fréquences :

$$\begin{cases} f_c - \Delta f/2 \\ f_c + \Delta f/2 \end{cases} \text{ avec } \Delta f = \frac{1}{2.T}$$

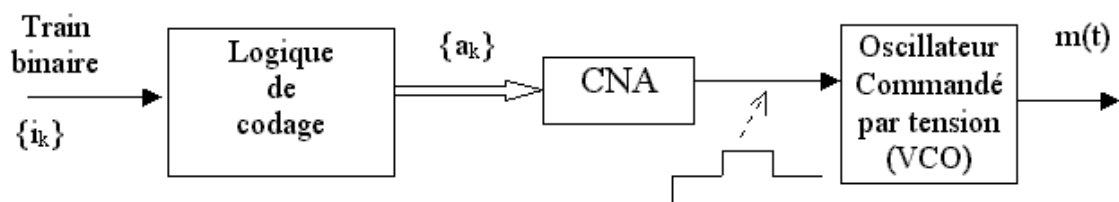
4.4 FSK avec continuité de phase:

Dans les Modulations par Déplacement de fréquence, on trouve les MDF avec continuité de phase pour lesquelles la phase varie de façon continue aux instants de transition kT .



Cette condition de continuité est réalisée quand on utilise un oscillateur unique dont on module la fréquence.

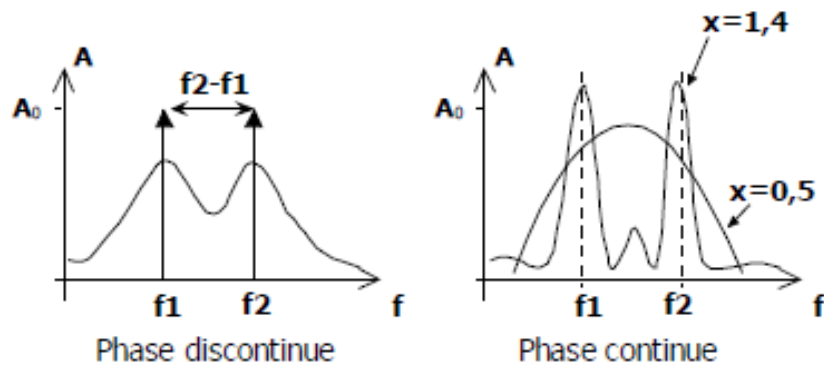
Un exemple de modulateur MDF-M-PC (modulateur par déplacement de fréquence M-aire à phase continue) est représenté figure ci-dessous. Il est constitué d'une logique de codage permettant de charger un convertisseur N/A dont la tension de sortie, en forme de paliers, est représentative du symbole à transmettre. Cette sortie du CNA module alors un oscillateur commandé par tension (VCO).



Modulateur MDF-M-PC

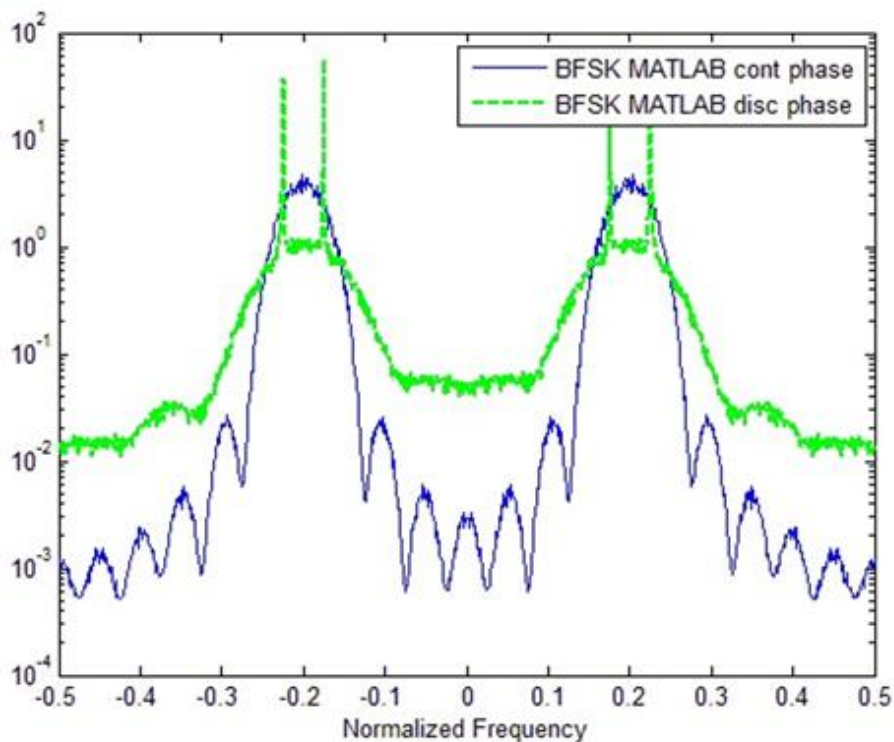
4.5 Spectre d'un signal FSK

Du fait de la non-linéarité du procédé FM, le spectre d'un signal FSK est très complexe. Il se simplifie avec l'hypothèse suivante : Si le signal FSK est généré par commutation entre deux générateurs sinusoïdaux : il peut être considéré comme la somme de deux signaux OOK ayant l'une ou l'autre de ces fréquences comme porteuse et modulé l'un par le signal binaire original, l'autre par son inverse logique. *Dans ce cas, on note la présence de raies aux fréquences des générateurs.*



Comme on l'a vu plus haut, cette méthode engendre une discontinuité de phase. En réalité le signal FSK est rarement généré de cette manière, mais plutôt par variation de la fréquence d'un oscillateur commandé en tension (VCO), ce qui conduit à un signal secondaire à phase continue.

Ce détail, en apparence insignifiant, modifie le spectre : les raies disparaissent dans le cas général mais restent présentes pour les valeurs entières du taux de modulation x .



Représentation fréquentielle du signal passe-bande d'une BFSK avec et sans continuité de phase

La représentation spectrale permet de conclure quant à l'utilité de générer des M-FSK à continuité de phase : en effet, son spectre utilise une bande passante

moins importante que celle d'une M-FSK à discontinuité de phase. Cette propriété a un avantage financier non négligeable car un opérateur, pour une même bande passante, pourra utiliser plus de fréquences pour transporter l'information, ce qui améliorera le débit sur le canal de transmission.

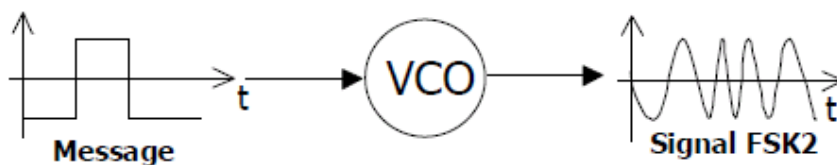
4.6 Modulateurs analogiques de fréquence FSK

On trouve en pratique deux formes de modulateur numérique en fréquence :

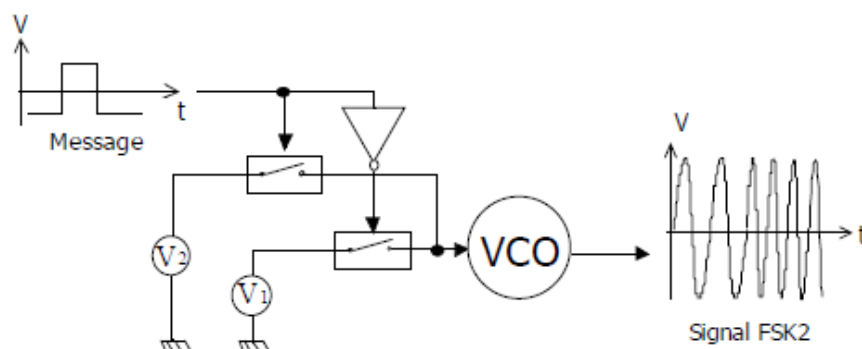
- Soit on utilise les modulateurs analogiques,
- Soit on réalise une synthèse numérique des signaux modulés.

On présente deux modulateurs assurant la continuité de phase (VCO) mais présentant deux pilotages différents

montage 1



montage 2



Le montage 1 présente de par sa simplicité quelques défauts dont le principal est que les niveaux logiques ne sont pas définis de manière très précise, ce qui génère une incertitude sur les fréquences f_1 et f_2 .

Pour le montage 2 les fréquences f_1 et f_2 sont fonctions des tensions contrôlées V_1 et V_2 . Le signal binaire commandant alors la sélection entre f_1 et f_2 .
L'incertitude sur les fréquences est minimale grâce à la plus haute stabilité des sources de tension.

4.7 Conclusion sur la MDF

Nous avons trouvé deux types de Modulation par Déplacement de fréquence, chacun présentant des avantages et des inconvénients :

- La MDF à phase discontinue :
 - Elle est simple de réalisation.
 - Son principal défaut est la grande bande passante dont elle a besoin pour pouvoir transmettre les sauts de phase.
- La MDF avec continuité de phase :
 - Elle est plus complexe à réaliser.
 - Elle requiert une bande passante plus étroite.

5. MSK - Minimum Shift Keying

5.1 Définition

Les modulations dites à saut de fréquence minimal "MSK, Minimum Frequency Shift Keying" sont des modulations à déplacement de fréquence (FSK) particulières. Elles peuvent ainsi être considérées comme des modulations à quatre états de phase (parfois plus), qui n'autorisent que les transitions d'un état à un état voisin ($\pm 90^\circ$).

On peut donc la considérer comme une FSK-2 [à phase continue] où la bande spectrale occupée B est minimale.

$$x = \frac{1}{2} = \frac{2\Delta f}{R}$$

$$\Rightarrow \Delta f = \frac{1}{4T}$$

$$B = 1,17 \cdot \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}]$$

5.2 Expression temporelle :

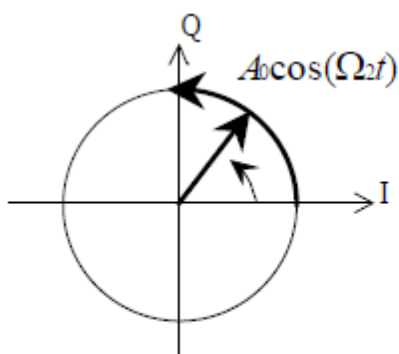
$$h(t) = A_0 \cos(\omega_0 t \pm \frac{\pi}{2T} t)$$

Les deux fréquences instantanées de la porteuses modulées sont :

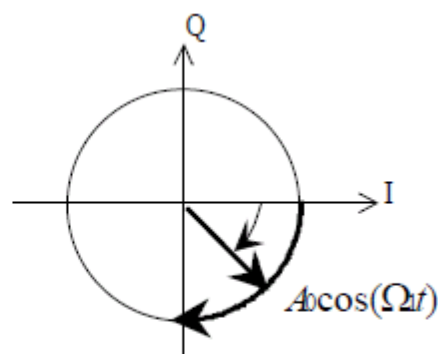
$$f_1 = f_0 - 1/4T$$

$$f_2 = f_0 + 1/4T$$

Contrairement à une FSK classique, la MSK présente donc la particularité suivante : la porteuse modulée effectue un quart de tour dans le diagramme de Fresnel pendant la durée T d'émission d'un eb.



Transmission sur T de f2



Transmission sur T de f1

6. Porteuses en quadrature

6.1 Expression mathématique et représentation

Si on utilise la notation réelle générale du signal modulé en amplitude, phase ou fréquence on obtient alors :

$$h(t) = \hat{A}_0(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t))$$

Soit en utilisant les relations trigonométriques:

$$h(t) = \hat{A}_0(t) [\cos(2\pi f_0 t) \cos(\varphi(t)) - \sin(2\pi f_0 t) \sin(\varphi(t))]$$

On peut donc utiliser la représentation de cette expression dans un diagramme I-Q, tel qu'il a été présenté précédemment (phaseur). L'extrémité de la porteuse

sera représentée par un point : en modulation de phase pure "PSK" ils sont sur un cercle de rayon constant correspondant à la tension crête de la porteuse.

Le signal modulé en phase s'exprime alors sous la forme :

$$h(t) = a_n \cos(\omega_0 t) - b_n \sin(\omega_0 t)$$

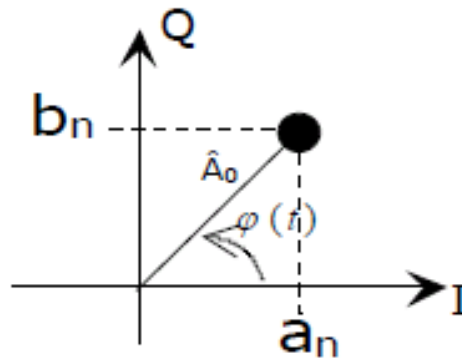
avec:

$$a_n = \hat{A}_0(t) \cos(\varphi(t))$$

$$b_n = \hat{A}_0(t) \sin(\varphi(t))$$

6.2 Constellation

On représente alors $h(t)$ dans un diagramme IQ, ou polaire :



Pour les modulations numériques, a_n et b_n prennent des valeurs discrètes, c'est à dire qu'elles sont en nombre fini.

La forme obtenue pour l'ensemble des points est appelée **constellation**; nous verrons que c'est la seule méthode pour distinguer les différentes modulations.

7. MDP : Modulation par déplacement de phase ou PSK – Phase Shift Keying

En modulation de phase, Phase Shift Keying (PSK), le signal à transmettre est utilisé pour faire varier la phase de l'onde porteuse, utilisée pour décaler le spectre de fréquence du signal à transmettre.

MDP-n : Modulation à déplacement de phase n états de phase.

PSK- n : n Phase Shift Keying.

En transmission numérique, l'ensemble des phases possibles prend ses valeurs dans un ensemble dénombrable d'au moins deux éléments.

Les modulations par déplacement de phase les plus rencontrées sont :

- BPSK : Binary Phase Shift Keying ;
- DBPSK : Differential Binary Phase Shift Keying ;
- QPSK : Quadrature Phase Shift Keying ;
- OQPSK : Offset Quadrature Phase Shift Keying ;
- DQPSK : Differential Quadrature Phase Shift Keying ;

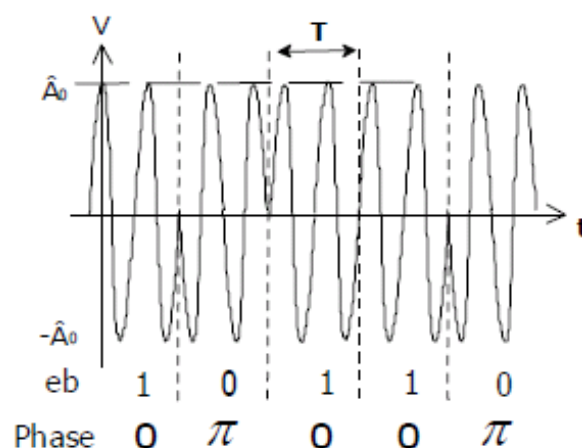
Ce sont les modulations les plus utilisées en transmission numérique car elles sont très performantes en terme de taux d'erreur et d'efficacité spectrale. Leurs principales applications sont la télévision numérique et la radiodiffusion.

7.1 BPSK (Binary PSK)

Ce signal est aussi appelé PSK-2 (en français MDP-2), modulation à déplacement de phase à deux états.

- **Représentation temporelle :**

On représente sur le schéma qui suit l'aspect temporel d'une porteuse modulée en 2PSK par un message binaire



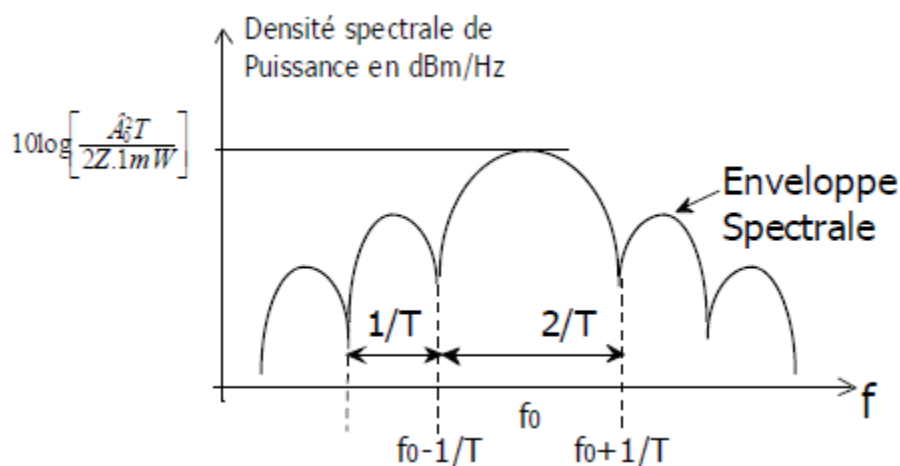
Pour l'eb "1", on émet la porteuse pure $p(t)$, pour l'eb "0" on émet la porteuse en opposition de phase $-p(t)$.

Si $a_n(t)$ code le message avec un type NRZ :

$$h(t) = a_n(t) \cdot p(t)$$

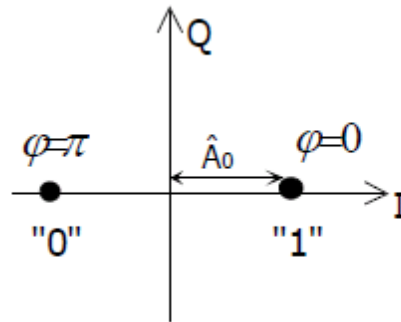
- **Représentation spectrale :**

De par son expression temporelle, le signal modulé à deux états de phase correspond à une MAPS (modulation d'amplitude à porteuse supprimée) avec un signal modulant carré NRZ antipolaire (+1 où -1 Volts). Le spectre est alors constitué des deux bandes latérales sans porteuse: le spectre du signal modulant et de son spectre symétrique par rapport à la fréquence porteuse. On retrouvera un spectre identique pour toutes les modulations numériques PSK (et également QAM). La seule information accessible est, outre une valeur approchée de la fréquence porteuse, le rythme horloge $R=1/T$.



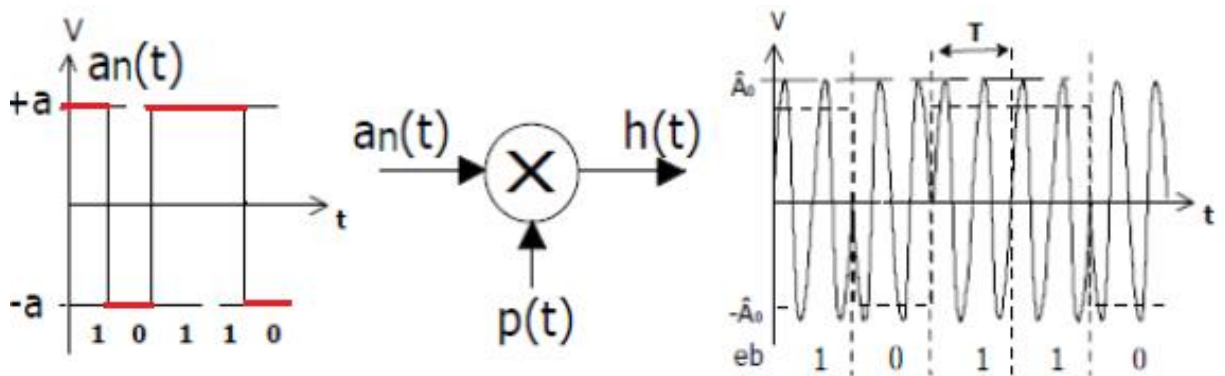
- **Constellation :**

La constellation permet de connaître l'information sur la phase :



Elle est constituée de deux points opposés par le centre du diagramme, c'est à dire en opposition de phase.

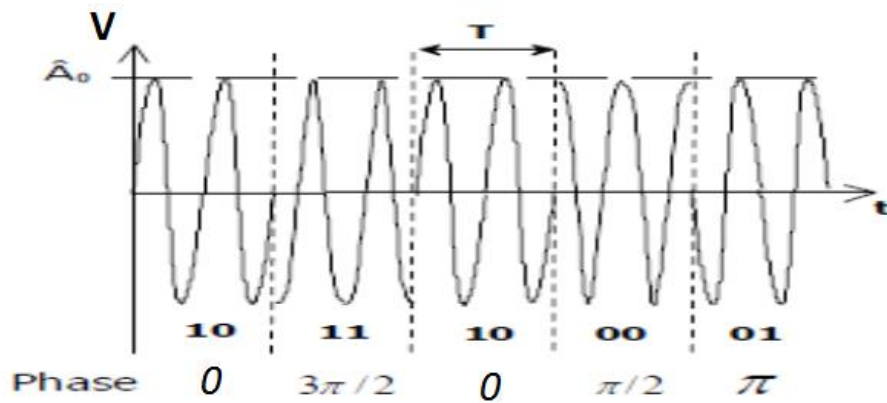
- On peut utiliser un mélangeur pour réaliser une telle opération de modulation PSK2, ou une multiplication numérique de la porteuse pure avec le signal modulant.



7.2 QPSK (Quaternary PSK)

La QPSK (ou PSK-4) (quaternary phase shift keying) ou MDP-4 (modulation par déplacement de phase à 4 états) est obtenue en étendant le principe de la PSK2 à 4 états de phase.

- **Représentation temporelle :**

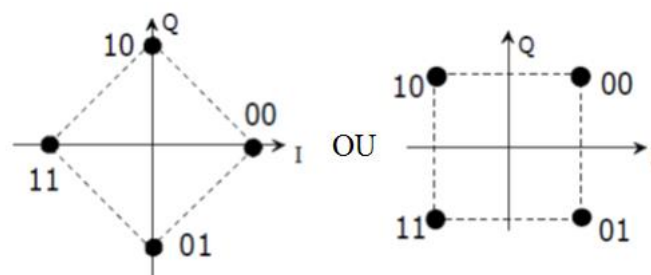


Comme la modulation présente une valence de 4, on peut regrouper les eb par deux et coder chaque couple par un état de phase particulier. Le nombre d'eb par symbole est donc de deux, et pendant la durée T d'un moment, on émet un symbole de deux eb, alors qu'en PSK2 on n'émet qu'un eb.

- **Constellation** : en modulation de phase pure "PSK" les points de la constellation sont sur un cercle de rayon constant correspondant à la tension crête de la porteuse.

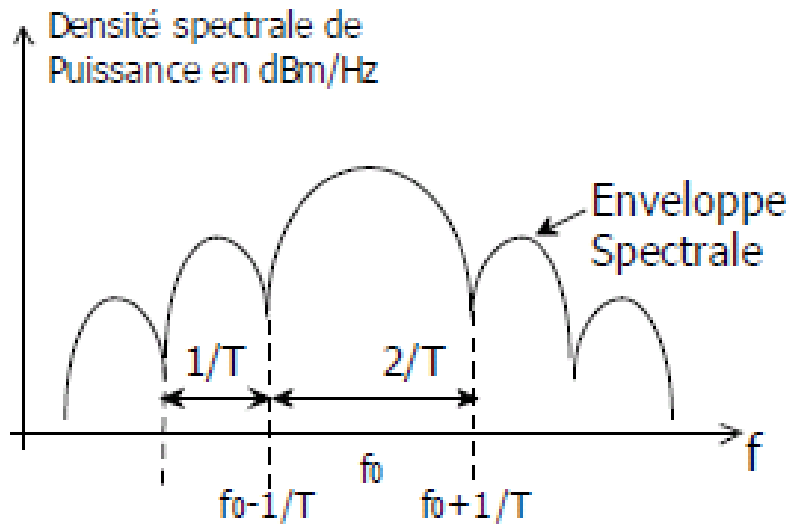
Les deux représentations suivantes sont équivalentes; l'important est qu'il y ait quatre points répartis sur un cercle.

On parle d'*offset* de phase pour décrire les rotations éventuelles de l'ensemble de la constellation.



- **Représentation spectrale** :

Il est rigoureusement identique à celui de la PSK-2, sous réserve que la durée des symboles est identique et vaut $T=1/R$.



La densité spectrale de puissance s'exprime alors, comme pour toutes les modulations de ce type:

$$\Gamma_{QPSK}(f) = \frac{\hat{A}_0^2 T}{2} \left(\frac{\sin(\pi T(f - f_0))}{\pi T(f - f_0)} \right)^2 \quad [\text{V}^2/\text{Hz}]$$

On montre que :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Gamma_{QPSK}(f) df = \frac{\hat{A}_0^2}{2} \quad [\text{V}^2]$$

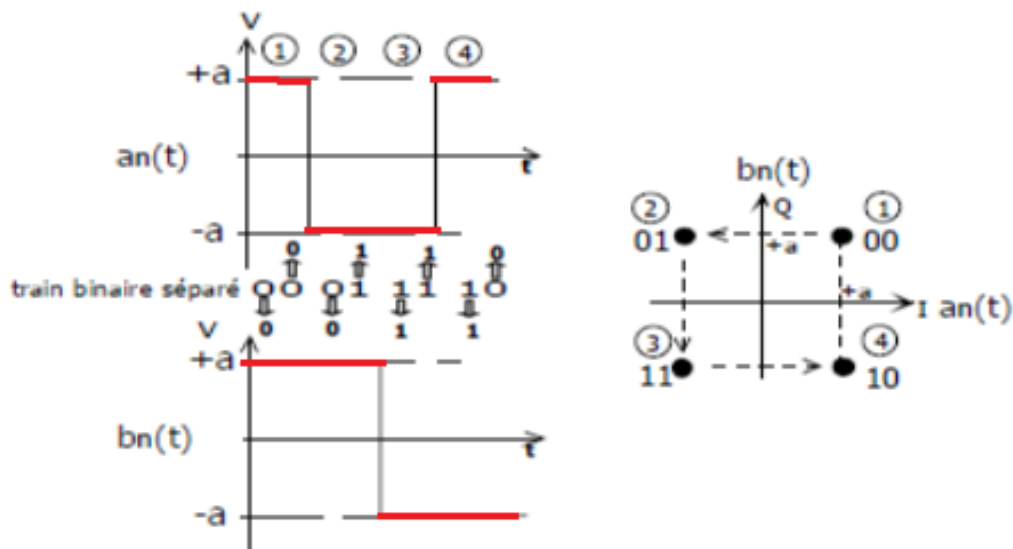
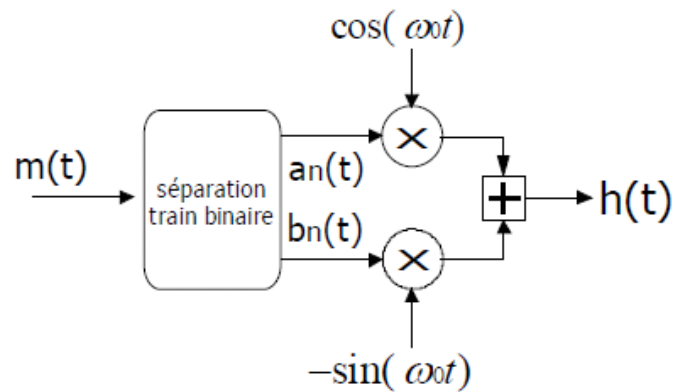
On retrouve ainsi la puissance de la porteuse pure non modulée P_0 .

❖ Modulateur :

L'idée est de réaliser une modulation de chacune des deux porteuses en quadrature. Cette opération nécessite un traitement des éléments binaires de façon à appliquer les signaux convenables aux mélangeurs (1 eb sur 2).

On a ainsi deux BPSK avec des porteuses en quadrature.

$$h(t) = a_n \cos(\omega_0 t) - b_n \sin(\omega_0 t)$$



8. La Modulation QAM ou MAQ : C'est une modulation en phase et en amplitude.

QAM-n: Quadrature Amplitude Modulation n states.

n-MAQ: Modulation d'Amplitude en quadrature à n états.

❖ **Définition**

Les modulations Amplitude-Phase couplent les principes de la modulation d'amplitude ASK et de phase PSK. Elles sont classiquement appelées "QAM" (MAQ, en français) car elles utilisent le principe des modulations d'amplitude (ASK) sur des porteuses en quadrature.

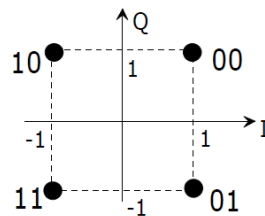
❖ **Contellation**

Les composantes a_n et b_n appartiennent à des ensembles de valeurs discrètes et n'ont pas de relation entre elles. Les points associés ne sont plus répartis sur un cercle mais peuvent se trouver dans l'ensemble du plan.

8.1 La modulation QAM-4

Exemple : $a_n \in \{-1 ; 1\}$

$b_n \in \{-1 ; 1\}$

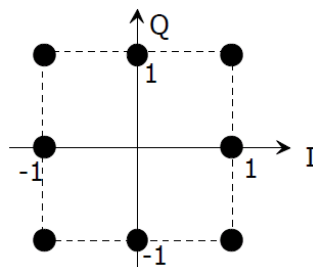


Ce type de modulation est identique à une QPSK, il s'agit d'une 4-QAM. En pratique, on ne distingue pas ces deux modulations et on parle exclusivement de QPSK. Le modulateur et le démodulateur sont identiques à celui de la QPSK.

8.2 La modulation QAM-8

$a_n \in \{-1 ; 0 ; 1\}$

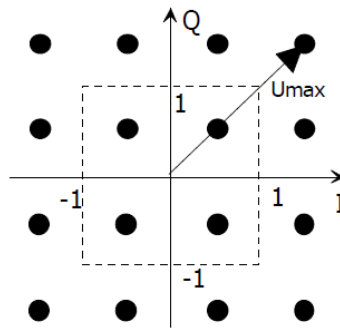
$b_n \in \{-1 ; 0 ; 1\}$



8.3 La modulation QAM-16

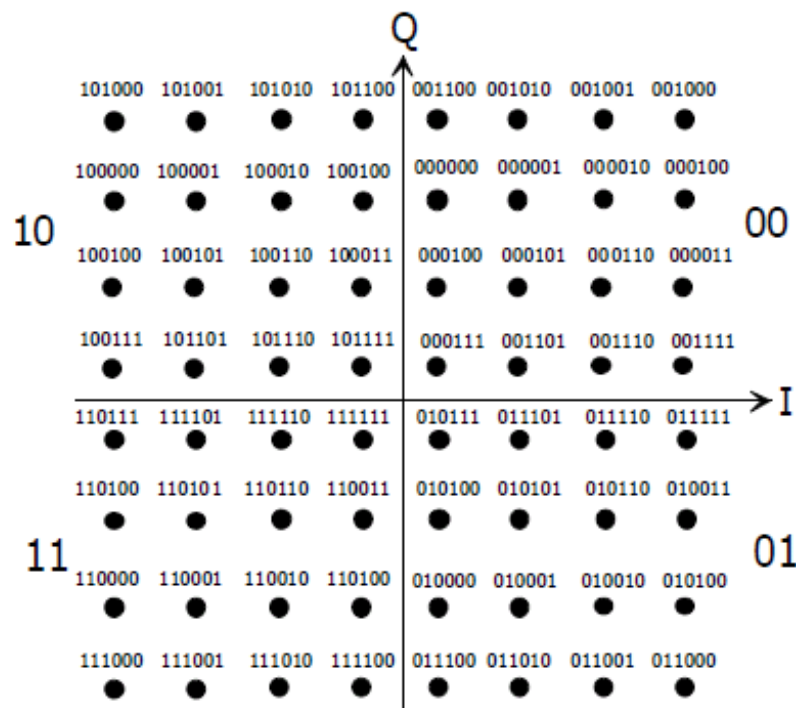
$a_n \in \{-1,5 ; -0,5 ; 0,5 ; 1,5\}$

$$b_n \in \{-1,5 ; -0,5 ; 0,5 ; 1,5\}$$



8.4 La modulation QAM-64

Ce type de modulation est exploité sur les réseaux câblés peu sensibles aux bruits, comme pour la norme V34 (V90) pour les modems téléphoniques, ou sur les réseaux fibres optiques pour la diffusion TV.



8.5 Puissance d'une modulation QAM

La variation de l'amplitude de la porteuse en QAM provoque au cours du temps des variations de la puissance crête émise alors qu'elle est constante en PSK. Elle va donc dépendre du type de modulation (valence) mais aussi de la loi de probabilité d'apparition des moments. Si ceux si

sont équiprobables (ce qui est le cas courant en télécommunication), on peut donner les relations suivantes pour la puissance moyenne d'une modulation QAM :

Modulations	Puissance
Porteuse pure	$P_0 = \frac{U_{\max}^2}{2Z} \text{ [W]}$
QAM -8	$P = \frac{3U_{\max}^2}{8Z} \text{ [W]}$
QAM-16	$P = \frac{5U_{\max}^2}{18Z} \text{ [W]}$

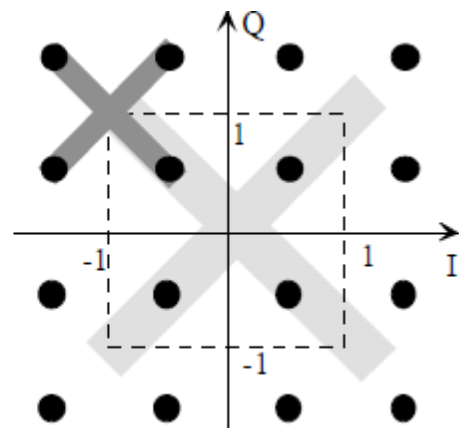
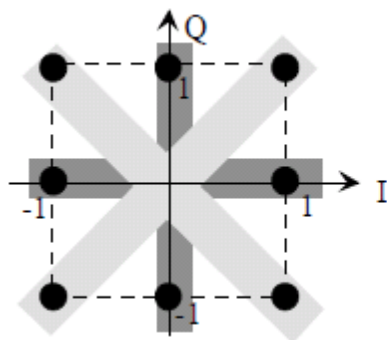
où $U_{\max}$ désigne la tension maximale pouvant être prise par la porteuse.

On montre cette relation en calculant la puissance moyenne pour chacun des points possibles pris par la porteuse dans la constellation, puis en effectuant la moyenne. Cette méthode pourra être utilisée avec profit pour les autres modulations.

8.6 Modulateurs QAM

Une modulation QAM peut-être réalisée avec des modulateurs QPSK.

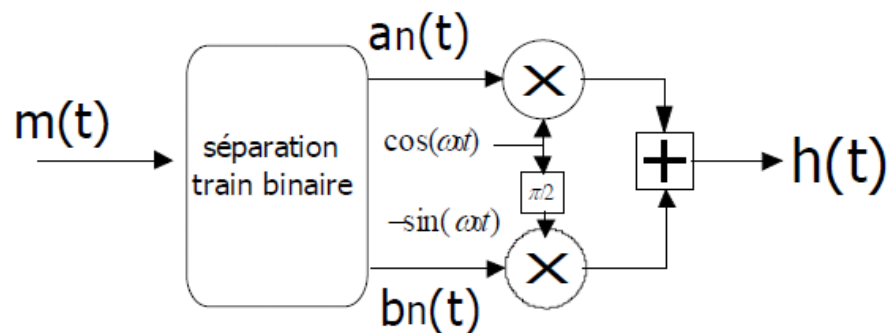
Ainsi on montre sur les schémas qui suivent que les modulations 8-QAM et 16-QAM peuvent être réalisées avec seulement deux modulateurs QAM.



Dans le cas de la 8-QAM, on utilise l'un ou l'autre des modulateurs commandés par des circuits de traitement du signal binaire.

- ❖ Dans le cas de la 16-QAM, on utilise le premier modulateur pour sélectionner un quadrant (sur les deux eb de poids fort) puis le second pour sélectionner un des quatre points du quadrant (sur les deux eb de poids faible).

Avec les méthodes numériques, il devient plus simple d'utiliser le modulateur QPSK décrit au paragraphe précédent avec des signaux modulants a_n et b_n ternaires pour la 8-QAM, quaternaires pour la 16-QAM, Et générés par des circuits numériques adaptés.



Le graphe suivant représente le signal modulant sur une des voies pour la modulation 16-QAM.

