



CHAPITRE 3: TRANSMISSION SUR ONDE TRANSPOSÉE (PORTEUSE)

Module: **Transmission Numérique**

Niveau: 1^{ère} année du cycle ingénieur (II-1)

Enseignante: *Dr. Leïla Nasraoui*

leila.nasraoui@ensi-uma.tn; leila.nasraoui@supcom.tn

Introduction- transmission en BdB

Caractéristiques:

- Tous les signaux physiques générés ont une bande passante que l'on peut écrire $[-B, +B]$
 - *filtre NRZ*: $B = \frac{1}{T}$
 - *filtre RZ* : $B = \frac{2}{T}$
 - *filtre biphase Manchester* : $B = \frac{2}{T}$
 - *filtre en racine de cosinus surelevé* : $B = \frac{1+\beta}{2T}$
 - *largeur de bande minimale (Nyquist)* : $B = \frac{1}{2T}$
- La largeur de bande B dépend du filtre de mise en forme $h_e(t)$, du débit binaire D , et de la taille M de l'alphabet utilisé.
- Les densités spectrales de puissance des signaux en bande de base sont centrées sur la fréquence $f_0 = 0$.
- Si le canal a une largeur de bande limitée, pour augmenter le débit binaire, on cale la largeur de bande occupée du signal sur celle du canal : on utilise toute la bande passante disponible.

Introduction- transmission en BdB

Limites:

- Impossible de diviser le canal en sous-canaux pour transmettre plusieurs communications à la fois (multiplexage fréquentiel)
- Impossible de créer une onde électromagnétique pour la transmission sans fil (si on émet une onde à 30 Hz, on a une longueur d'onde de 10000 km!)
- Dans les transmissions sans fil, chaque type de communication correspond à une bande de fréquence répertoriée :
 - *TNT terrestre : 470 MHz à 830 MHz*
 - *GSM (900) : 880 MHz à 960 MHz*
 - *Nécessité de pouvoir créer des signaux sur une bande $[f_0 - B, f_0 + B]$ donnée*
- f_0 et B dépendent du canal où l'on veut transmettre et du type de communication

Introduction- BdB VS modulation

Bande de base

- Transmission des signaux dans leur bande de fréquence originale
- Utilisation de la totalité de la bande passante du canal B
- Signaux électriques et lumineux : câbles USB, paire torsadée, fibres optiques, etc...

Bande transposée

- Transmission des signaux dans une bande de fréquence donnée
- Eventuellement, division de la bande passante disponible en plusieurs canaux
- Ondes électromagnétiques, signaux électriques et optiques : réseau hertzien, infra-rouge, LASER, câbles ADSL, etc...

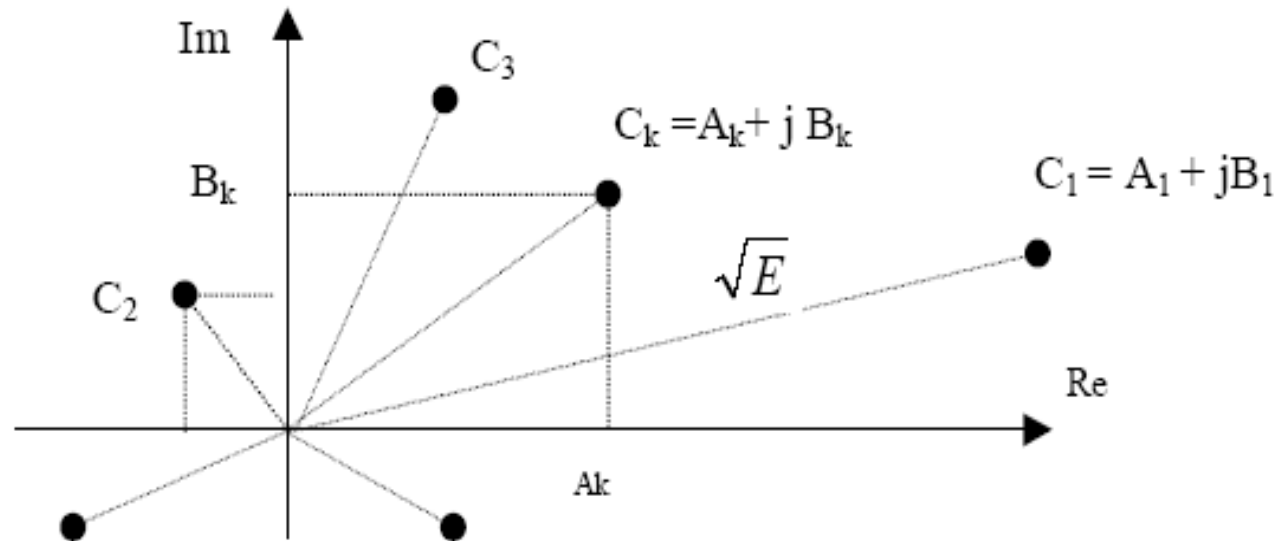
Modulation : transformation du signal en bande de base pour l'adapter au canal de transmission

Introduction- notion de constellation

- C'est une représentation dans le plan complexe qui fait correspondre à chacune des valeurs de la grandeur modulée de la porteuse un point C_k

$$C_k = A_k + jB_k$$

- L'ensemble de ces points associés aux différents états de la porteuse porte le nom de **constellation**



- Pour pouvoir distinguer deux symboles, il faut respecter une distance minimale d_{\min} entre les points représentatifs de ces symboles. Plus cette distance est grande, plus la probabilité d'erreur sera faible.

Introduction- notion de constellation

- La distance minimale entre tous les symboles est :

$$d_{\min} = \min_{i \neq j} (d_{ij}) \quad \text{avec} \quad d_{ij} = |C_i - C_j|^2$$

- A chaque symbole émis correspond un signal élémentaire $\mathbf{u}_k(t)$ et ayant l'énergie nécessaire à la transmission de ce symbole.
- Dans la constellation, la distance entre un point et l'origine est proportionnelle à la racine carrée de l'énergie qu'il faut fournir pendant l'intervalle $[kT, (k+1)T[$ pour émettre ce symbole.
- La puissance moyenne d'émission des symboles est assimilable à la moyenne des $|C_i|^2$ et la puissance crête à $\max_i |C_i|^2$.
- Le choix d'une modulation numérique dépend
 - de la constellation qui, suivant les applications, mettra en évidence une **faible énergie** nécessaire à la transmission des symboles ou une **faible probabilité d'erreur**.
 - de l'occupation spectrale du signal modulé.
 - de la simplicité de réalisation (avec éventuellement une symétrie entre les points de la constellation).

Introduction- paramètres

- **Taux d'Erreur Binaire (TEB)**, ou encore Bit Error Rate (BER), désigne le rapport du nombre de bits reçus en erreur au nombre de bits total transmis.

$$TEB = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}}$$

On notera la différence entre P_{eb} et TEB. Au sens statistique, on a $P_{eb} = E(TEB)$. TEB tend vers P_e si le nombre de bits transmis tend vers l'infini.

- **Efficacité spectrale**: elle mesure le débit par unité de bande et s'exprime en «bit/seconde/Hz» .

$$\eta = \frac{D}{B}$$

La valeur D est le débit binaire et B est la largeur de la bande occupée par le signal modulé. Pour un signal utilisant des symboles M-aires, on aura

$$\eta = \frac{1}{TB} \log_2(M)$$

Remarquons que pour B et T donnés, l'efficacité spectrale augmente, comme on pouvait s'y attendre, avec le nombre de bit/symbole $n = \log_2(M)$. C'est en effet la raison d'être de la modulation M-aire.

Introduction- paramètres

- Le bruit ne constitue pas une limite aux transmissions sûres, mais une limite au débit.
- **Théorème** (Canal gaussien - Shannon (1948)): soit un canal de bande en fréquence B soumis à un bruit blanc additif gaussien et soit un rapport signal sur bruit (RSB) ρ . On appelle capacité du canal gaussien la quantité mesurée en bits/s et définie par :

$$C = B \log_2(1 + \rho)$$

- Alors, si le débit binaire de la source $D < C$, il existe un ensemble (modulateur/démodulateur) asymptotiquement sans erreur.
- *Rappelant que $\rho = \frac{E_b}{N_0}$, où E_b désigne la quantité d'énergie par bit, exprimée en nombre de Joules par bit, et $\frac{N_0}{2}$ la densité spectrale du bruit additif, blanc sur le canal, exprimée en W/Hz.*
- La puissance moyenne du signal est donnée par $P_s = E_b D$ et la puissance du bruit dans la bande B est donnée par $P_b = N_0 B$. On en déduit le rapport signal sur bruit en puissance donnée par

$$\frac{P_s}{P_b} = \frac{E_b}{N_0} \eta = \rho \eta$$

Introduction- modulation numérique

- Comme en analogique, il s'agit toujours de la variation d'un ou de plusieurs paramètres de l'onde porteuse en fonction du signal qui constitue l'information à transmettre (l'amplitude, la phase, et la fréquence).
- Une caractéristique fondamentale de la transmission numérique par rapport à celle analogique est qu'il est possible de quantifier la qualité de la transmission.
- Type de modulation numérique:
 - *Modulation par Déplacement d'Amplitude MDA: (Amplitude Shift Keying : **ASK**).*
 - *Modulation par Déplacement de Phase MDP: (Phase Shift Keying : **PSK**).*
 - *Modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature MAQ. (Quadrature Amplitude Modulation : **QAM**)*
 - *Modulation par Déplacement de Fréquence MDF (Frequency Shift Keying : **FSK**).*

Modulation par Déplacement d'Amplitude (MDA)

- Le signal modulé en ASK a pour expression :

$$u(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0)$$

avec

$$A(t) = \sum_k a_k \text{Rect}_T(t - kT)$$

- Ici, les a_k sont des symboles M-aires, T est la durée symbole qui vaut $T = T_b \log_2 M$, T_b étant la durée bit et la fonction rectangle Rect_T vaut 1 sur l'intervalle $[0, T[$ et 0 ailleurs.
- On ne transforme pas le signal en bande de base, on le multiplie juste par un cosinus
- Chaque symbole a_k modifie l'amplitude de la porteuse durant une durée T .
- En fait, tous les codages en ligne que l'on a vu en bande de base étaient des modulations ASK avec $f_0 = 0$.

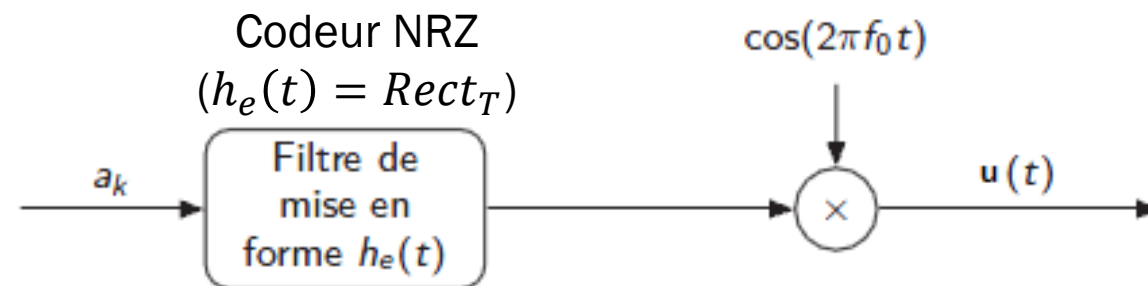
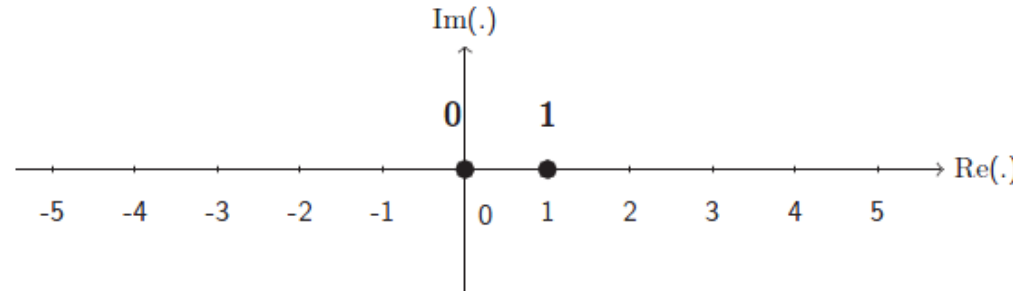


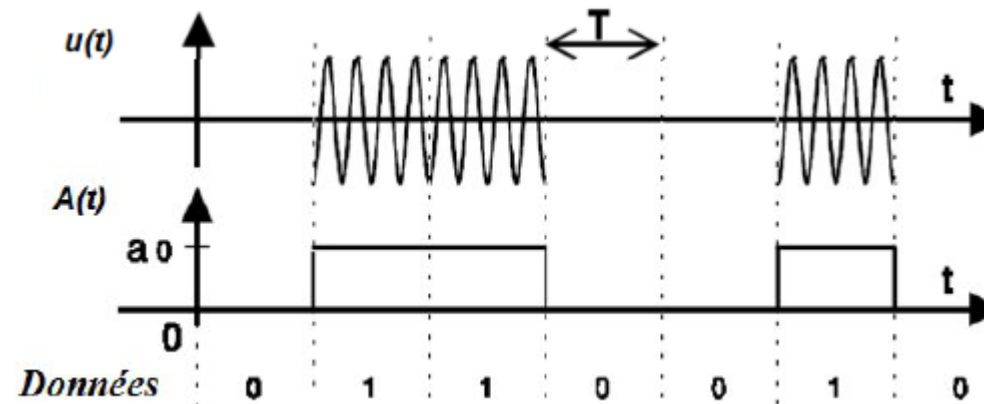
Schéma d'un modulateur ASK

Modulation par Déplacement d'Amplitude (MDA)

- Un exemple de modulation ASK est la modulation “par tout ou rien” dite On-Off Keying (OOK) dans laquelle les symboles prennent leurs valeurs dans l’alphabet $\{0, 1\}$.



- T : durée d'un bit
- $n=1$, $M=2$, $a_k = \{0, a_0\}$ (extinction de la porteuse pour $a_k = 0$)



Modulation M-ASK symétrique

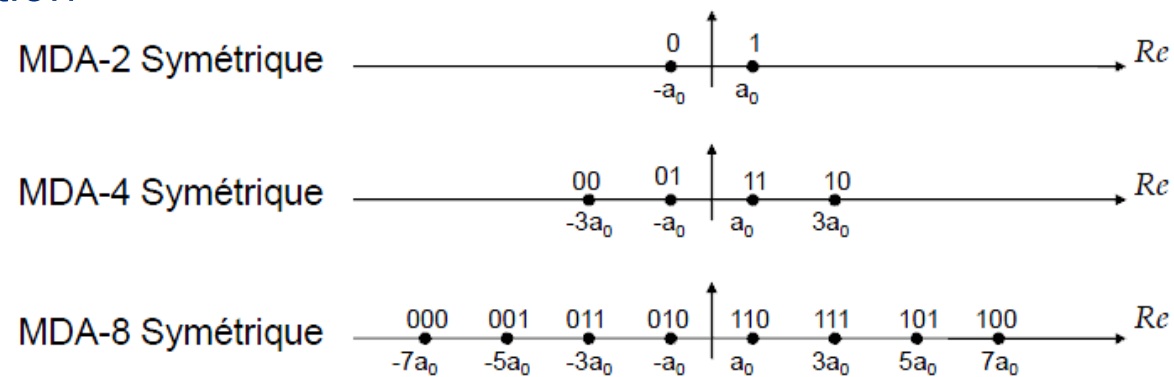
- On a $M = 2^n$ amplitudes possibles du signal. Les valeurs de l'alphabet sont telles que :

$$A_i = (2i - M + 1)a_0 \text{ avec } i = 0, 1, 2, \dots, M-1$$

- Suivant les valeurs de n , on obtient le tableau suivant:

n	M	Valeurs de l'alphabet
1	2	$-a_0, a_0$
2	4	$-3a_0, -a_0, a_0, 3a_0$
3	8	$-7a_0, -5a_0, -3a_0, -a_0, a_0, 3a_0, 5a_0, 7a_0$

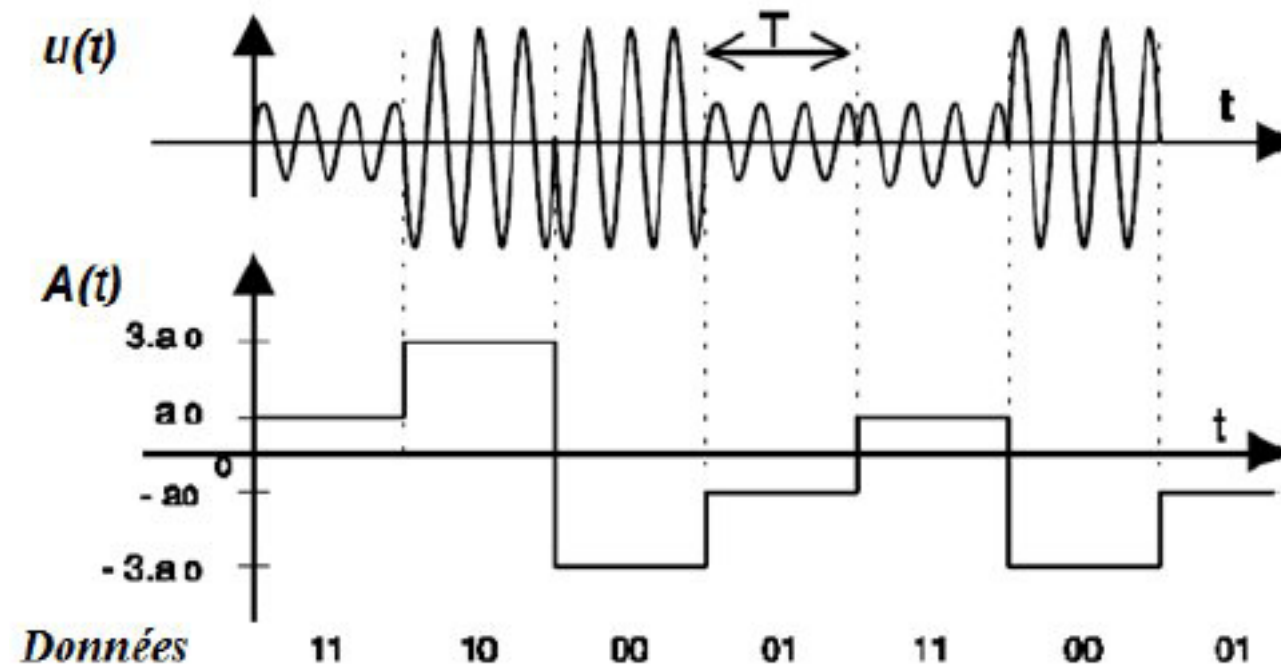
- Exemples de constellation



Remarque : la disposition des symboles met en œuvre un code de Gray de telle sorte qu'un seul bit change lorsque l'on passe d'un point à un autre.

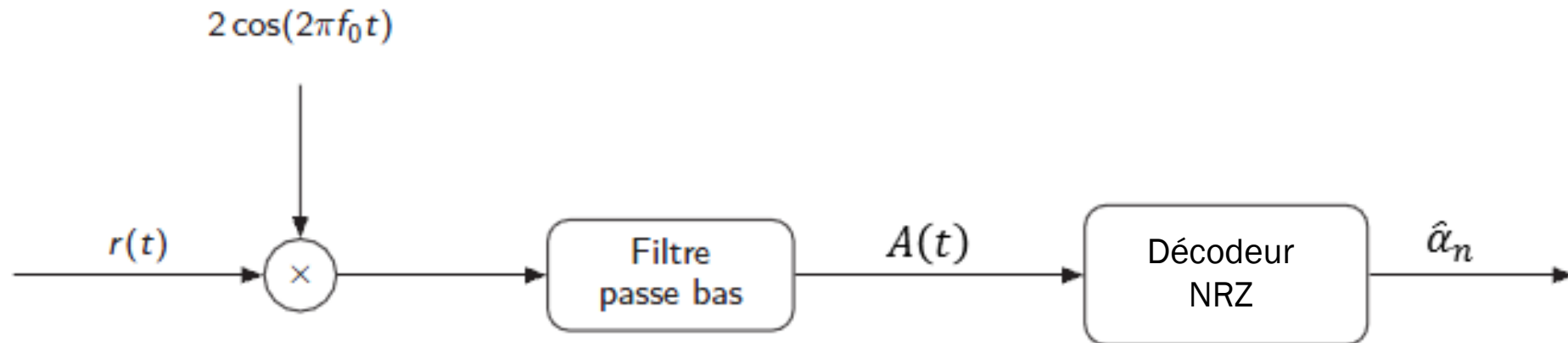
Modulation M-ASK symétrique

- Exemple de Chronogramme de la MDA-4 Symétrique



Démodulateur ASK

- Démodulation cohérente: connaissance parfaite de la porteuse
- A la sortie du canal (sans bruit), on a $r(t) = u(t) = A(t)\cos(2\pi f_0 t)$
- Comme pour le cas de la démodulation analogique, on utilise
$$2\cos(2\pi f_0 t)r(t) = 2\cos(2\pi f_0 t)^2 A(t) = A(t) + A(t)\cos(4\pi f_0 t)$$
- Avec un filtrage passe-bas on peut directement récupérer $A(t)$



Performances des modulations M-ASK

- Si on utilise un codage de Grey et si le récepteur est optimal, on peut montrer que le taux d'erreur binaire est (voir chap. II)

$$TEB \approx \frac{M-1}{M \log_2(M)} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2(M) E_b}{M^2 - 1} \frac{1}{N_0}} \right)$$

- Si on utilise un filtre NRZ, alors $B = \frac{2}{T}$ (attention, on n'est plus en bande de base !), et on a donc

$$\eta = \frac{\log_2(M)}{2}$$

- Plus M augmente, plus η augmente
- En revanche, quand M augmente, le TEB augmente donc il faut augmenter l'énergie par bit pour ne pas détériorer les performances.

Modulation par Déplacement de Phase (MDP)

- Le signal modulé a pour expression

$$u(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t))$$

avec

$$\varphi(t) = \sum_k \varphi_k \operatorname{Rect}_T(t - kT)$$

- Le signal peut aussi s'écrire sous la forme :

$$u(t) = A \sum_k \operatorname{Rect}_T(t - kT) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_k)$$

- A représente l'amplitude de la porteuse et φ_k est la phase pendant l'intervalle $[kT, (k+1)T[$ portant l'information a_k . La phase φ_k prend des valeurs de la forme:

$$\varphi_k \in \left\{ \theta_0 + (2m+1) \frac{\pi}{M}, \quad 0 \leq m \leq M-1 \right\}$$

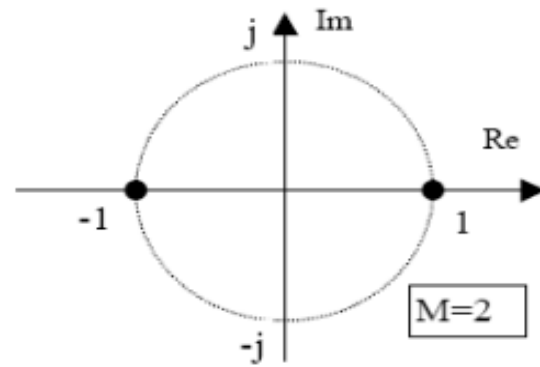
- Le signal M-PSK peut s'écrire sous la forme:

$$u(t) = A \sum_k [\cos(\varphi_k) \cos(2\pi f_0 t) - \sin(\varphi_k) \sin(2\pi f_0 t)] g(t - kT)$$

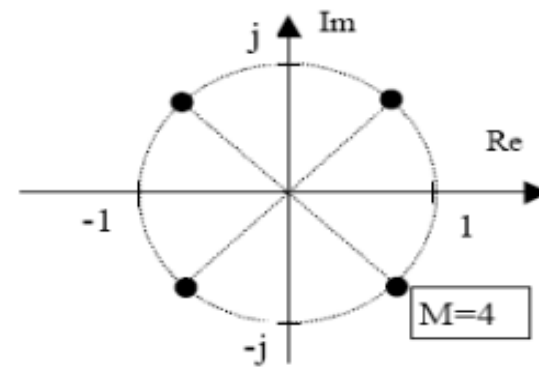
→ Le signal modulé M-PSK est l'équivalent de la somme de **deux porteuses en quadrature** ($\cos(2\pi f_0 t)$ et $-\sin(2\pi f_0 t)$) modulées en Amplitude.

Modulation par Déplacement de Phase (MDP)

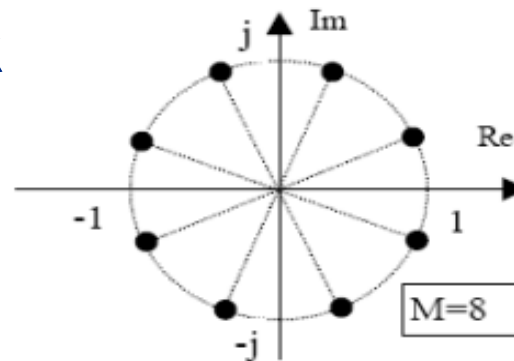
- Exemples de constellation: représentation des symboles a_k équivalents en modulation ASK dans le plan complexe
 - Dans le cas PSK, les $a_k = e^{ja_k}$ sont sur le cercle unité



B-PSK



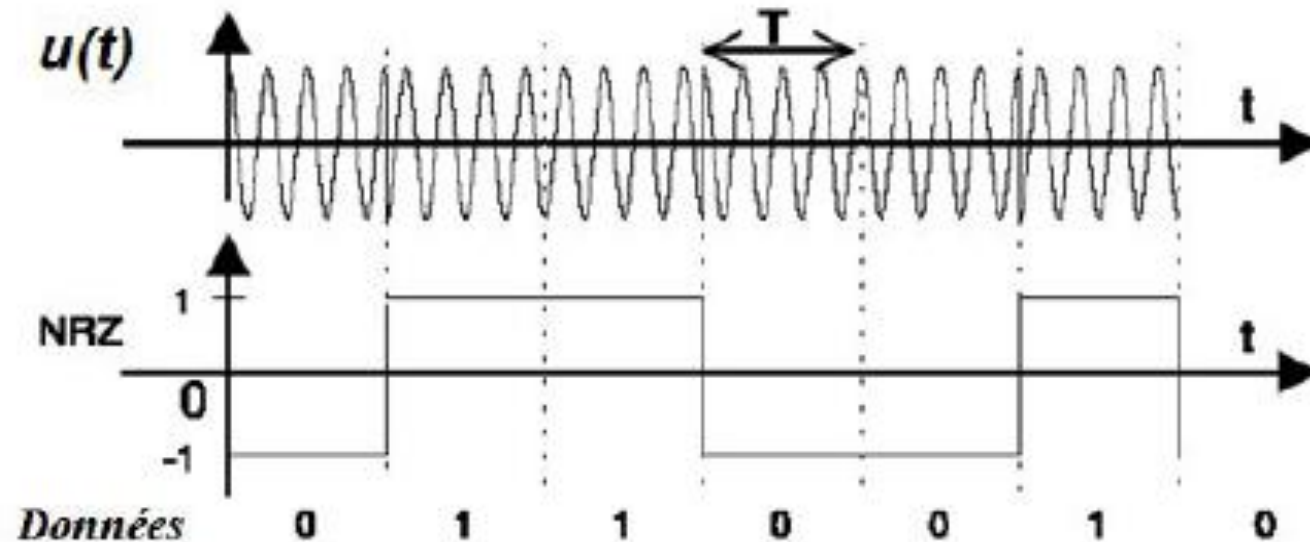
Q-PSK



8-PSK

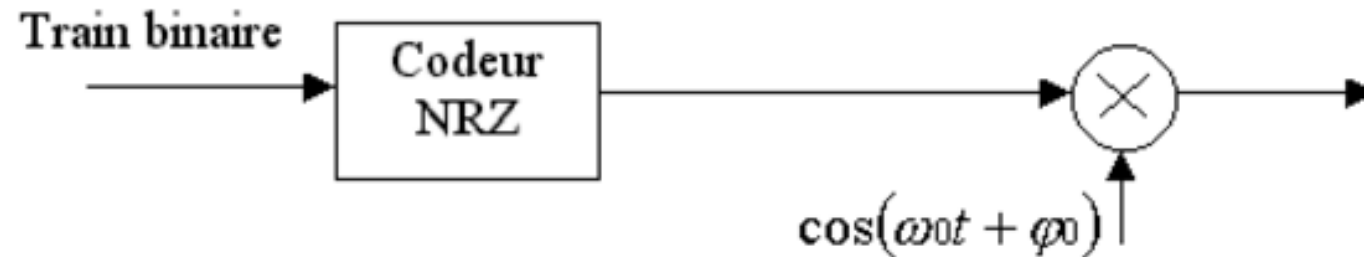
BPSK (Filtre NRZ)

- Modulation binaire (un seul bit transmis par période T)
 - $n=1$, $M=2$ et $\varphi_k = 0$ ou π
- Le symbole $c_k = e^{j\varphi_k}$ prend donc sa valeur de l'alphabet $\{-1,1\}$

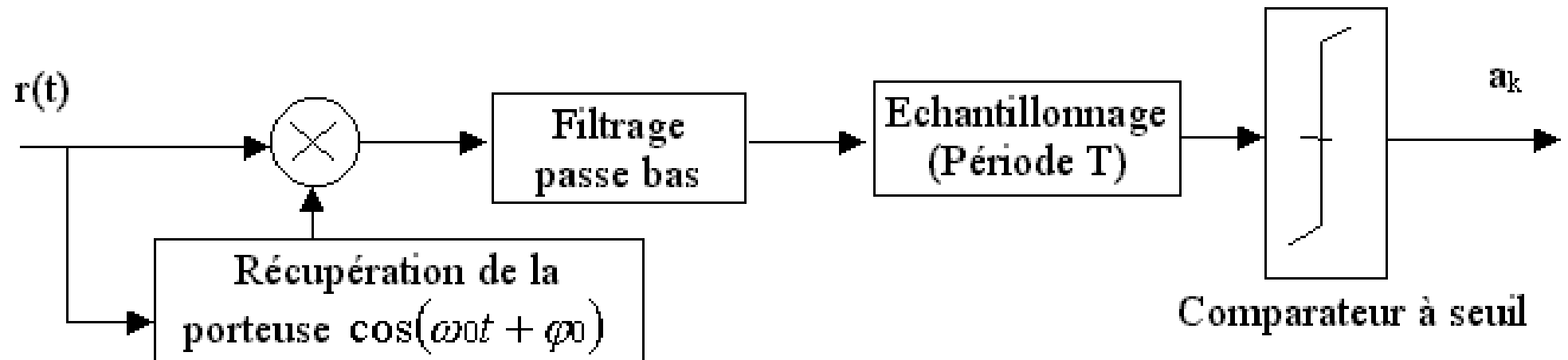


Modulateur/Démodulateur BPSK

- Le modulateur représenté ci-dessous est constitué d'un multiplicateur qui effectue le changement de fréquence sur un train numérique codé en NRZ



- Le récepteur requiert l'utilisation d'une démodulation cohérente (identique à celle de la MDA)



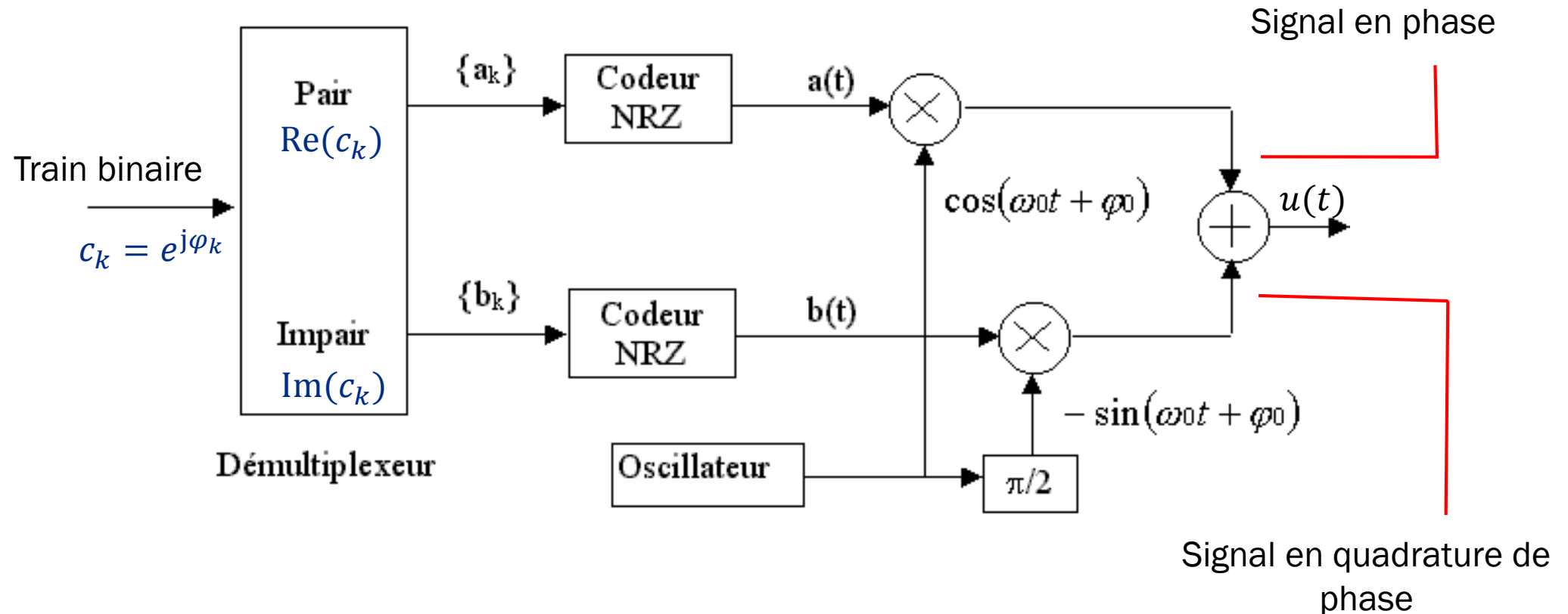
Modulation QPSK (filtre NRZ)

- Modulation QPSK: c'est une modulation d'amplitude à deux niveaux sur chacune des amplitudes en quadrature: $n=2$, $M=4$ et $\varphi_k = \frac{\pi}{4} + k \frac{\pi}{2}$
- Les bits du train binaire entrant sont groupés par deux pour former des symboles correspondants aux c_k qui prennent alors leurs valeurs dans un alphabet de 4 éléments suivants: $e^{j\varphi_k}$, où $\varphi_k \in \left\{ \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4} \right\}$. Ici on a utilisé le dictionnaire unipolaire, pour le dictionnaire anti-polaire, on obtient $\varphi_k \in \left\{ -\frac{3\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4} \right\}$
- On peut aussi considérer que a_k et b_k prennent simultanément leurs valeurs de l'alphabet $\{\cos(\varphi_k) \text{ et } \sin(\varphi_k)\}$: $a_k + b_k = \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \pm j \frac{\sqrt{2}}{2}$

Bit pair	Bit impair	Symbole	φ_k	a_k	b_k	$a_k\sqrt{2}$	$b_k\sqrt{2}$
0	0	00	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	1	1
1	0	01	$\frac{3\pi}{4}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	-1	1
1	1	11	$\frac{5\pi}{4}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	-1	-1
0	1	10	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	1	-1

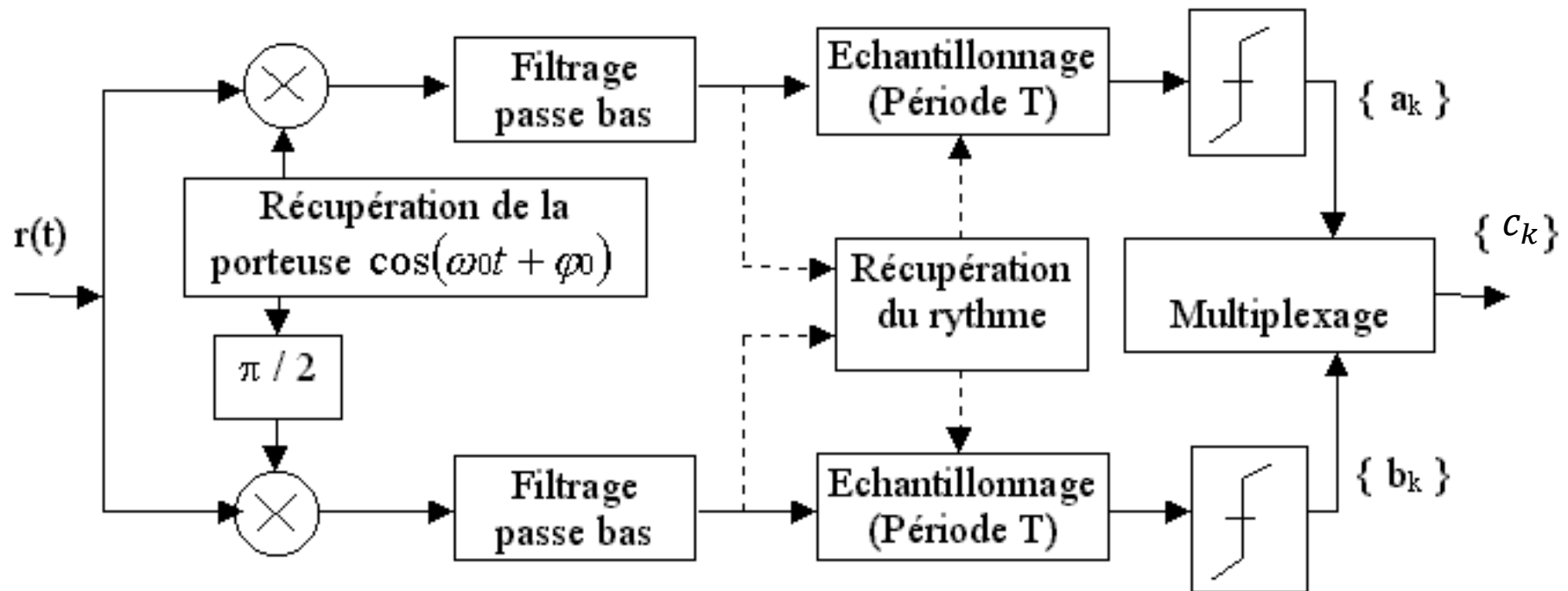
Modulateur QPSK

- Le schéma synoptique du modulateur montre le démultiplexage du train binaire à l'entrée du modulateur en deux trains binaires sur les voies en phase et en quadrature. Les deux trains binaires sont alors codés en NRZ.
- Dans le cas général ($M > 4$), les bits du train entrant sont groupés par $n = \log_2(M)$ bits pour former des symboles c_k qui sont répartis sur un cercle et vérifient: $c_k = a_k + b_k$



Démodulateur QPSK

- Le démodulateur QPSK est essentiellement constitué de deux démodulateurs BPSK. En effet, le signal reçu (après un filtrage passe-bande éventuel) est démodulé dans deux voies parallèles par deux porteuses en quadrature. Le signal en quadrature est généré à partir de l'oscillateur local et d'un déphaseur de $\frac{\pi}{2}$.



Performances des modulations MPSK-efficacité spectrale

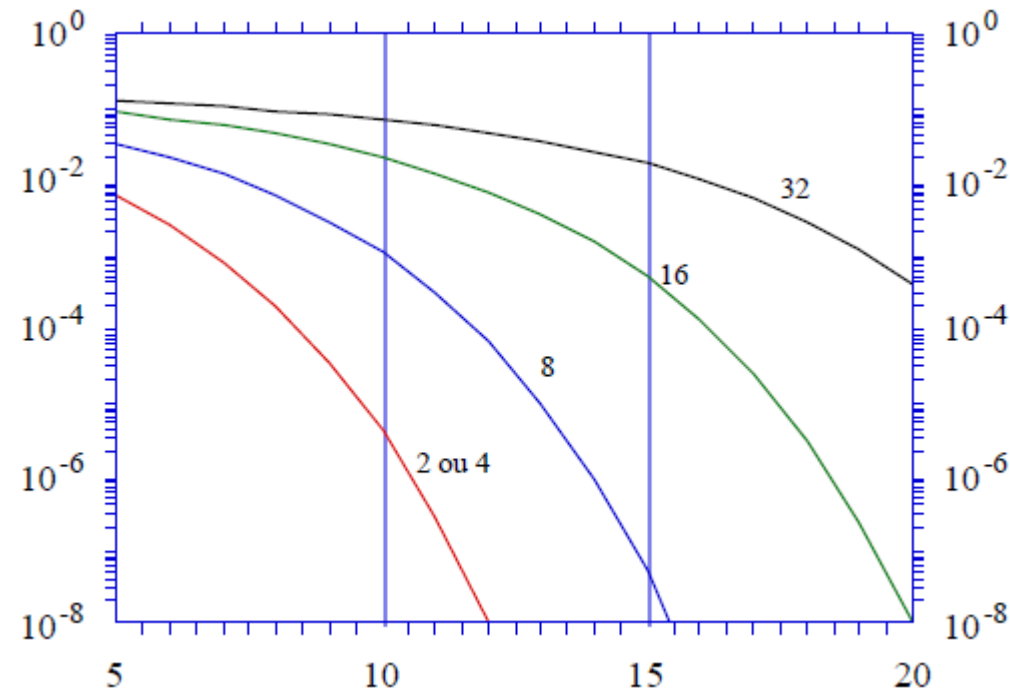
- Pour une même rapidité de modulation $R = \frac{1}{T}$, le spectre du signal modulé de la M-PSK est identique à celui du signal BPSK.
- Toujours pour une même rapidité de modulation, le débit binaire $D = \frac{1}{T_b}$ de la M-PSK est multiplié par $n = \log_2(M)$ par rapport à celui de la BPSK. Autrement dit, pour un spectre identique (et donc largeur de bande B constante), l'efficacité spectrale $\eta = \frac{D}{B}$ est multiplié par $n = \log_2(M)$

M	Modulation	Débit Binaire : D	Efficacité Spectrale : η
2	MDP-2	D	η
4	MDP-4	$2.D$	$2.\eta$
8	MDP-8	$3.D$	$3.\eta$
16	MDP-16	$4.D$	$4.\eta$

Performances des modulations MPSK-TEB

- L'augmentation de M réduit la distance entre symboles adjacents sur la constellation et cela dégrade naturellement les performances.
- Pour les modulations PSK à M états, le taux d'erreur binaire est donné par

$$BER \approx \frac{1}{\log_2 M} \operatorname{erfc} \left(\sin \frac{\pi}{M} \sqrt{\frac{E_b}{N_0} \log_2 M} \right)$$



Modulation d'Amplitude sur deux porteuses en Quadrature (MAQ)

- La MDA et la MDP ne constituent pas une solution satisfaisante pour utiliser efficacement l'énergie lorsque le nombre de point M est grand. En effet, dans la **MDA** les points de la constellation sont sur une **droite**, et dans la **MDP** les points sont sur un **cercle**. Or la probabilité d'erreur est fonction de la distance minimale entre les points de la constellation, et la meilleure modulation est celle qui maximise cette distance pour une puissance moyenne donnée. Un choix plus rationnel est alors de **répartir les points uniformément dans le plan**.
- Ce choix correspond à la modulation sur deux porteuses en quadrature (MAQ ou QAM pour Quadrature Amplitude Modulation) : C'est une modulation bidimensionnelle.

Modulation d'Amplitude sur deux porteuses en Quadrature (MAQ)

- Le signal modulé s'écrit sous la forme:

$$u(t) = u_I(t)\cos 2\pi f_0 t - u_Q(t)\sin 2\pi f_0 t$$

avec

$$u_I(t) = \sum_k a_k \operatorname{Rect}_T(t - kT)$$

$$u_Q(t) = \sum_k b_k \operatorname{Rect}_T(t - kT)$$

- Lorsque les suites de symboles $\{a_k\}$ et $\{b_k\}$ sont deux suites M-aires, on obtient une modulation à M^2 états de forme carrée. Exemples: 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
- On peut écrire le signal modulé comme suit

$$u(t) = \sum_k A_k \operatorname{Rect}_T(t - kT) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_k)$$

avec

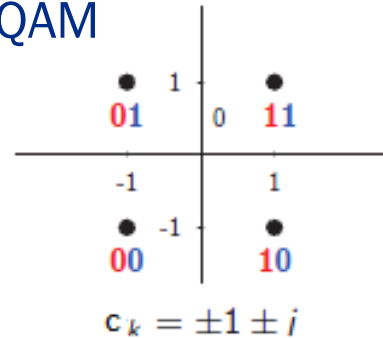
$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

$$\varphi_k = \operatorname{arctg}\left(\frac{b_k}{a_k}\right)$$

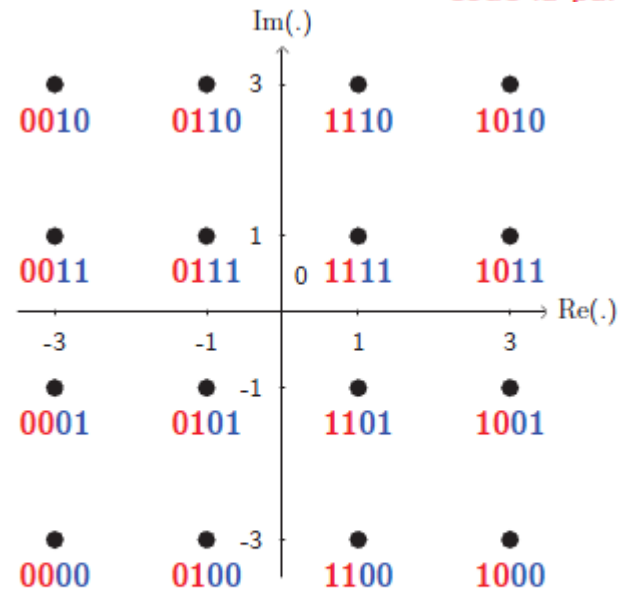
- Il s'agit d'une modulation à la fois de phase et d'amplitude.

Modulation d'Amplitude sur deux porteuses en Quadrature (MAQ)

■ Constellation de la modulation QAM

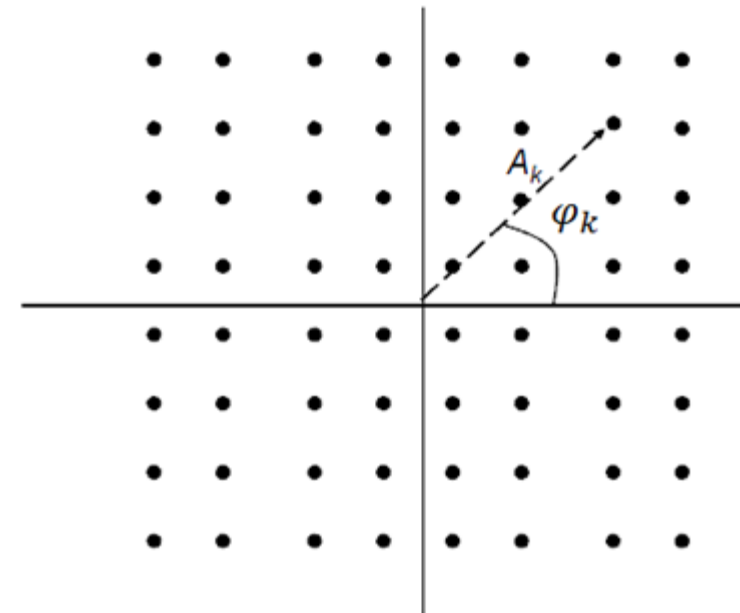


code la partie réelle - code la partie imaginaire



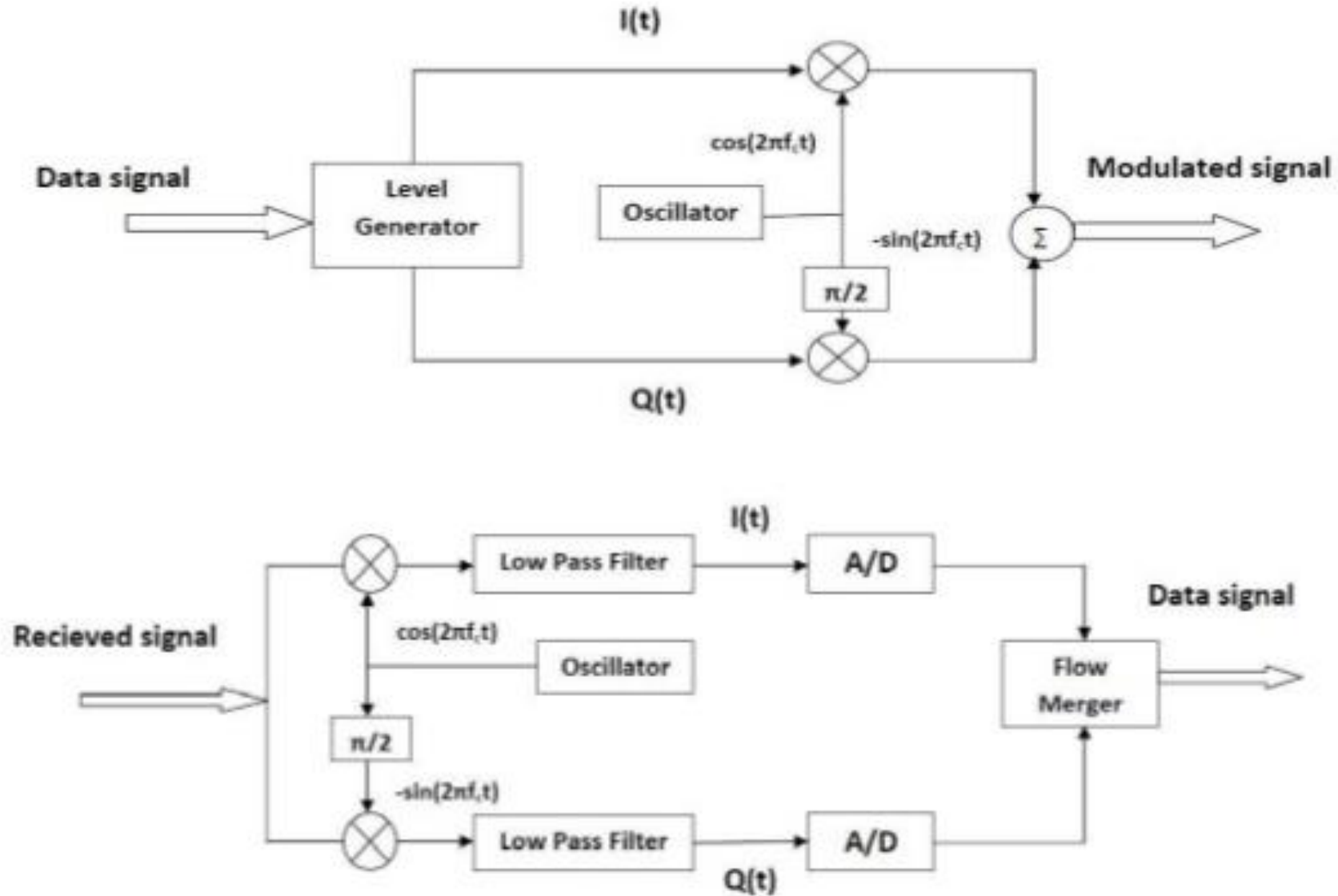
$$\alpha_k \in \{\pm 1 \pm j, \pm 1 \pm 3j, \pm 3 \pm j, \pm 3 \pm 3j\}$$

code la partie réelle - code la partie imaginaire



64-QAM

Modulateur/Démodulateur (MAQ)



Performances des modulations QAM

- Pour une même rapidité de modulation, le débit binaire $D = \frac{1}{T_b}$ de la M-QAM est multiplié par $n = \log_2(M)$ par rapport au cas binaire (2QAM ou BPSK). Autrement dit, pour une largeur de bande donnée B , l'efficacité spectrale $\eta = \frac{D}{B}$ est multiplié par $n = \log_2(M)$

n	M=2 ⁿ	Modulation	Débit Binaire : D	Efficacité Spectrale : η
1	2	MAQ-2	D	η
2	4	MAQ-4	$2.D$	$2.\eta$
4	16	MAQ-16	$4.D$	$4.\eta$
6	64	MAQ-64	$6.D$	$6.\eta$
8	256	MAQ-256	$8.D$	$8.\eta$

→Intérêt d'augmenter M, même au détriment d'une complexité accrue

Performances des modulations QAM

- Dans une modulation QAM à M états, les composantes en phase et en quadrature prennent leurs valeurs de l'alphabet :

$$A = \{\pm a, \pm 3a, \dots, \pm(\sqrt{M} - 1)a\}$$

- La probabilité d'erreur symbole peut s'écrire

$$P_e = \frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M}} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{a^2}{2\sigma_b^2}}$$

- Par ailleurs, nous avons : $\sigma_b^2 = \frac{N_0}{2T}$ et $\sigma_a^2 = \frac{2(M-1)}{3} a^2$

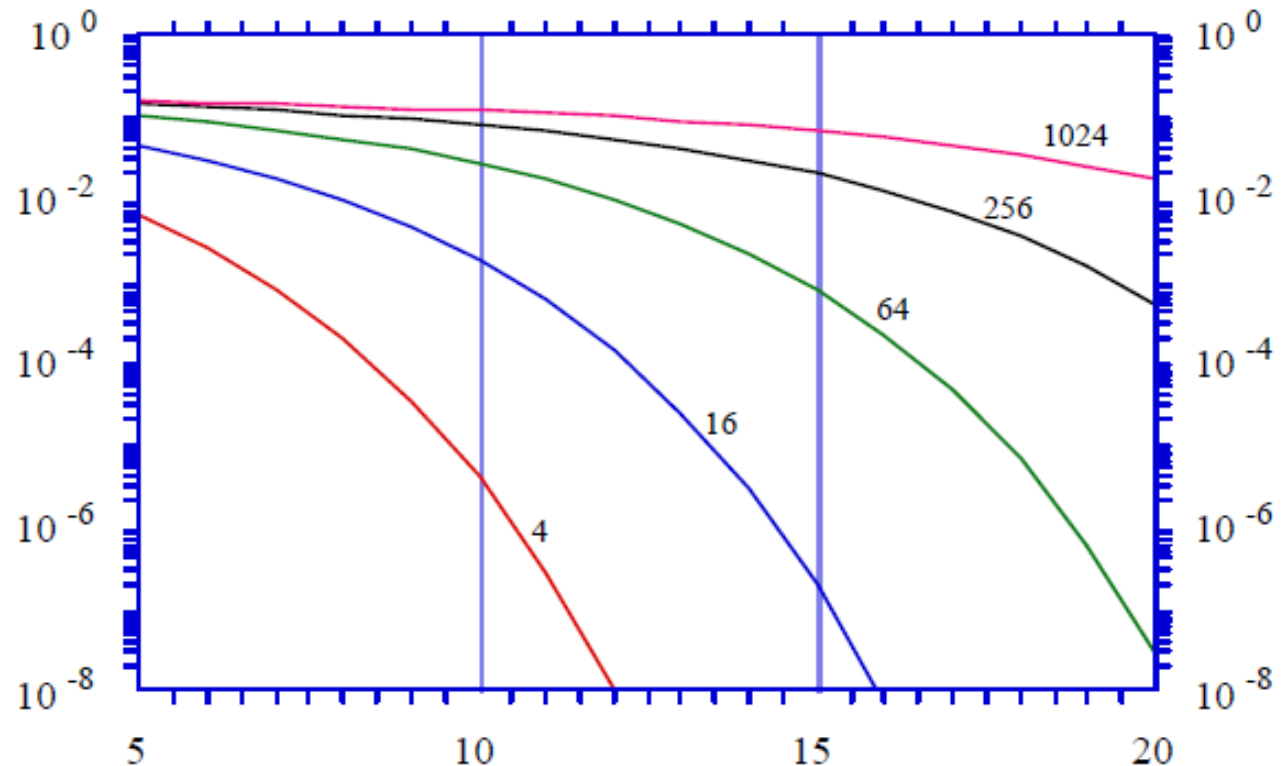
- En utilisant ces relations, on obtient

$$P_e = \frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M}} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{3}{2(M-1)} \frac{E_s}{N_0}}$$

Performances des modulations QAM

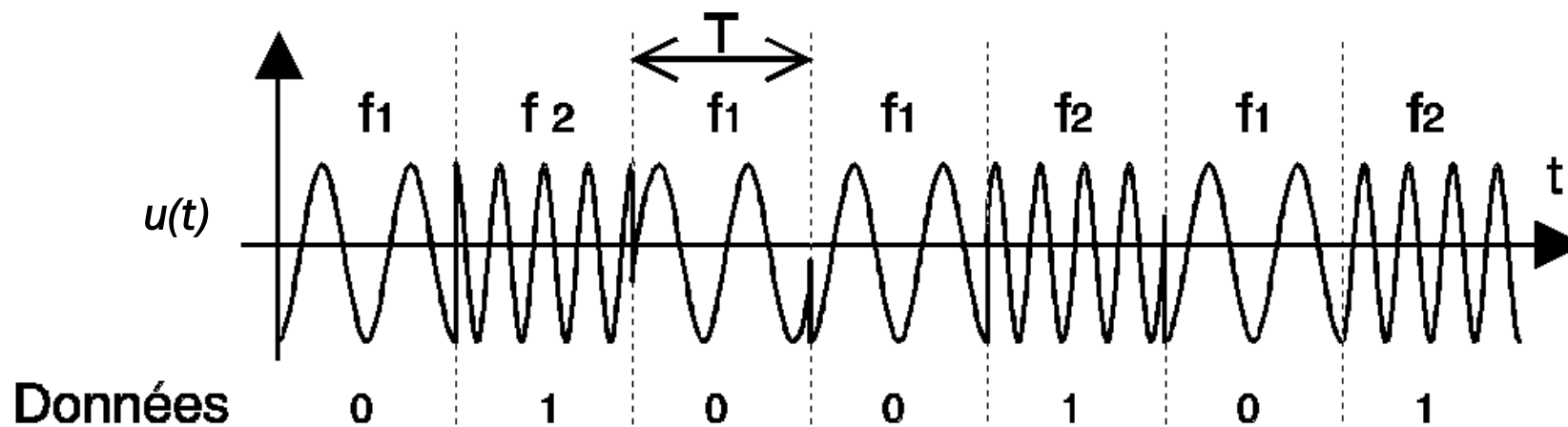
- Et enfin en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$, la probabilité d'erreur est donnée par:

$$P_e = \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \frac{E_b}{N_0}} \quad \text{et} \quad TEB \approx \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M} \log_2(\sqrt{M})} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \frac{E_b}{N_0}}$$



Modulation par Déplacement de Fréquence (MDF)

- Dans ce cas, c'est la fréquence instantanée du signal modulé qui peut prendre un certain nombre de valeurs associées aux états possibles de l'information.
- Cas binaire : association de deux fréquences
 - Excursion en fréquence $\Delta f = |f_2 - f_1|$
 - Indice de modulation $m = \Delta f T_b$
 - Fréquence centrale $f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2}$
- Le signal modulé est $u(t) = \cos\left(2\pi\left(f_0 \pm \frac{\Delta f}{2}\right)t\right)$



Modulation par Déplacement de Fréquence (MDF)

- Dans le cas général, comme en modulation de phase le signal modulé est de la forme

$$u(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t))$$

- Toutefois, en FSK la phase instantanée $\varphi(t)$ est donnée par (filtre de mise en forme rectangulaire (NRZ))

$$\varphi(t) = \frac{\pi m}{T} \int_{-\infty}^t \sum_k a_k \text{Rect}_T(\tau - kT) d\tau$$

→ La phase évolue linéairement sur chaque durée symbole $[kT, (k+1)T]$ et la variation est donnée par la valeur du symbole et l'indice de la modulation:

$$\varphi_{k+1} - \varphi_k = \pi m a_k$$

- La fréquence instantanée est obtenue en dérivant la phase:

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt}$$

- Le deuxième terme de $f(t)$ représente la déviation de fréquence par rapport à la fréquence centrale f_0 .

Modulation par Déplacement de Fréquence (MDF)

- On distingue deux cas :
 - *Les modulations à phase continue: la phase varie de façon continue aux instants de transition kT*
 - *Les modulations à phase discontinue: la phase aux instants de transition kT peut sauter brusquement (l'exemple de cas binaire présenté précédemment)*

- Problème: les sauts créent des fréquences parasites sur le spectre du signal modulé.

- Pour $t \in [kT, (k+1)T]$, l'expression de la phase est

$$\varphi(t) = \pi\Delta f a_k(t - kT) + \varphi_k$$

- Pour qu'il y ait une continuité de phase entre la fin de l'émission du symbole a_{k-1} et le début de l'émission du symbole a_k , la phase au début de l'émission du symbole a_k doit être égale à la phase au début de l'émission du symbole a_{k-1} augmentée de la variation de la phase $\pi\Delta f T a_{k-1}$ pendant l'émission de a_{k-1} . Ceci s'écrit simplement

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \pi\Delta f T a_{k-1}$$

- On parle d'une modulation FSK à phase continue, Continuous Phase FSK (**CPFSK**)

Modulation CPFSK

- La modulation CPFSK est
 - *Plus difficile à réaliser en pratique*
 - *Permet de réduire l'occupation spectrale*
 - Rappelant que plus l'indice de modulation m est petit, moins on utilise de bande passante
 - La valeur minimale de m qui permet une probabilité d'erreur optimale est de 0.5
- On parle d'une modulation MSK (Minimum Shift Keying)
- MSK: CPFSK avec un filtre NRZ et $\Delta f = \frac{1}{2T}$
 - GMSK : Gaussian Minimum Shift Keying (utilisée dans la norme GSM): variation de la MSK mais avec un filtre gaussien au lieu d'un filtre rectangulaire.
 - + *Faible bande occupée*
 - + *Permet de mieux résister au bruit*
 - *Filtre gaussien n'est pas un filtre de Nyquist : interférence entre symboles*