

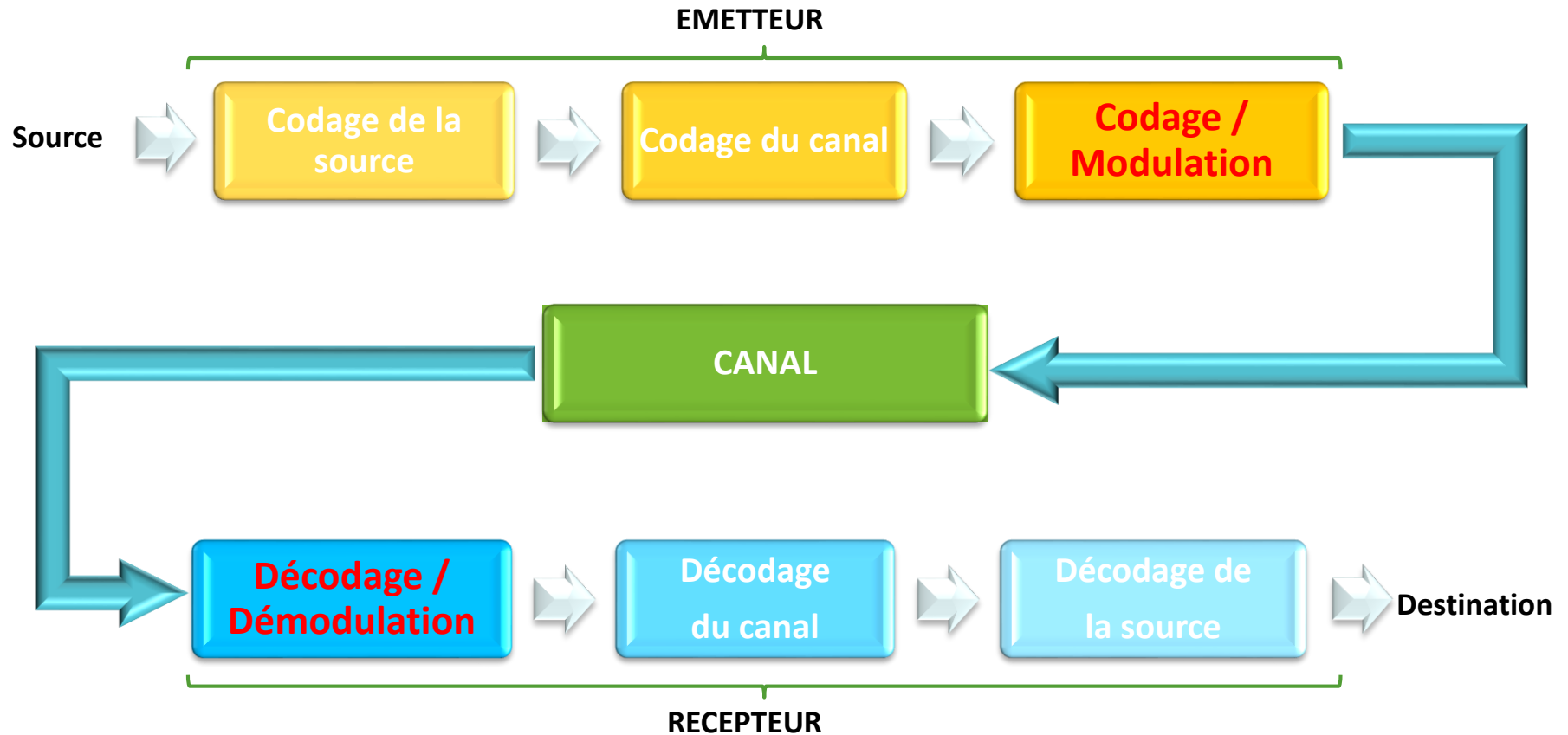


Modulations numériques de porteuse ASK FSK PSK

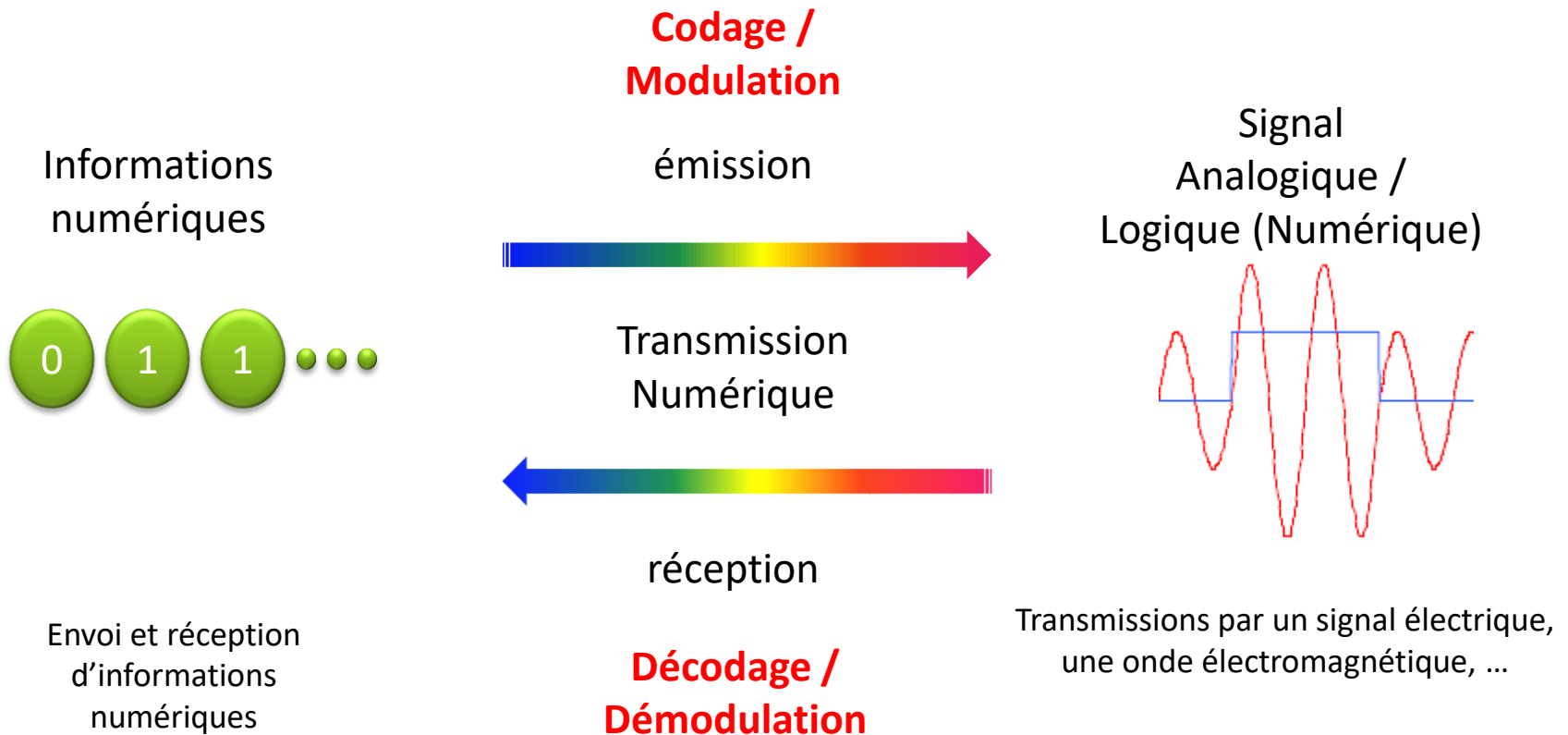
Filière SMP - Cycle Licence - Semestre 6



Chaine de transmission numérique



Principe de base



Notions de base

Débit binaire et Rapidité

- On appelle **débit** binaire $D = \frac{1}{T_b}$ le nombre de bits transmis par seconde, il s'exprime en **bits par seconde**.

T_b est la durée d'un bit

- On appelle **rapidité** $R = \frac{1}{T}$ le nombre de symboles transmis par seconde, elle s'exprime en **bauds**.

$T = n T_b$: durée d'un symbole (n **bits**)

- Pour un alphabet M -aire ($M = 2^n$: Valence), on a la relation fondamentale :

$$D = n . R = R . \log_2 M$$

Taux d'Erreur Binaire TEB ou BER (Bit Error Rate)

Pourcentage d'erreur commis qui définit la qualité d'une transmission numérique.

- Par **simulation pratique** :

Envoi d'une séquence de bits connue du récepteur.

Comparaison entre les bits émis et les bits reçus.

- Par **calcul théorique** : probabilité d'erreur $P_b(e) = \frac{P_s(e)}{\log_2 M}$

(si on néglige la probabilité d'erreur entre symboles non voisins et si deux symboles voisins ne diffèrent que d'un bit (Code de Gray))

Le taux d'erreurs **varie en pratique** :

- de 10^{-4} (ligne téléphonique)
- à 10^{-9} (réseaux locaux).

Capacité d'un canal de transmission

- Par définition, la **capacité** C d'un canal de transmission de bande passante W est la quantité d'informations (en bits) pouvant être transmise sur le canal en 1 seconde.

C'est le **débit binaire maximal** (en présence de bruit) :

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right) \text{ s'exprime en bits par seconde}$$

$\frac{P_S}{P_N}$ est le rapport signal sur bruit en puissance

- Théoriquement, la rapidité maximale de modulation R_{max} est liée à la bande passante W du canal (en absence de bruit), par la relation :

$$R_{max} = 2 W$$

Dans la pratique : $R_{max} = 1,25 W$ soit $W \cong 0,8 R_{max}$

Rapport signal sur bruit

- Dans le cas d'une liaison numérique, on définit le rapport : $\rho = \frac{E_b}{N_0}$ qui exprime le **rapport signal sur bruit binaire** :
 - E_b désigne la quantité d'énergie par bit, exprimée en $V^2.s$,
 - N_0 désigne la densité spectrale mono-latérale du bruit additif blanc sur le canal, exprimée en V^2/Hz .
- On en déduit le **rapport signal sur bruit en puissance** :

$$\frac{P_S}{P_N} = \frac{E_b \cdot D}{N_0 \cdot B} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \eta = \rho \cdot \eta$$


la puissance moyenne du signal est donnée par $P_S = E_b \cdot D$

la puissance du bruit dans la bande B est donnée par $P_N = N_0 \cdot B$

Efficacité spectrale et en puissance

Efficacité spectrale : Transmettre le **débit binaire D** le plus grand en consommant la **plus petite bande passante B**

 Débit binaire D

 Bande passante B

Efficacité en puissance : Atteindre un niveau de **TEB fixé** en envoyant la **puissance la plus petite**.

 Performance en TEB

 Puissance émise

Codes en ligne

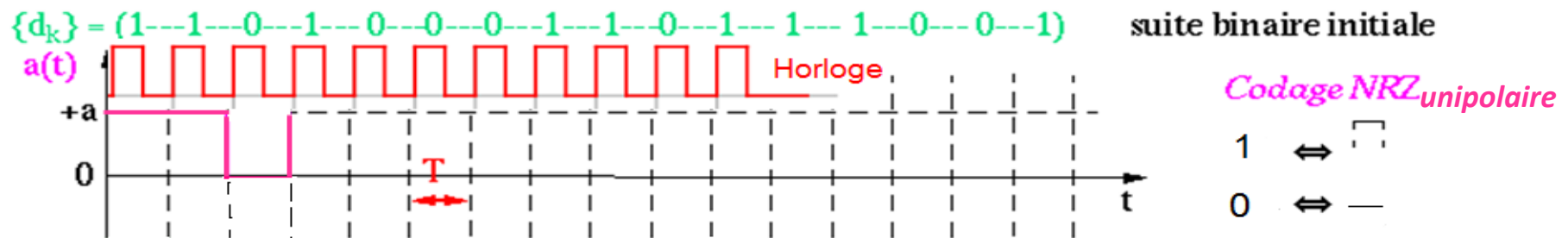
Codage en ligne d'un signal

- Le signal binaire n'est pas transmis directement sur la ligne de transmission et l'usage de codes en ligne est nécessaire.
- La récupération de l'horloge en transmission synchrone est facilité par un changement d'état fréquent des séquences à transmettre.
- Le spectre d'un signal binaire est concentré sur les fréquences basses qui sont les plus affaiblies par la ligne.
- Les perturbations subies par un signal sont proportionnelles à la largeur de sa bande de fréquences.

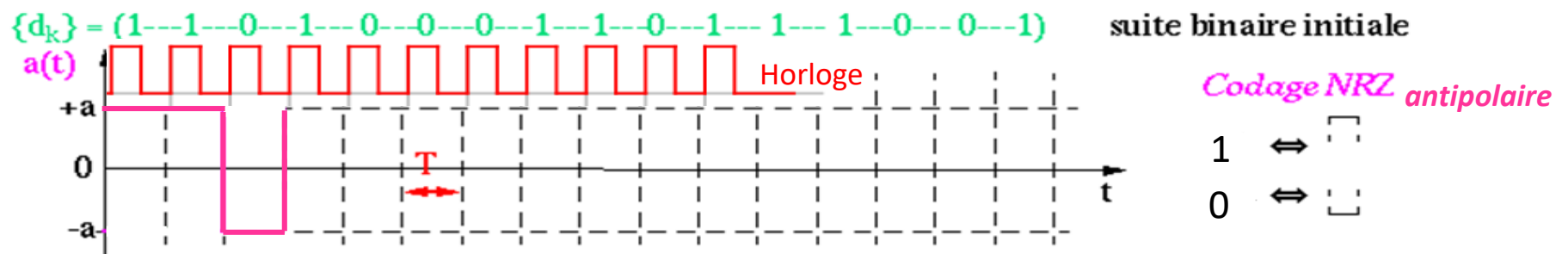
Code NRZ (Non Return to Zero)

Code NRZ : Non Retour à Zéro

- Il s'agit de coder les éléments binaires un à un par un certain niveau de tension, sans retour de la tension au niveau 0 pendant la durée d'un symbole.
- Code NRZ unipolaire



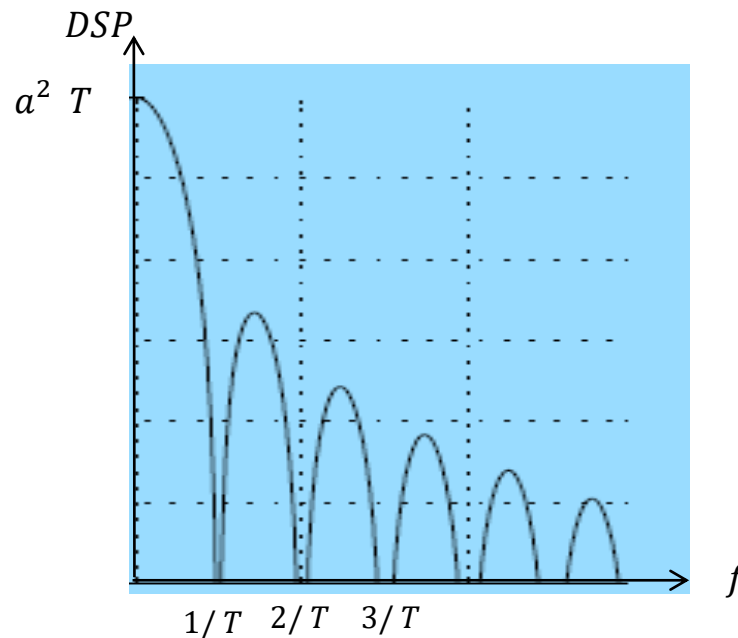
- Code NRZ antipolaire



Code NRZ (Non Return to Zero)

Code NRZ antipolaire :

- Code simple, utilisé couramment entre l'ordinateur et ses périphériques.
- Codage dans lequel le signal n'est jamais nul.
- Par conséquent, le récepteur peut déterminer la présence ou non d'un signal.
- Son spectre est de la forme :

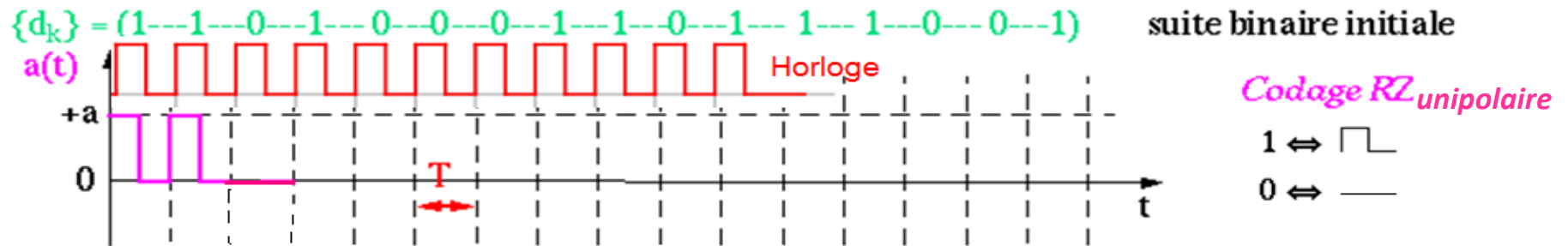


- Le lobe principal est de largeur $1/T$ et contient 91% de la puissance du signal.

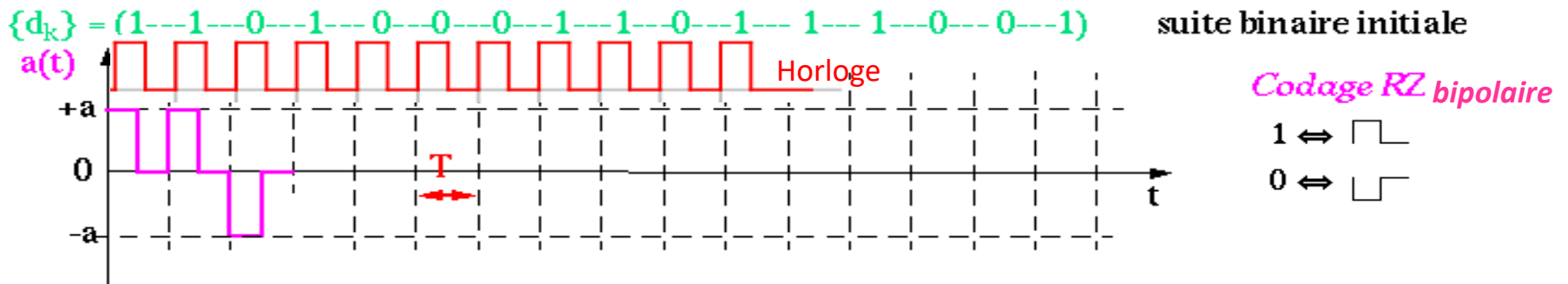
Code RZ (Return to Zero)

Code RZ : Retour à Zéro

- Les éléments binaires sont codés un à un et la tension passe à zéro avant la fin d'un symbole (transition à l'intérieur du symbole).
- Code RZ unipolaire :



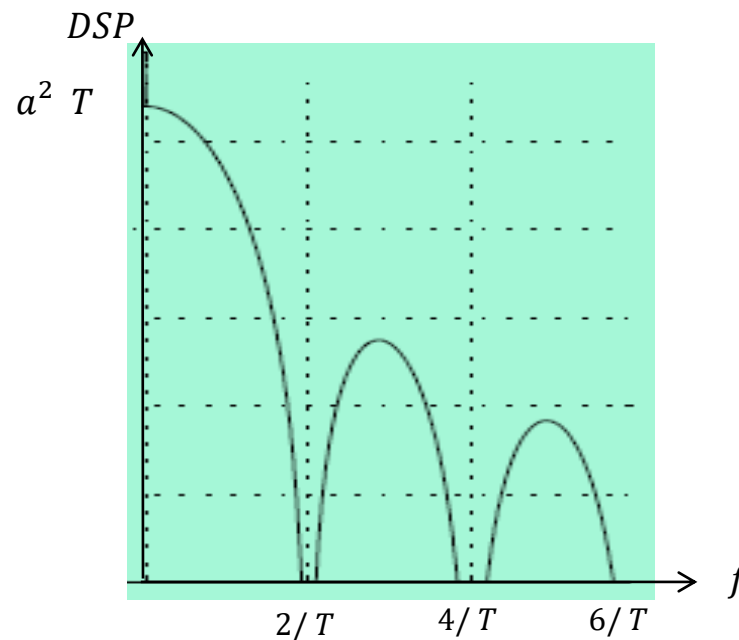
- Code RZ bipolaire :



Code RZ (Return to Zero)

Code RZ bipolaire :

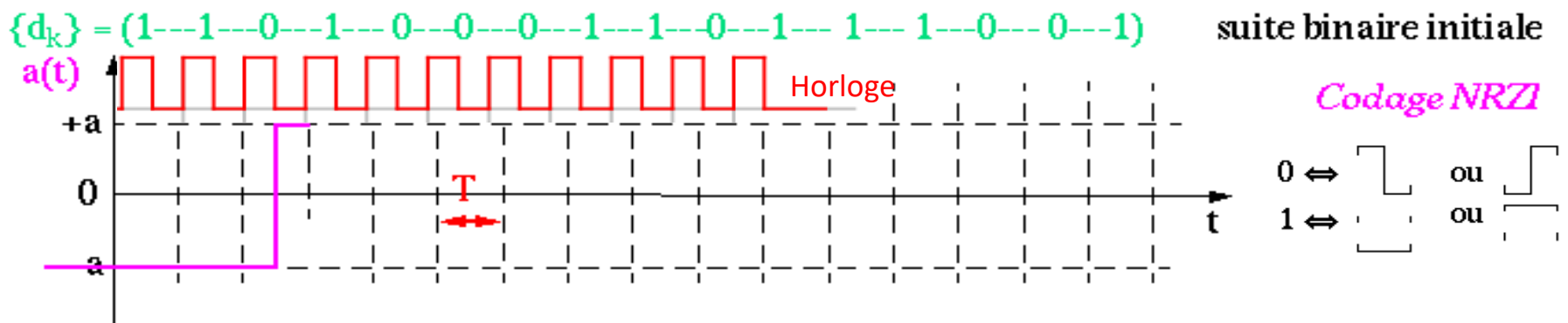
- Code ternaire (3 niveaux) simple, limite les interférences entre symboles, permet le codage de l'horloge.
- Son spectre est très semblable à celle du signal NRZ antipolaire, si ce n'est que les lobes sont deux fois plus larges :



Code NRZI (Non Return to Zero Invert)

Code NRZI : Non Retour à Zéro Inversé

- Le code NRZI est une variante du NRZ mais attention son nom est trompeur, il ne s'agit pas du code NRZ inversé.
- Pour un 1 le signal reste constant, et pour un 0 le signal est inversé en milieu de période d'horloge.



Code NRZI (Non Return to Zero Invert)

Code NRZI :

- Code binaire, indépendant de la polarité, adapté à la transmission photonique.
- Le codage NRZI est utilisé pour le FDDI, fast ethernet ...
- Le codage NRZI possède de nombreux avantages, dont :
 - La détection de la présence ou non du signal
 - La nécessité d'un faible courant de transmission du signal
- Par contre, il possède un défaut : la présence d'un courant continu lors d'une suite de 1, gênant la synchronisation entre émetteur et récepteur.

Code biphase ou Manchester

Code biphase ou Manchester :

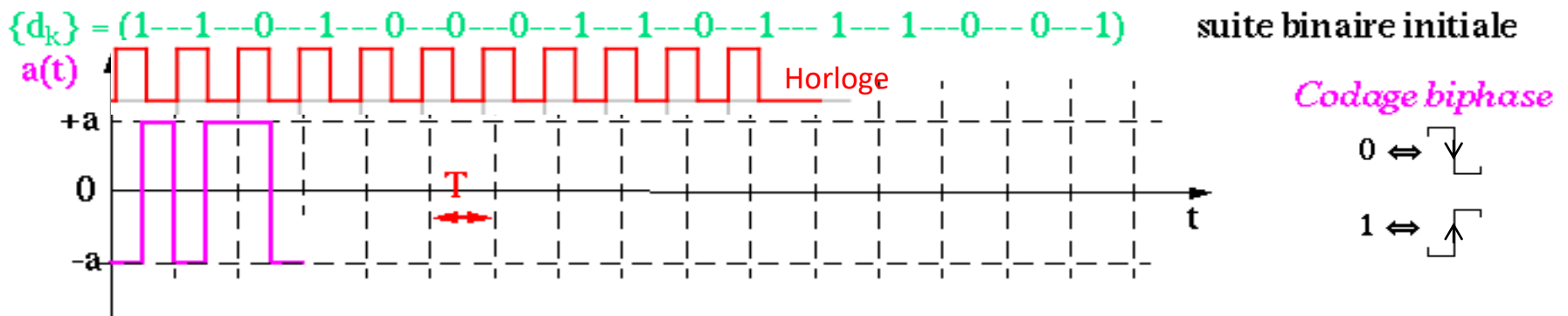
- Il est caractérisé par une transition au milieu de chaque temps bit. Le bit transmis est caractérisé par la présence d'un front montant ou descendant en $T/2$:

Convention G. E. Thomas :

- front montant pour un 0
- front descendant pour un 1

Convention IEEE 802.3 :

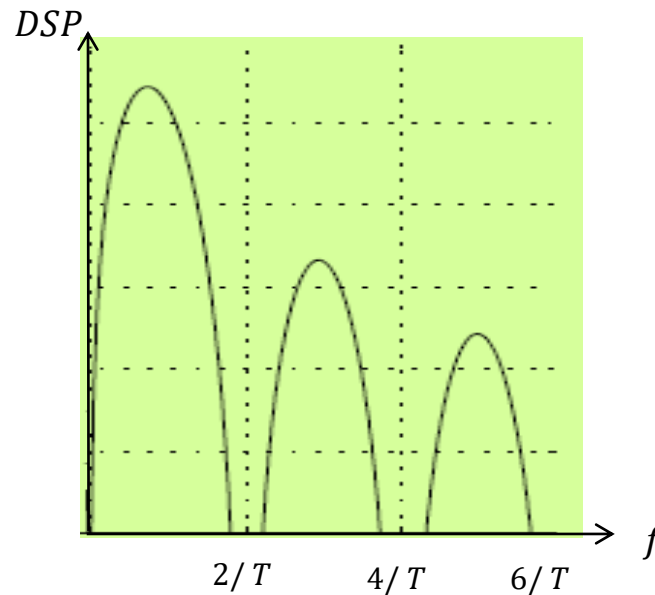
- front montant pour un 1
- front descendant pour un 0



Code biphase ou Manchester

Code biphase ou Manchester :

- Le spectre du codage Manchester est nulle pour $f=0$ et "proche de zéro" à son voisinage.



- De ce fait, ce signal logique codé peut être transmis facilement par couplage inductif (transformateur) à l'inverse des signaux TTL, NRZ, RZ qui possèdent une densité spectrale maximale au voisinage de $f=0$.

Code biphasé ou Manchester

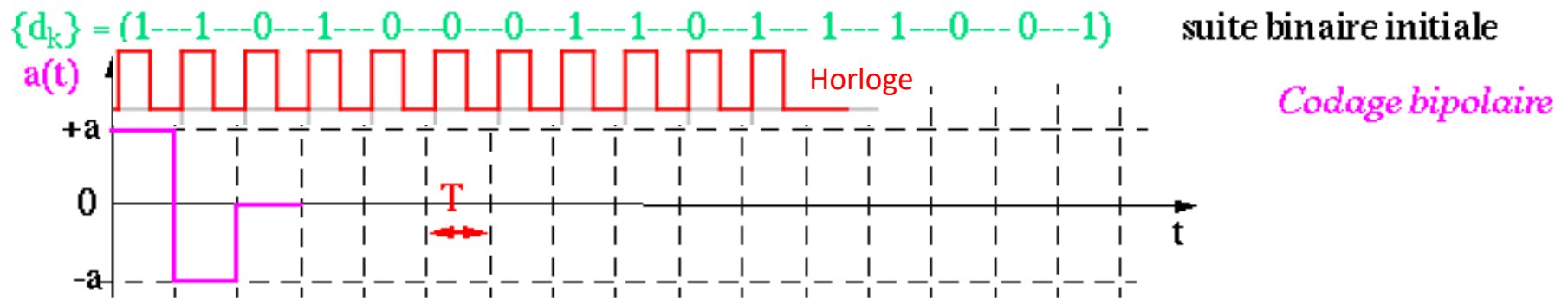
Code biphasé ou Manchester :

- Code binaire, équilibré, conservation de l'horloge, spectre très large (le double). Codage utilisé par Ethernet.
- Caractéristiques du codage Manchester :
 - Bonne résistance au bruit (2 niveaux)
 - Bonne adaptation aux supports à bande passante large
 - Beaucoup de transitions, donc facilité de synchronisation d'horloge
- Le principal inconvénient de ce code réside dans la grande largeur de son spectre, ce qui le confine aux supports à large bande comme les câbles coaxiaux

Code bipolaire simple ou AMI

Code bipolaire simple ou AMI "Alternate Mark Inversion" :

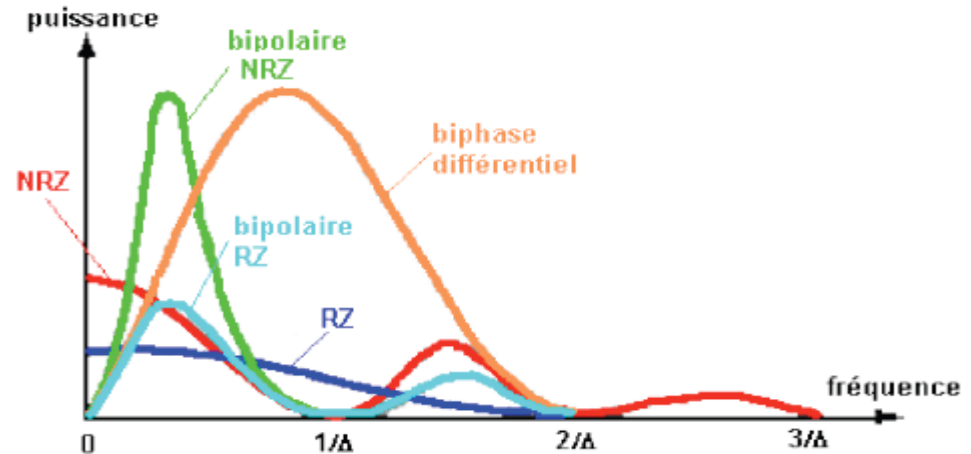
- Il s'agit d'une transmission avec un alphabet ternaire $\{-1, 0, +1\}$ où l'on code :
 - les bits 0 par le symbole 0
 - les bits 1 alternativement par $+1$ et -1 .



- Code équilibré, indépendant de la polarité avec dérivation de l'horloge (suite de 0).

Récapitulatif

Divers types de codes en BB :



- Les codes sur fronts facilitent la reconstitution de l'horloge et autorisent les changements de polarité mais présentent un doublement de la bande passante.
- Les codes multi niveaux augmentent le débit au détriment du rapport S/N.
- Il n'y a pas de code BB optimal, il faut choisir le code en fonction de l'application visée (caractéristiques du support, débit de transmission voulu ...).

Modulations Numériques

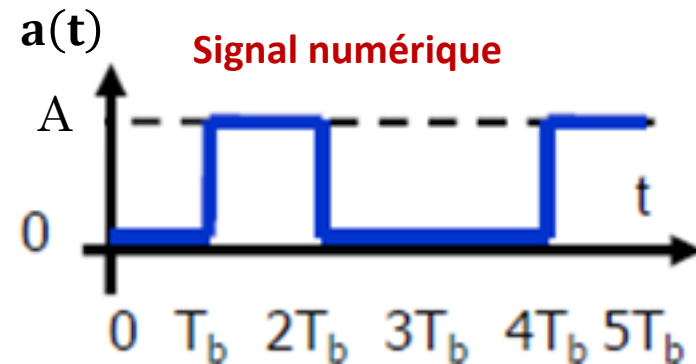
Principe de base

Information numérique

0 1 0 0 1

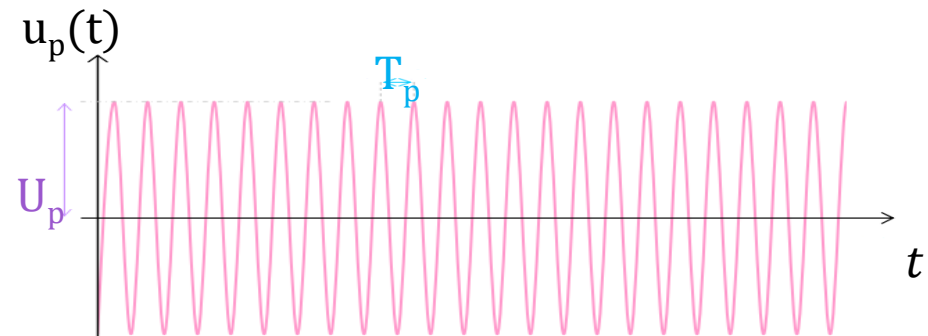
$$a(t) = \sum_k a_k g(t - kT_b)$$

"0" \rightarrow 0
"1" \rightarrow A



Signal porteur HF

$$\begin{aligned} u_p(t) &= U_p \cos(\omega_p t + \varphi_p) \\ &= U_p \cos(2\pi f_p t + \varphi_p) \end{aligned}$$



Principe de base

Le signal à transmettre est intégré dans une **onde sinusoïdale** de **haute fréquence** appelée **porteuse** :

$$u_p(t) = U_p \cdot \cos(\omega_p \cdot t + \varphi_p)$$

➡ Les paramètres modifiables sont :

→ l'amplitude : U_p



Modulation d'amplitude ASK

→ la fréquence : $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$



Modulation de fréquence FSK

→ la phase : φ_p



Modulation de phase PSK

Amplitude Shift Keying

Modulation par déplacement d'amplitude

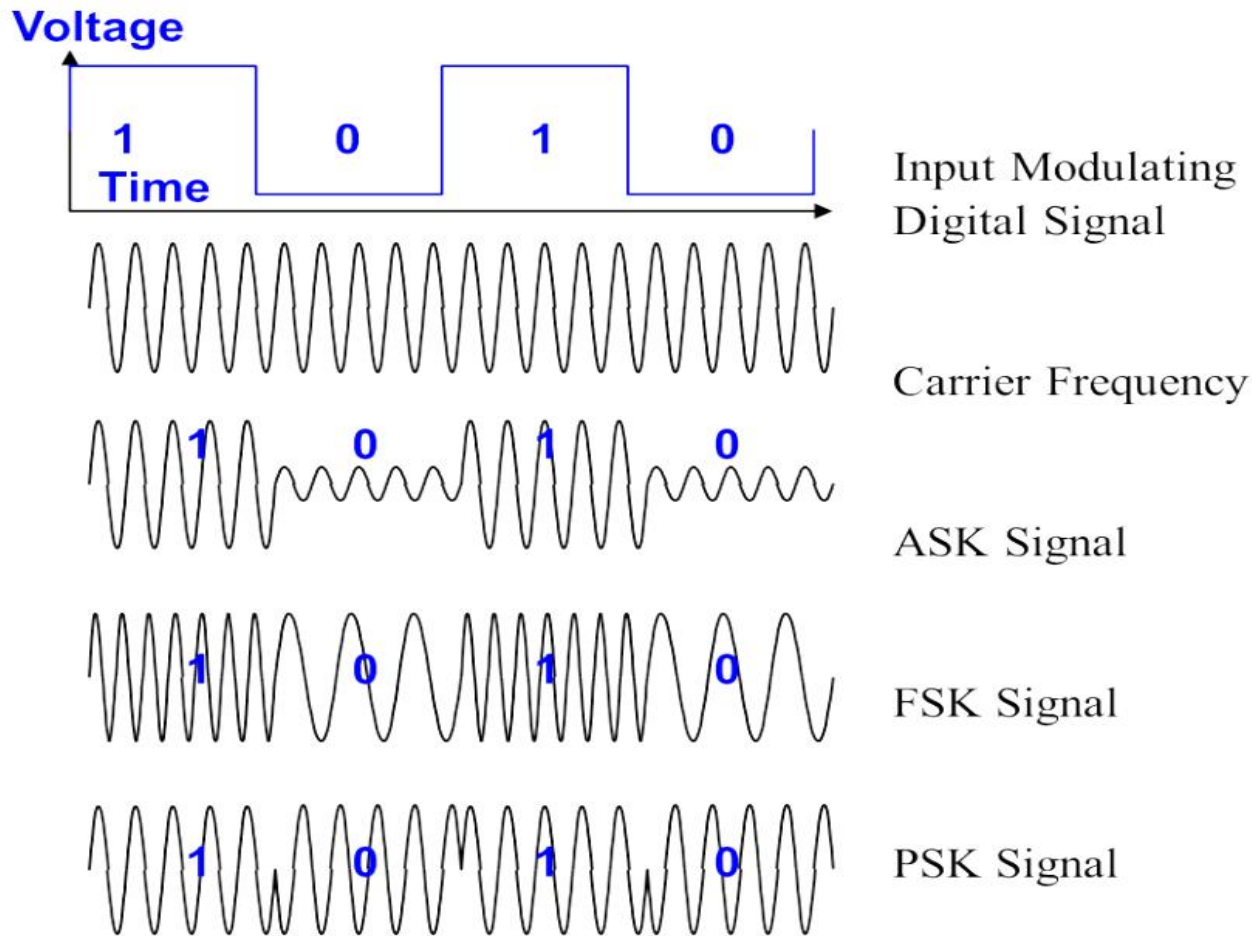
Frequency Shift Keying

Modulation par déplacement de fréquence

Phase Shift Keying

Modulation par déplacement de phase

Examples

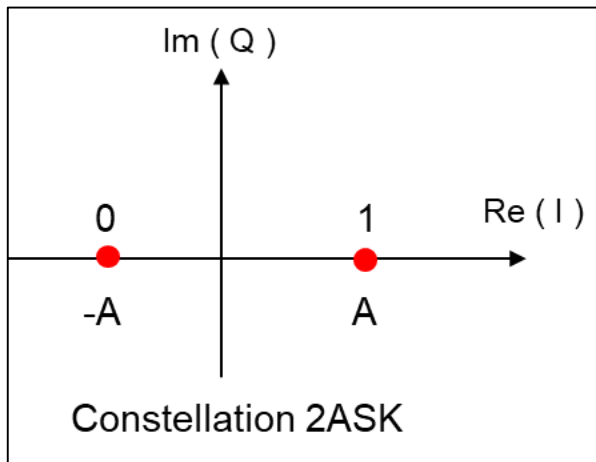


Modulation ASK

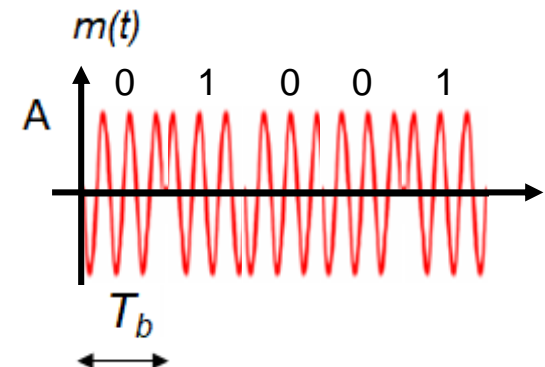
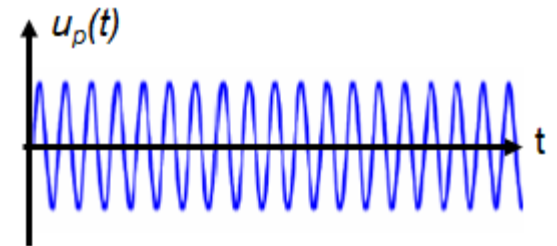
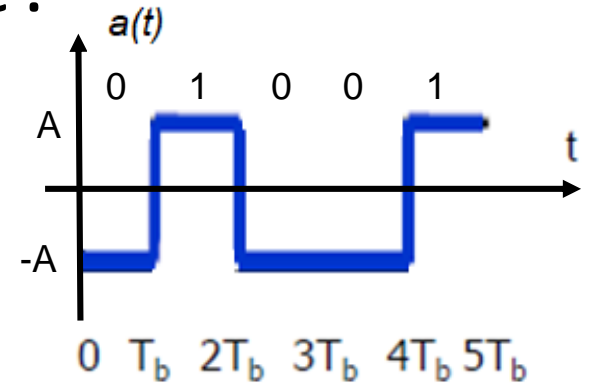
Modulation par déplacement d'amplitude :

2ASK symétrique :

Le signal modulant $a(t)$ fait varier de façon discrète l'amplitude de la porteuse.

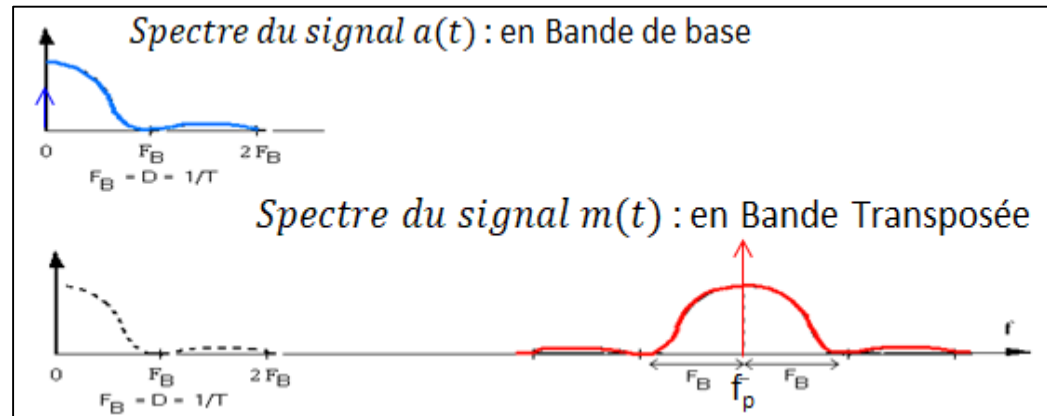
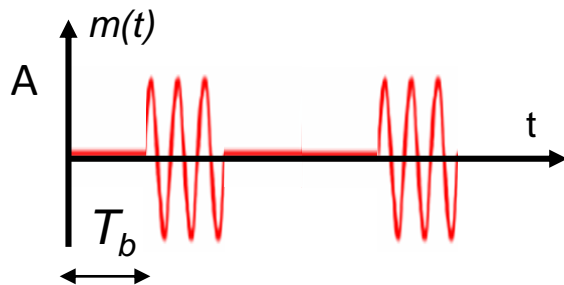
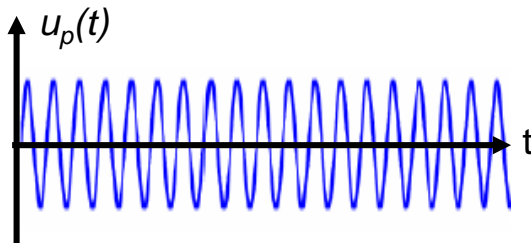
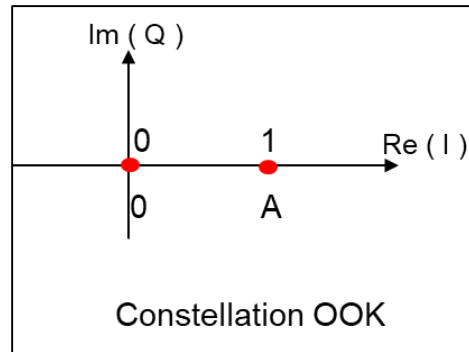
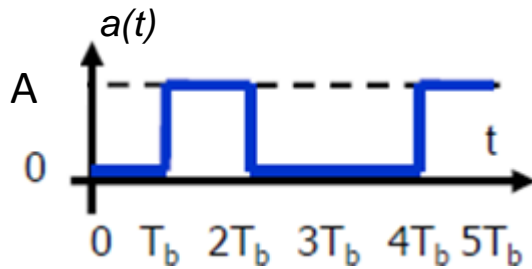


ASK : Amplitude Shift Keying



Modulation ASK

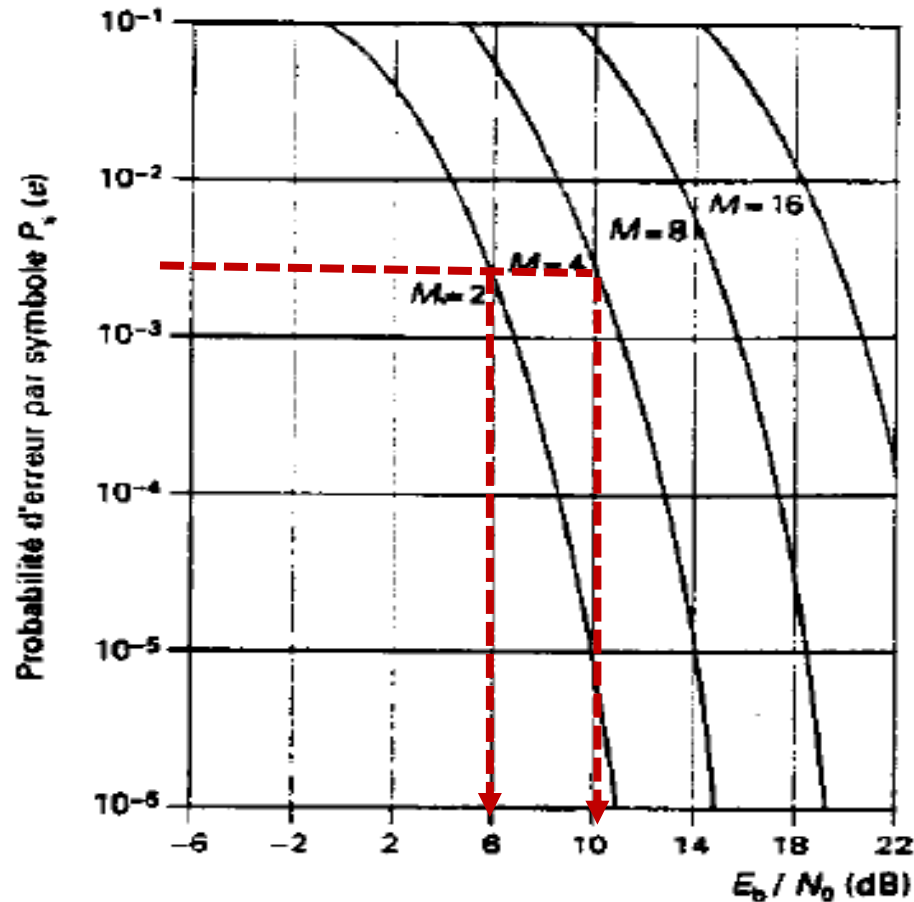
Modulation tout ou rien OOK (On Off Keying) :



- $g(t)$ Filtre en $\frac{1}{T}$, $B_{OOK} = 2F_B = \frac{2}{T}$
- $g(t)$ Filtre en cosinus surélevé, $B_{OOK} = \frac{1}{T} (1 + \alpha) = R (1 + \alpha)$

Modulation ASK

Performances des modulations MASK :



Pour la modulation MASK symétrique :

$M = 2^n$ amplitudes possibles du signal

$$m(t) = \sum_k a_k g(t - kT) \cdot \cos(\omega_p t + \varphi_p)$$

a_k sont répartis sur une droite :

$$A_i = (2i - M + 1) \cdot A$$

avec : $i = 0, 1, 2, \dots, (M-1)$

n bits sont transmis par symbole :

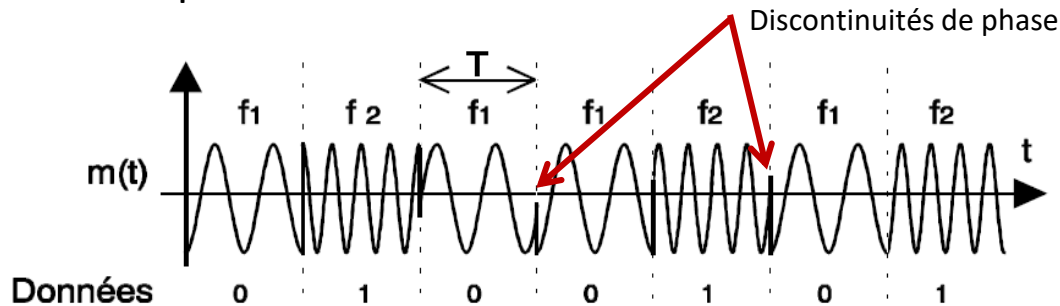
$$T = n T_b$$

Modulation FSK

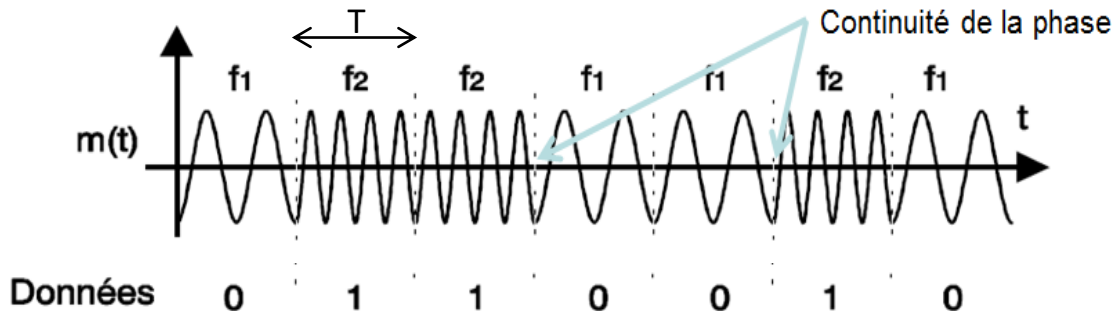
Modulation par Déplacement de Fréquence :

On définit deux types de modulation FSK :

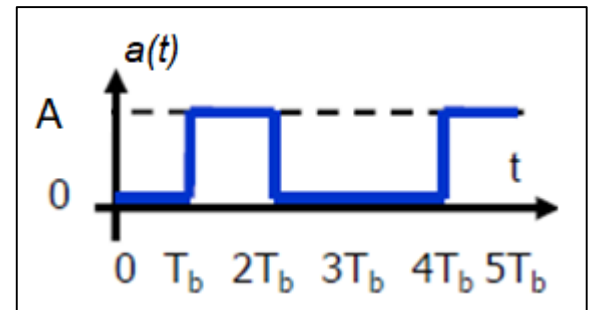
- à phase discontinue **FSK-PD** :



- à phase continue **FSK-PC** :



Le signal modulant $a(t)$ fait varier de façon discrète la fréquence de la porteuse.



f_1 représente le « 0 »

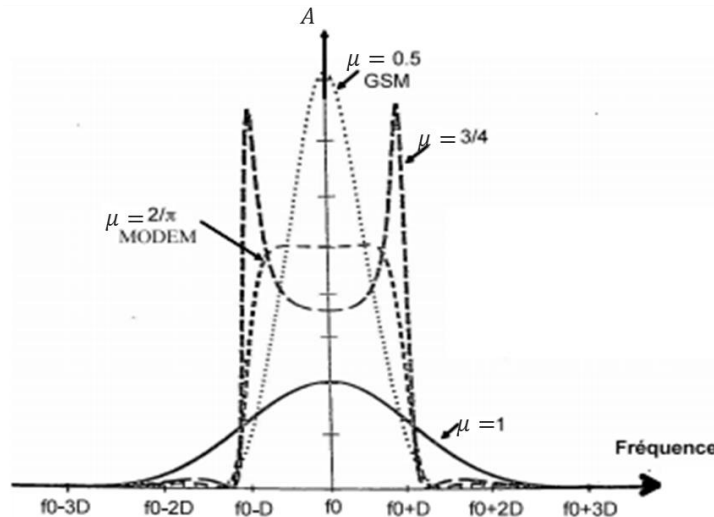
f_2 représente le « 1 »

Modulation FSK

Modulation MSK :

- C'est une modulation FSK à phase continue **2FSK-PC**.
- Lorsque $Df = 1/2 D$, la modulation FSK prend alors le nom de MSK

L'indice de modulation vaut $\mu = Df/R = Df/D = 0,5$



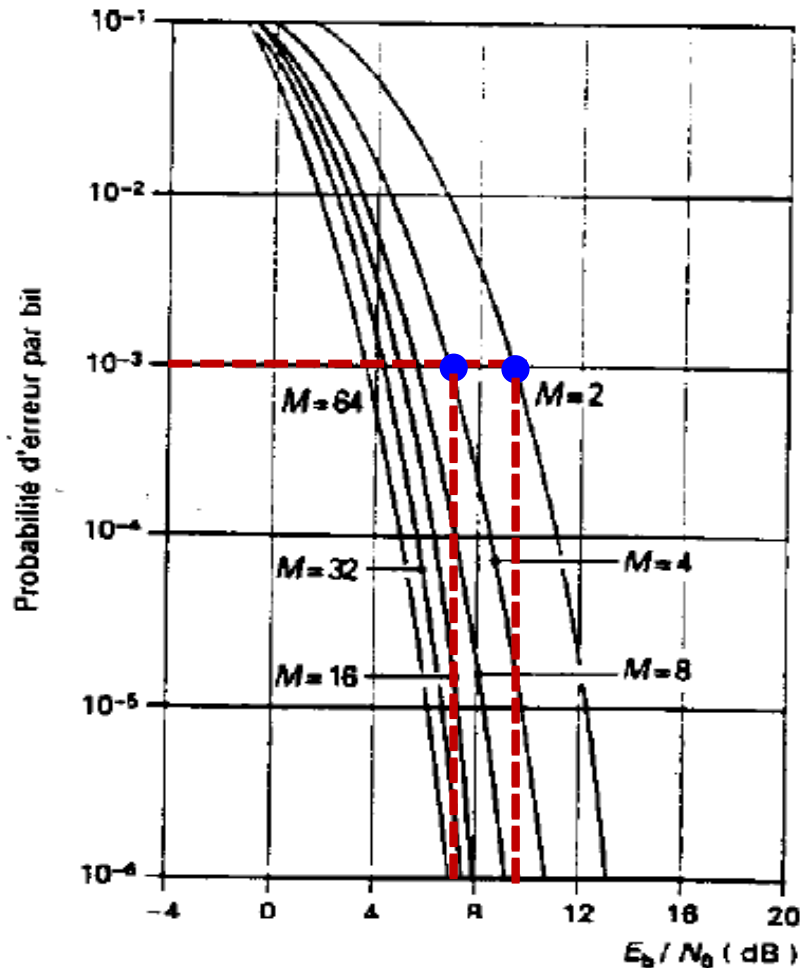
MSK : Minimum Shift Keying

- Cas du GSM : La modulation porte alors le nom de GMSK (Gaussian MSK).



Modulation FSK

Performances des modulations MFSK :



Pour la modulation MFSK :

$M = 2^n$ fréquences possibles du signal

$$m(t) = \cos(2\pi (f_p + \Delta f \cdot a_k) \cdot t)$$

Fréquence instantanée par symbole est :

$$f(t) = f_p + \Delta f \cdot a_k$$

a_k appartient à l'alphabet de valeurs :

$$\{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm (M-1)\}$$

Excursion de fréquence : $\Delta f = \frac{B_f}{2}$

Indice de modulation : $\mu = \frac{B_f}{R} = 2 \cdot \Delta f \cdot T$

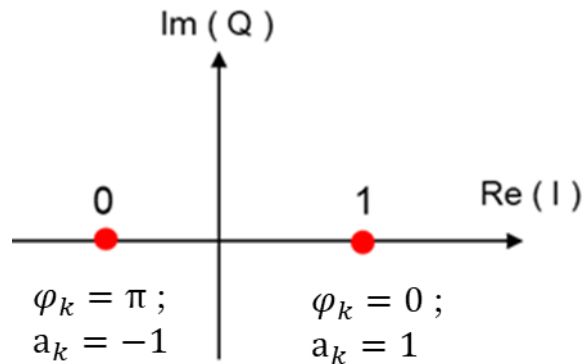
n bits sont transmis par symbole : $T = n T_b$

Modulation PSK

Modulation par Déplacement de Phase :

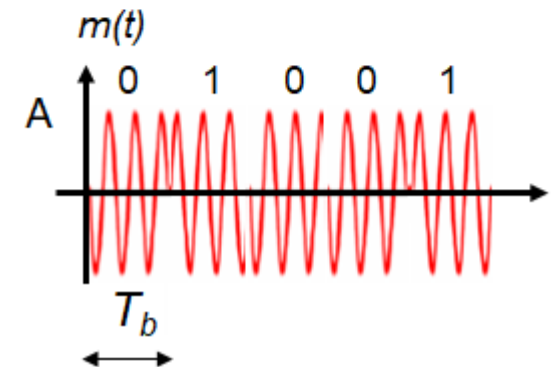
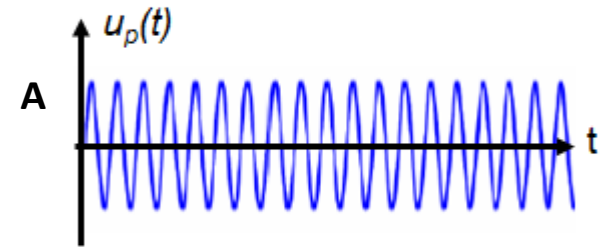
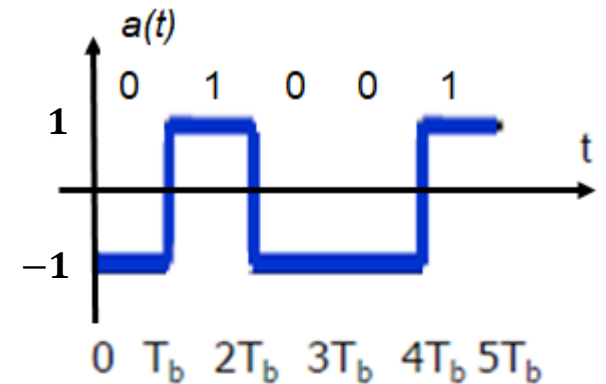
2PSK ou BPSK "Binary Phase Shift Keying" :

Le signal modulant $a(t)$ fait varier de façon discrète la phase de la porteuse.



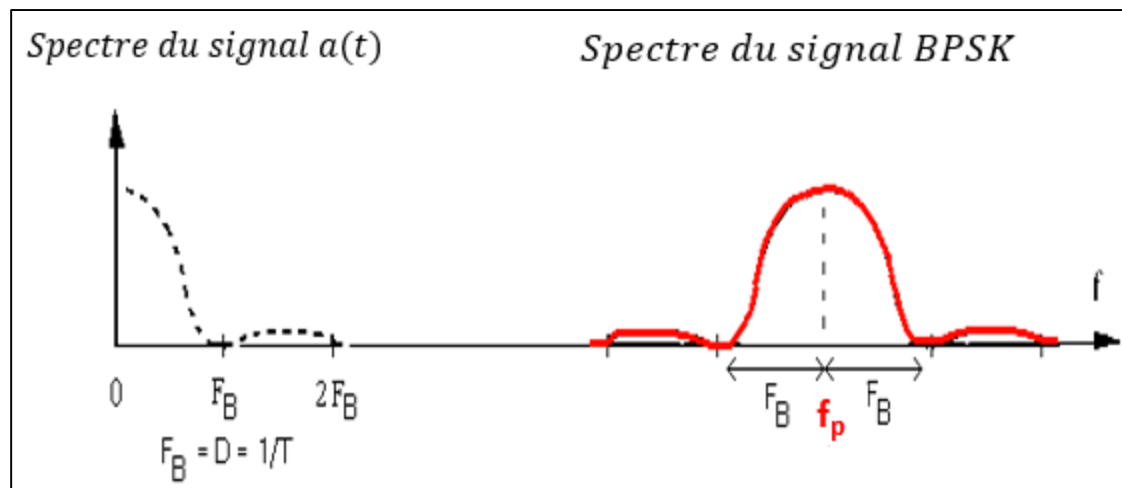
Constellation 2PSK

PSK : Phase Shift Keying



Modulation PSK

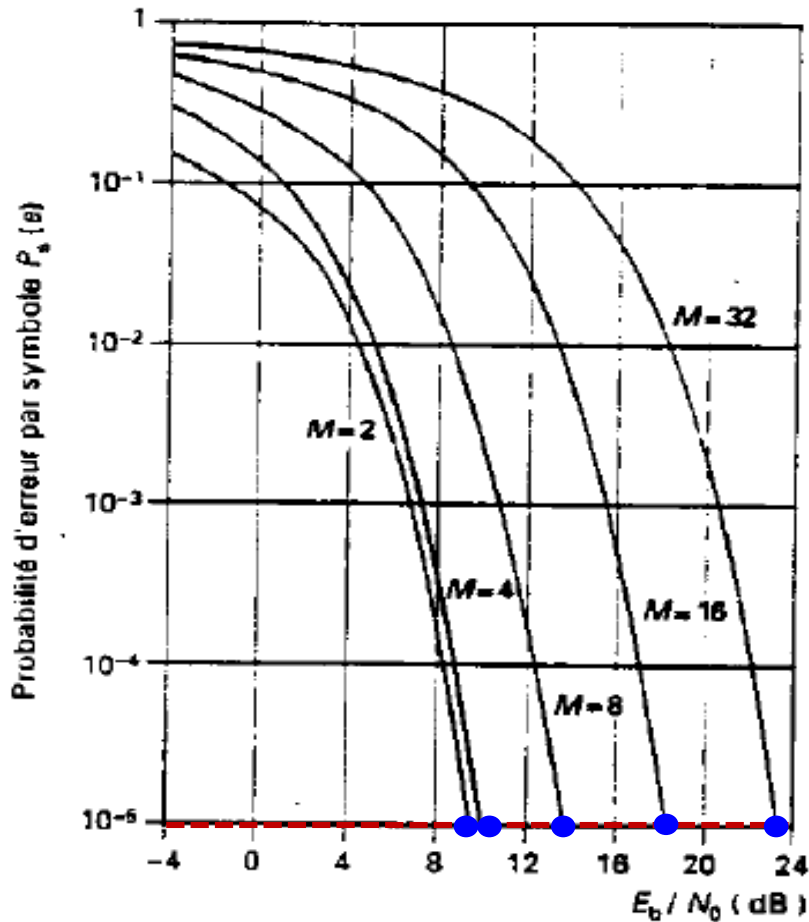
Modulation par Déplacement de Phase :



- $g(t)$ Filtre en $\frac{1}{T}$, $B_{2PSK} = 2F_B = \frac{2}{T} = 2R$
- $g(t)$ Filtre en cosinus surélevé, $B_{2PSK} = \frac{1}{T} (1 + \alpha) = R (1 + \alpha)$

Modulation PSK

Performances des modulations MPSK :



Pour la modulation MPSK avec $M > 2$:

$M = 2^n$ phases possibles du signal

$$m(t) = A \cdot \cos(\omega_p t + \varphi_p + \varphi_k)$$

c_k sont répartis sur un cercle :

$$c_k = a_k + jb_k = e^{j\varphi_k}$$

$$\text{avec } a_k = \cos(\varphi_k), b_k = \sin(\varphi_k)$$

$$\varphi_k = \frac{\pi}{M} + k \frac{2\pi}{M} \text{ pour } k = 0, 1, 2 \dots (M-1)$$

n bits sont transmis par symbole : $T = n T_b$

Modulation ASK :

La tentation d'**augmenter M** (c'est à dire le nombre de bits transmis par symbole) est grande mais présente les avantages et les inconvénients suivants :

- **L'efficacité spectrale** $\eta = \frac{1}{TB} \log_2 M$ **augmente**, (pour une largeur de la bande B donnée).
- Malheureusement, la probabilité d'erreur par symbole **$P_s(e)$ augmente** aussi, et pour ne pas dégrader l'efficacité spectrale, il faudra **augmenter l'énergie** émise par bit E_b .
- Finalement, ce type de modulation est **simple à réaliser** mais il est assez **peu employé** pour $M > 2$ car ses performances sont moins bonnes que celles d'autres modulations, notamment pour sa résistance au bruit.

Modulation FSK :

Avantages et inconvénients des deux types de Modulation par Déplacement de Fréquence :

- La FSK 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 FSK avec continuité de phase :
 - Elle est plus **complexe à réaliser**.
 - Elle requiert une **bande passante plus étroite**.

Modulations ASK et PSK :

- L'ASK et la PSK ne constituent pas une solution satisfaisante pour utiliser efficacement l'énergie émise lorsque le nombre de points M est grand.
 - dans l'ASK les points de la constellation sont sur une droite, et dans la PSK les points sont sur un cercle.
 - la probabilité d'erreur est fonction de la distance minimale entre les points de la constellation.
- La meilleure modulation est celle qui maximise cette distance pour une puissance moyenne donnée.
 - Un choix plus rationnel est alors une modulation qui répartit les points uniformément dans le plan.
- On parle alors de modulation d'amplitude sur deux porteuses en quadrature (MAQ) appelée aussi : QAM pour "Quadrature Amplitude modulation". C'est une modulation dite bidimensionnelle.