

# **Télécommunications**

**Département sciences du numérique  
Première année**

## **Transmissions Bande de Base**

Nathalie Thomas, IRIT/ENSEEIHT  
Nathalie.Thomas@enseeiht.fr

# Télécommunications

## Transmissions en bande de base

---

### 1) Modulation numérique en bande de Base et notion d'efficacité spectrale

- 1) Définition du modulateur bande de base
- 2) DSP du signal modulé => bande nécessaire à la transmission
- 3) Efficacité spectrale de la transmission

### 2) Interférences entre symboles et critère de Nyquist

- 1) Problème de l'interférence entre symboles,
- 2) Critère de Nyquist dans le domaine temporel,
- 3) Diagramme de l'œil,
- 4) Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel,
- 5) Impact du canal de propagation

### 3) Impact du bruit dans la chaîne de transmission et notion d'efficacité en puissance

- 1) Filtrage adapté,
  - 2) Règle de décision,
  - 3) Taux d'erreur symbole et taux d'erreur binaire,
  - 4) Efficacité en puissance de la transmission.
-

# Télécommunications

## Transmissions en bande de base

---

### 1) Modulation numérique en bande de Base et notion d'efficacité spectrale

- 1) Définition du modulateur bande de base
- 2) DSP du signal modulé => bande nécessaire à la transmission
- 3) Efficacité spectrale de la transmission

### 2) Interférences entre symboles et critère de Nyquist

- 1) Problème de l'interférence entre symboles,
- 2) Critère de Nyquist dans le domaine temporel,
- 3) Diagramme de l'œil,
- 4) Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel,
- 5) Impact du canal de propagation

### 3) Impact du bruit dans la chaîne de transmission et notion d'efficacité en puissance

- 1) Filtrage adapté,
  - 2) Règle de décision,
  - 3) Taux d'erreur symbole et taux d'erreur binaire,
  - 4) Efficacité en puissance de la transmission.
-

# Modulation numérique en bande de base

## Objectif - Principe général

---

### → Objectif

A partir de données numériques (information binaire), générer un signal physique adapté au canal de propagation et permettant la transmission de ces données.

### → Principe

- Découper la séquence binaire en blocs de **n bits**
- Associer un **symbole** M-aire à chaque bloc :  $M=2^n$
- Associer un signal analogique à chacun de ces symboles (**forme d'onde**)
- Transmission des bits tous les  $T_b$ ,  **$R_b=1/T_b$  : débit binaire**
- Transmission des symboles tous les  $T_s = nT_b$  (période symbole)

$$R_s=1/T_s : \text{débit symbole}$$


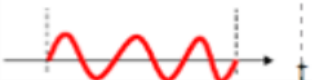
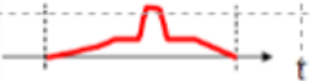

$$R_s=R_b/n$$

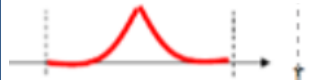
# Modulation numérique en bande de base

## Objectif - Principe général

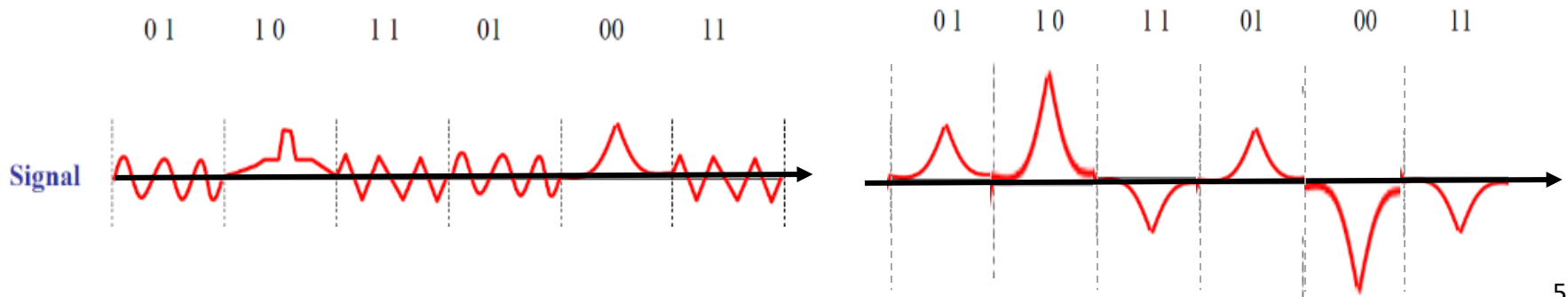
→ Exemple avec  $M=4$

→ Symboles et formes d'onde associées

Bits	Forme d'onde
00	
01	
10	
11	

Bits	Symbole	Forme d'onde
00	$S_0$	
01	$S_1$	
10	$S_2$	
11	$S_3$	

→ Signal obtenu pour transmettre une séquence de 10 bits



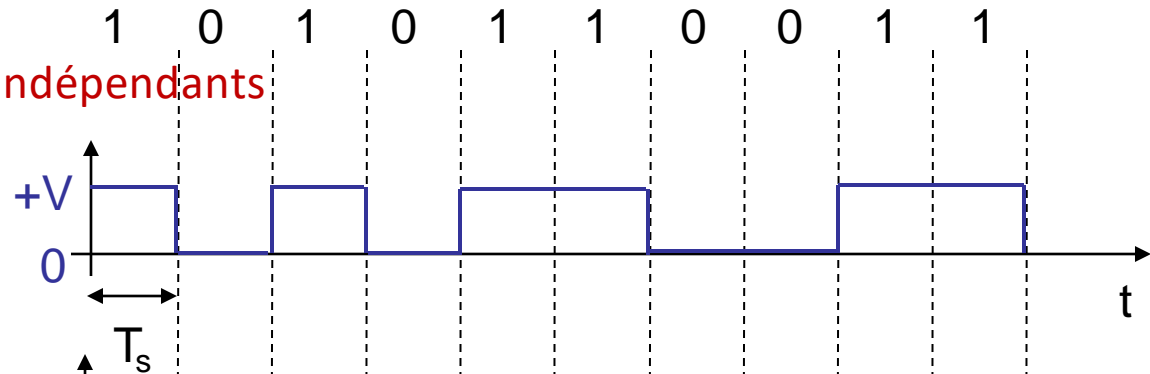
# Modulation numérique en bande de base

## Quelques exemples de signaux

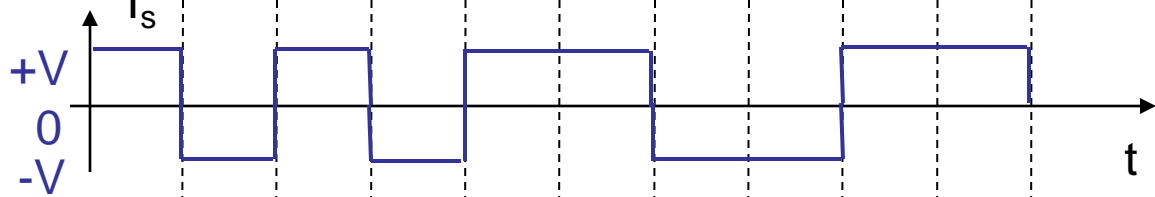
→ Codage **élémentaire** à **symboles indépendants**

→ Codage par niveau :

→ NRZ unipolaire :

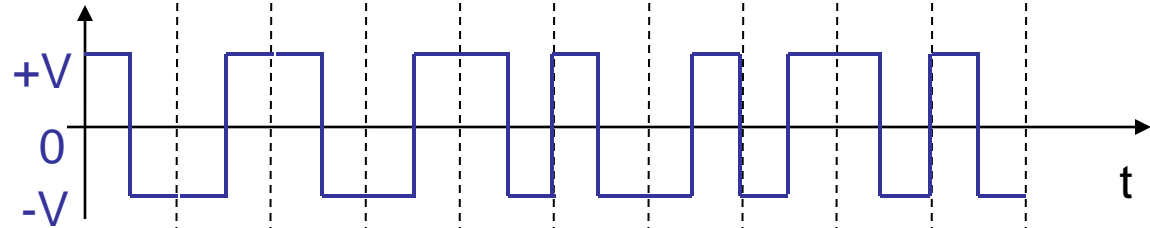


→ NRZ polaire :



→ Codage par transition

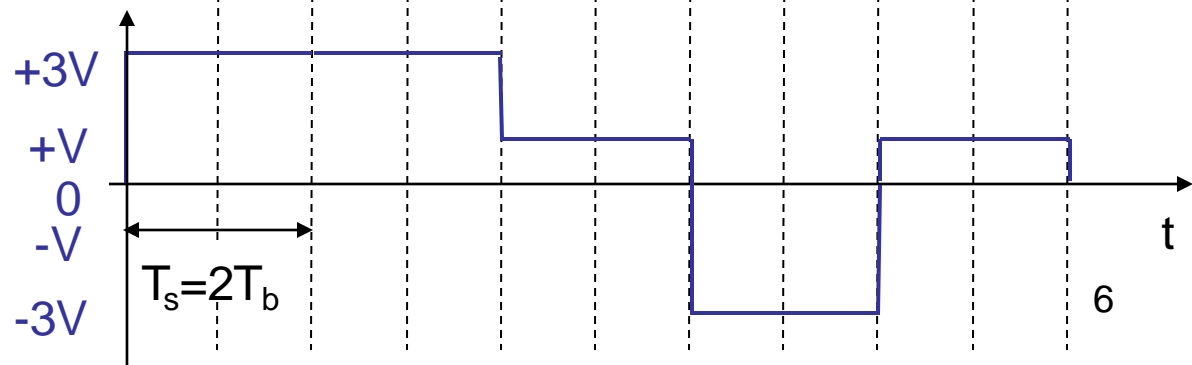
→ Biphase :



→ Codage bloc à **symboles indépendants**

→ Codage par niveau :

→ NRZ à 4 niveaux :



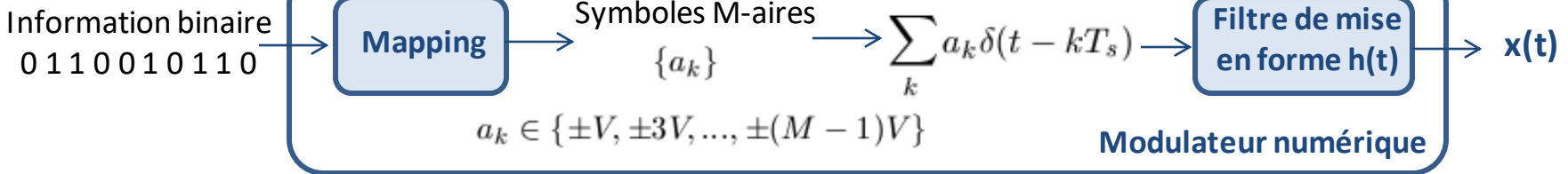
# Modulation numérique en bande de base

## Modélisation générale



# Modulation numérique en bande de base

## Modélisation générale





# Accès Wooclap pour les questions

Comment participer ?



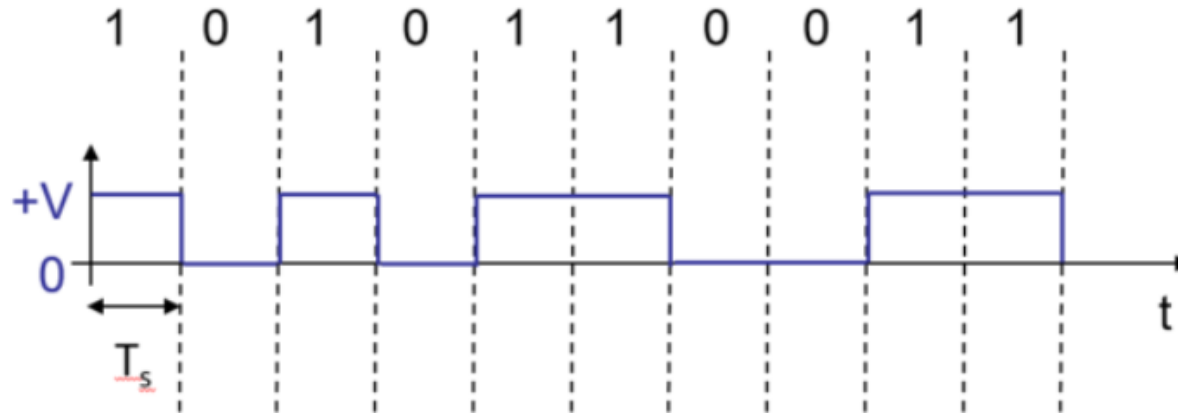
- 1 Allez sur [wooclap.com](https://wooclap.com)
- 2 Entrez le code d'événement dans le bandeau supérieur

Code d'événement  
**MODBDB**



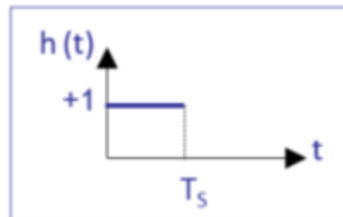
- 1 Envoyez **@MODBDB** au **06 44 60 96 62**
- 2 Vous pouvez participer

# QUESTION 1

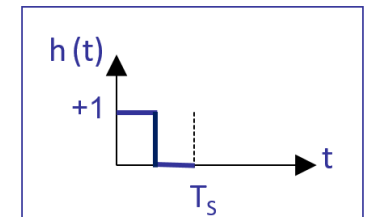


Identifiez, parmi les propositions ci-dessous, le mapping et la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme permettant de générer le signal donné.

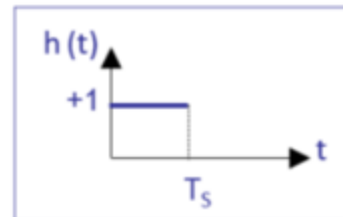
Mapping	
bits	Symboles $a_k$
0	0
1	+V



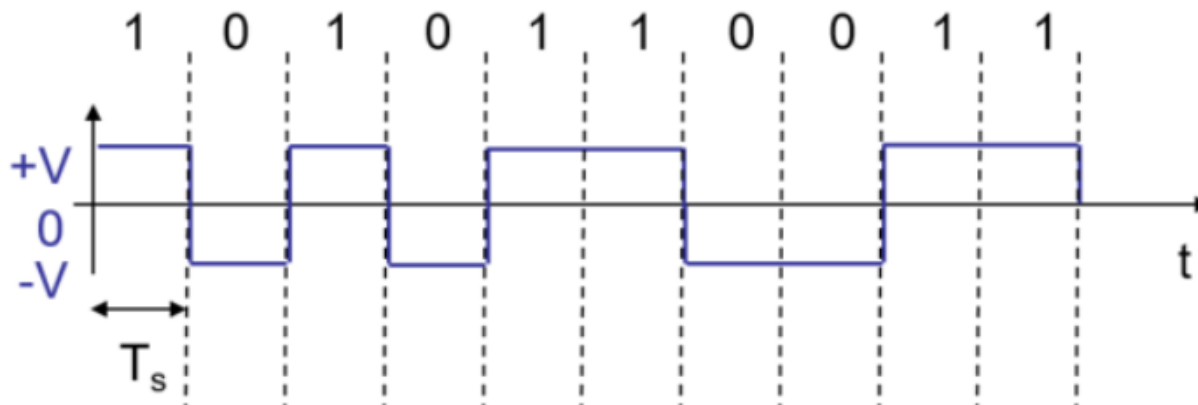
Mapping	
bits	Symboles $a_k$
0	0
1	+V



Mapping	
bits	Symboles $a_k$
0	-V
1	+V

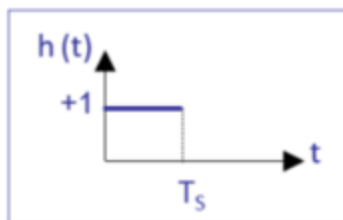


## QUESTION 2

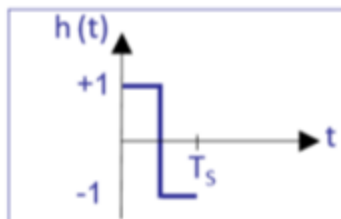


Identifiez, parmi les propositions ci-dessous, le mapping et la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme permettant de générer le signal donné.

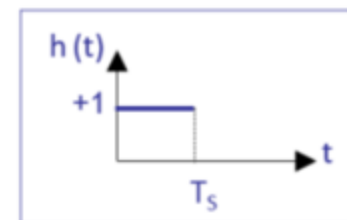
Mapping	
bits	Symboles $a_k$
0	0
1	$+V$



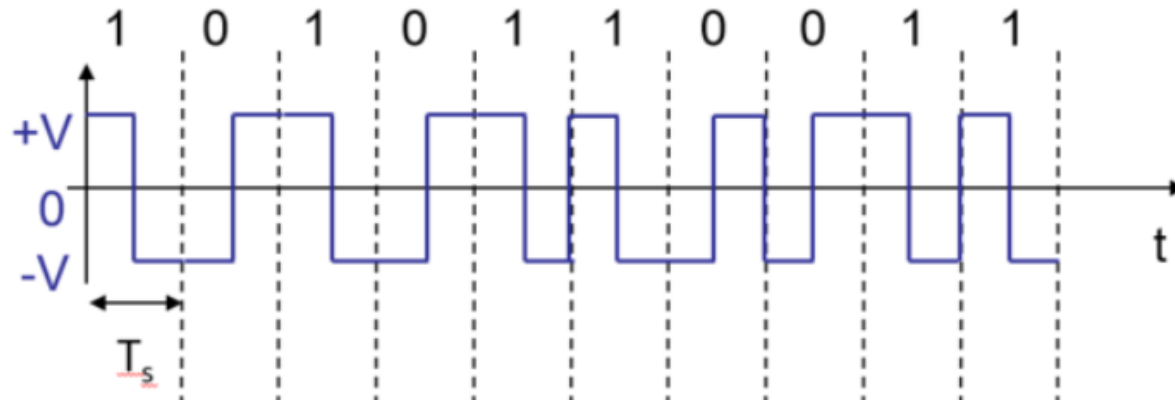
Mapping	
bits	Symboles $a_k$
0	$-V$
1	$+V$



Mapping	
bits	Symboles $a_k$
0	$-V$
1	$+V$

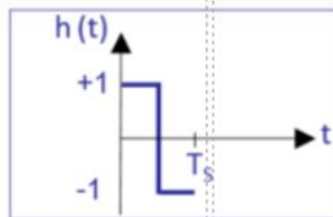


# QUESTION 3

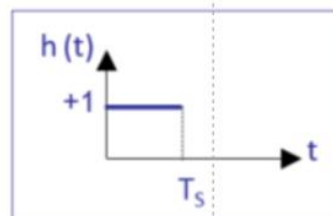


Identifiez, parmi les propositions ci-dessous, le mapping et la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme permettant de générer le signal donné.

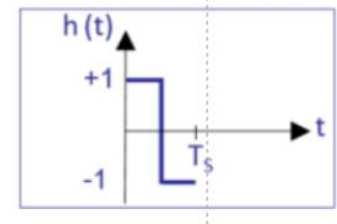
Mapping	
bits	Symboles $a_k$
0	0
1	$+V$



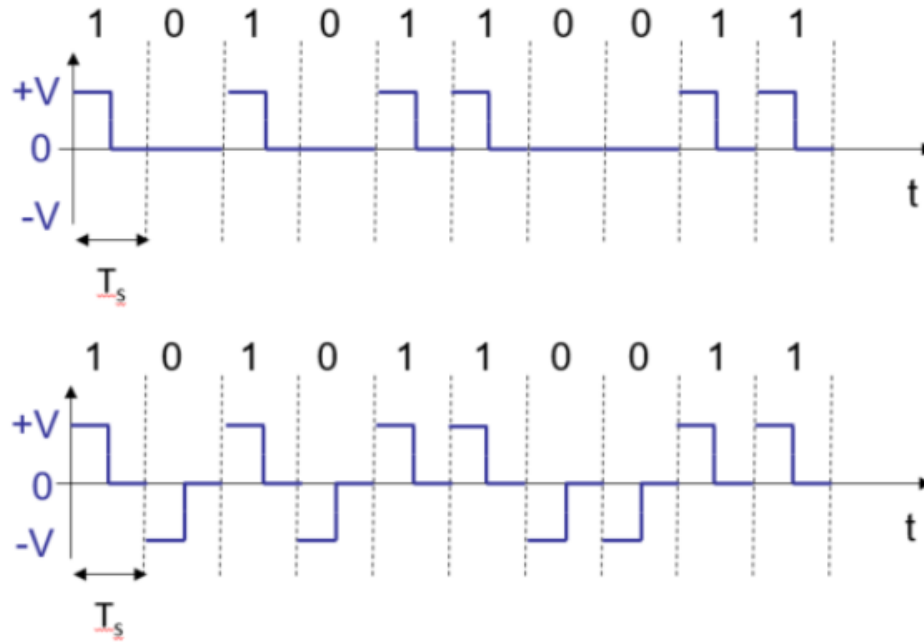
Mapping	
bits	Symboles $a_k$
0	$-V$
1	$+V$



Mapping	
bits	Symboles $a_k$
0	$-V$
1	$+V$



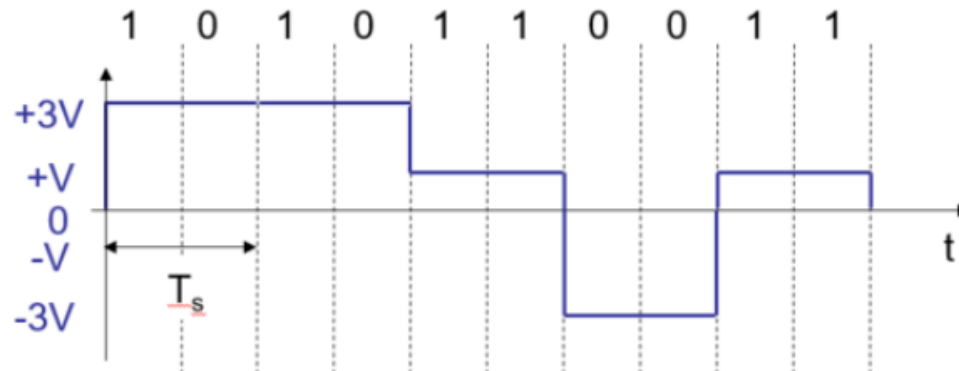
## QUESTION 4



Afin de générer le deuxième signal, qu'avons nous changé par rapport au premier ?

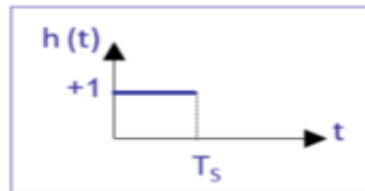
- ① Le mapping
- ② La réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme
- ③ La période symbole
- ④ Pas assez d'éléments pour répondre à la question

# QUESTION 5

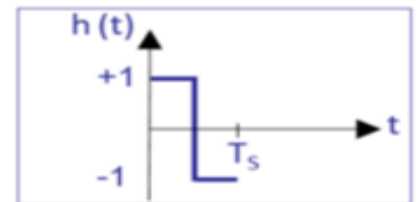


Identifiez, parmi les propositions ci-dessous, le mapping et la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme permettant de générer le signal donné.

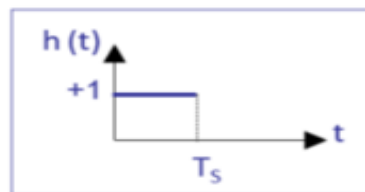
Mapping	
bits	Symboles $a_k$
0	-V
1	+V



Mapping	
bits	Symboles $a_k$
00	-3V
01	-V
11	+V
10	+3V

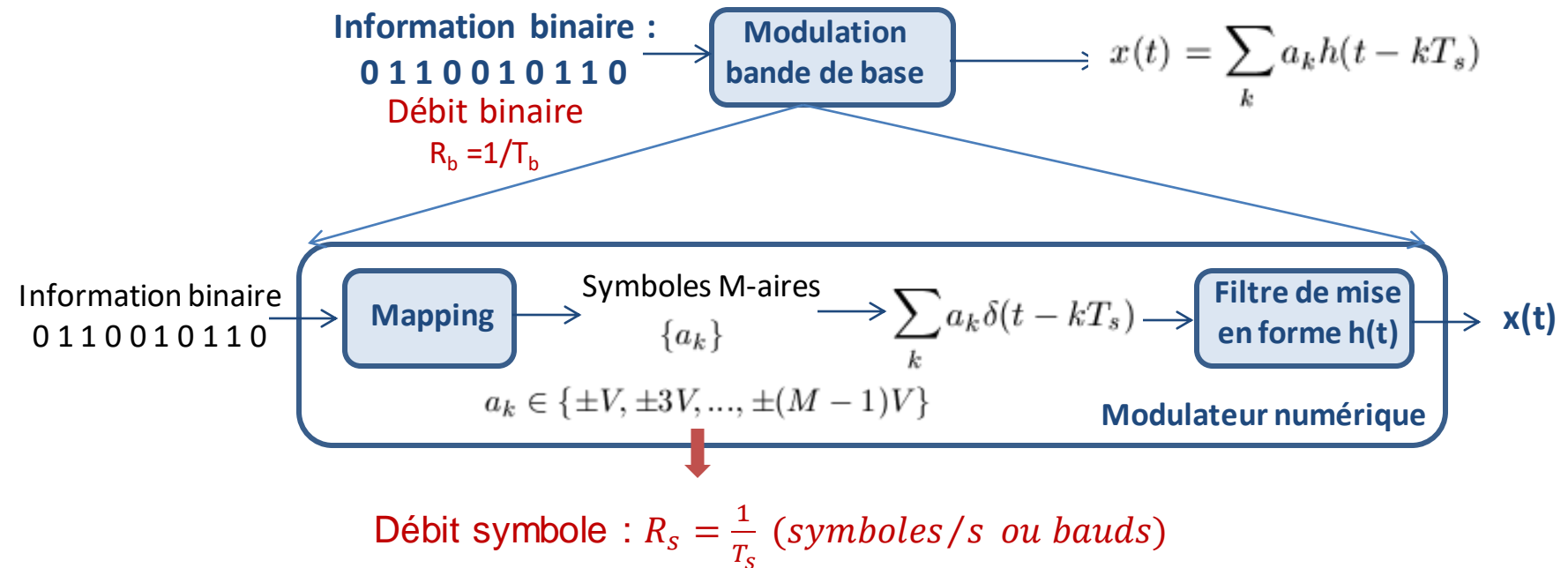


Mapping	
bits	Symboles $a_k$
00	-3V
01	-V
11	+V
10	+3V



# Modulation numérique en bande de base

## Modélisation générale



# Modulation numérique en bande de base

## Modélisation générale

Information binaire :

0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Débit binaire

$$R_b = 1/T_b$$

Modulation  
bande de base

$$x(t) = \sum_k a_k h(t - kT_s)$$

Information binaire  
0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Mapping

Symboles M-aires

$\{a_k\}$

$$\sum_k a_k \delta(t - kT_s)$$

Filtre de mise  
en forme  $h(t)$

$x(t)$

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

Modulateur numérique

Débit symbole :  $R_s = \frac{1}{T_s}$  (symboles/s ou bauds)

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2(M)}$$

$M = 2^n$ : ordre de la modulation  
= nombre de symboles possibles



**Modulation PAM (Pulse Amplitude Modulation) d'ordre M (M-PAM)**



# Modulation numérique en bande de base

## Modélisation générale

Information binaire :

0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Débit binaire

$$R_b = 1/T_b$$

Modulation  
bande de base

$$x(t) = \sum_k a_k h(t - kT_s)$$

Information binaire

0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Mapping

Symboles M-aires

$\{a_k\}$

$$\sum_k a_k \delta(t - kT_s)$$

Filtre de mise  
en forme  $h(t)$

$x(t)$

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

Modulateur numérique

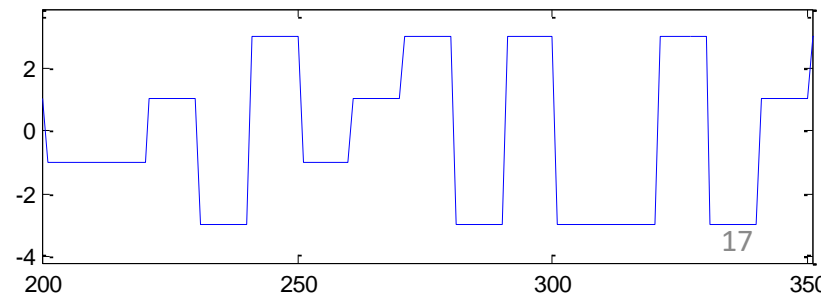
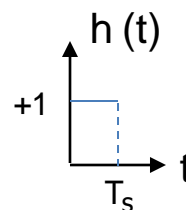
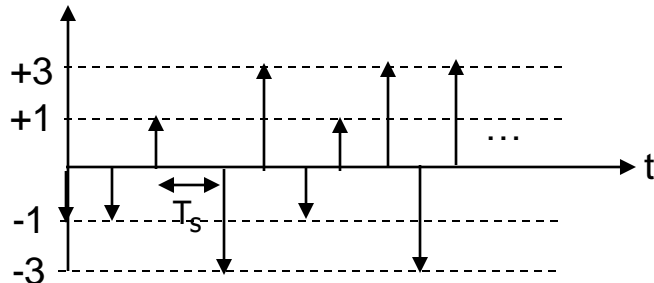
Débit symbole :  $R_s = \frac{1}{T_s}$  (symboles/s ou bauds)

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2(M)}$$

$M = 2^n$ : ordre de la modulation  
= nombre de symboles possibles

Exemple (NRZ,  $M=4$  = NRZ 4-aire):

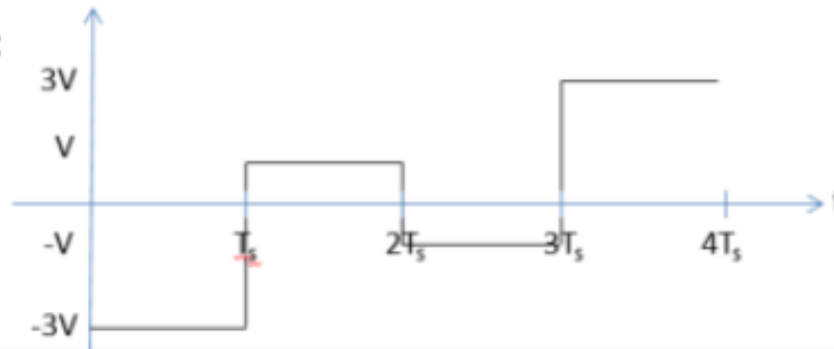
$$\sum_k a_k \delta(t - kT_s)$$



## QUESTION 6

Suite de bits à transmettre : 00100111

Signal généré :



Avec ce signal généré pour la suite de bits à transmettre donnée, le débit symbole sera :

- ① Égal au débit binaire
- ② Plus grand que le débit binaire
- ③ Plus petit que le débit binaire
- ④ Pas assez d'éléments pour répondre à la question posée

# QUESTION 7

En considérant qu'il est possible de transmettre un débit symbole  $R_s=6000$  symboles/s, on pourra transmettre un débit binaire de 12 kbits/s avec une modulation d'ordre :

① 2

② 4

③ 8

# Télécommunications

## Transmissions en bande de base

---

### 1) Modulation numérique en bande de Base et notion d'efficacité spectrale

- 1) Définition du modulateur bande de base
- 2) DSP du signal modulé => bande nécessaire à la transmission
- 3) Efficacité spectrale de la transmission

### 2) Interférences entre symboles et critère de Nyquist

- 1) Problème de l'interférence entre symboles,
- 2) Critère de Nyquist dans le domaine temporel,
- 3) Diagramme de l'œil,
- 4) Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel,
- 5) Impact du canal de propagation

### 3) Impact du bruit dans la chaîne de transmission et notion d'efficacité en puissance

- 1) Filtrage adapté,
  - 2) Règle de décision,
  - 3) Taux d'erreur symbole et taux d'erreur binaire,
  - 4) Efficacité en puissance de la transmission.
-

# Modulation numérique en bande de base

## Densité spectrale de puissance (DSP) du signal transmis

---

Information binaire :

0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Débit binaire

$$R_b = 1/T_b$$

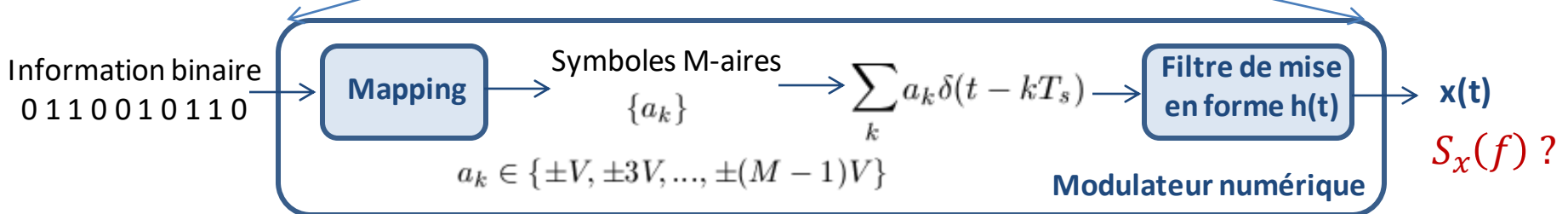
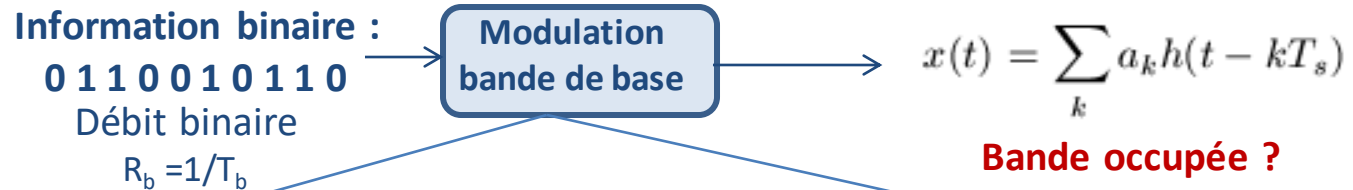
Modulation  
bande de base

$$x(t) = \sum_k a_k h(t - kT_s)$$

**Bande occupée ?**

# Modulation numérique en bande de base

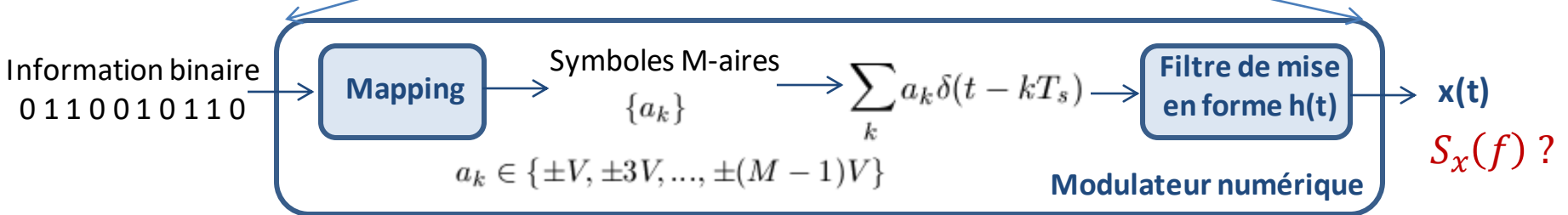
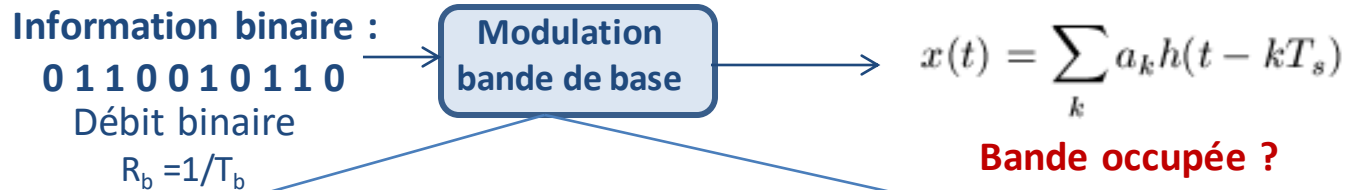
## Densité spectrale de puissance (DSP) du signal transmis



**Modulation PAM (Pulse Amplitude Modulation) d'ordre M (M-PAM)**

# Modulation numérique en bande de base

## Densité spectrale de puissance (DSP) du signal transmis



**Modulation PAM (Pulse Amplitude Modulation) d'ordre M (M-PAM)**

$$S_x(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_s} |H(f)|^2 + 2 \frac{\sigma_a^2}{T_s} |H(f)|^2 \sum_{k=1}^{\infty} \Re [R_a(k) e^{j2\pi f k T_s}] + \frac{|m_a|^2}{T_s^2} \sum_k \left| H\left(\frac{k}{T_s}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{k}{T_s}\right)$$

(calcul donné sur moodle)

où :

$$\sigma_a^2 = E[|a_k - m_a|^2] ; \quad m_a = E[a_k] ; \quad R_a(k) = \frac{E[a_m^* a_{m-k}] - |m_a|^2}{\sigma_a^2}$$

$$H(f) = TF[h(t)]$$

= Modulation linéaire en "bande de base" = DSP du signal transmis autour de la fréquence 0

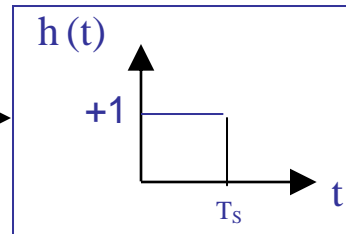
# Modulation numérique en bande de base

## Quelques exemples de DSPs

→ Mise en forme NRZ à 2 niveaux (forme d'onde du GPS)

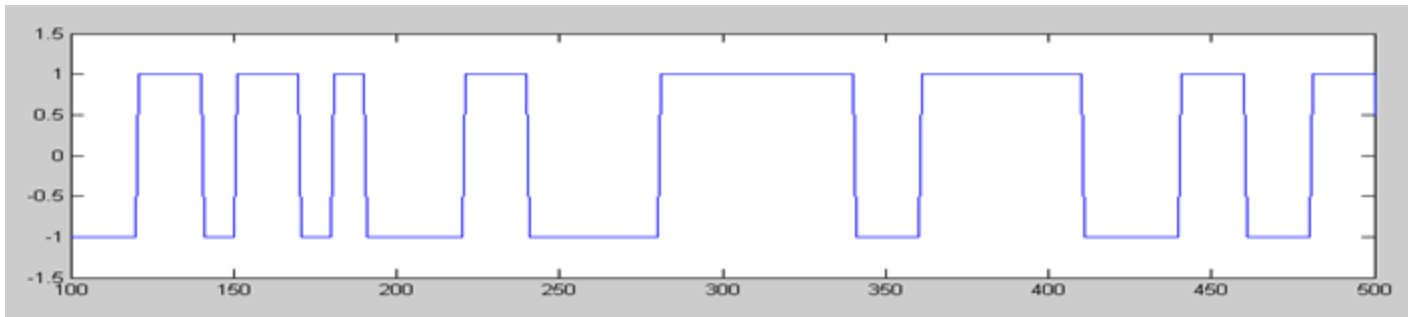
$a_k \in \{\pm 1\}$   
Indépendants et équiprobables

$$\sum_k a_k \delta(t - kT_s)$$

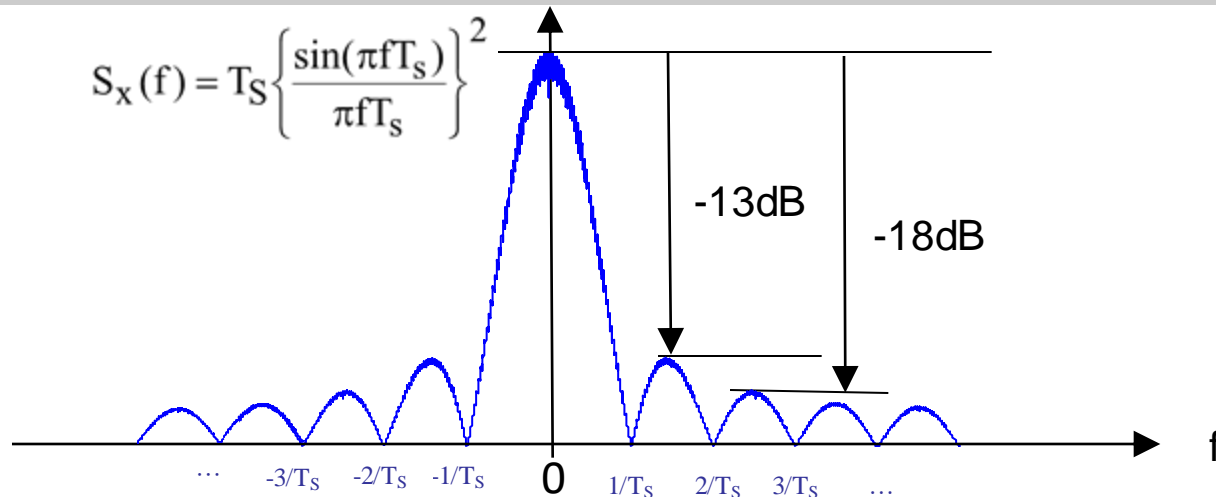


$$x(t) = \sum_k a_k h(t - kT_s)$$

$x(t)$



$$S_x(f) = T_s \left\{ \frac{\sin(\pi f T_s)}{\pi f T_s} \right\}^2$$





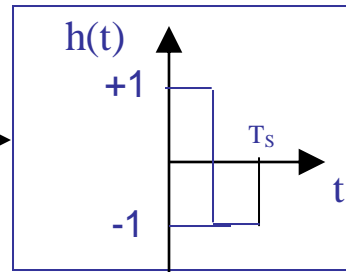
# Modulation numérique en bande de base

## Quelques exemples de DSPs

→ Mise en forme Biphase ou Manchester (forme d'onde Ethernet : IEEE802.3)

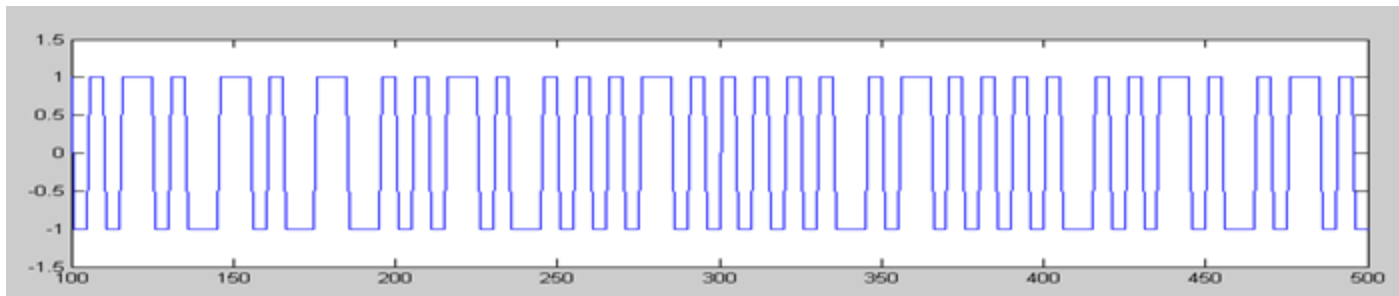
$a_k \in \{\pm 1\}$   
Indépendants et équiprobables

$$\sum_k a_k \delta(t - kT_s)$$

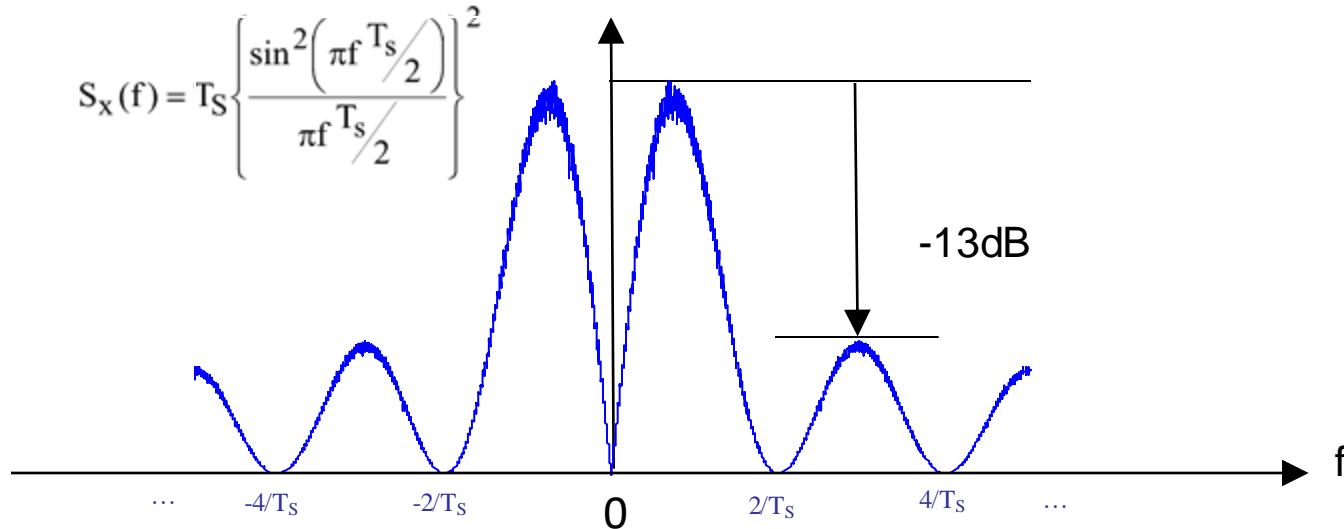


$$x(t) = \sum_k a_k h(t - kT_s)$$

$x(t)$



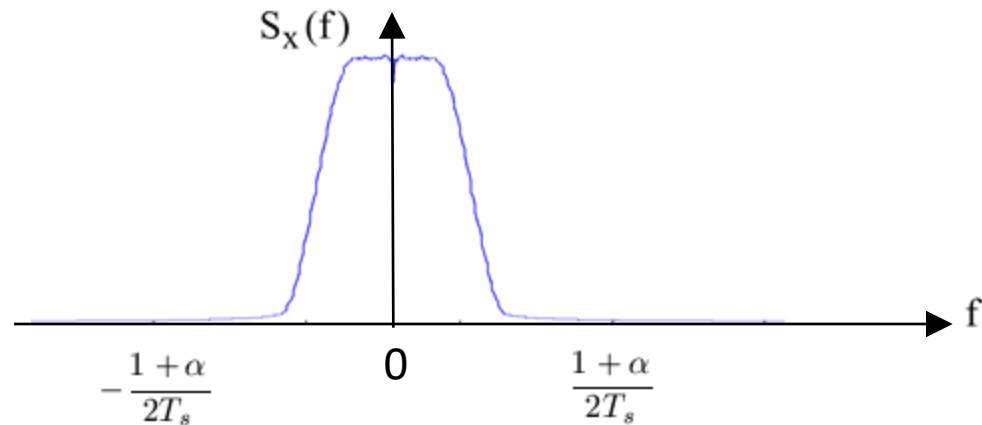
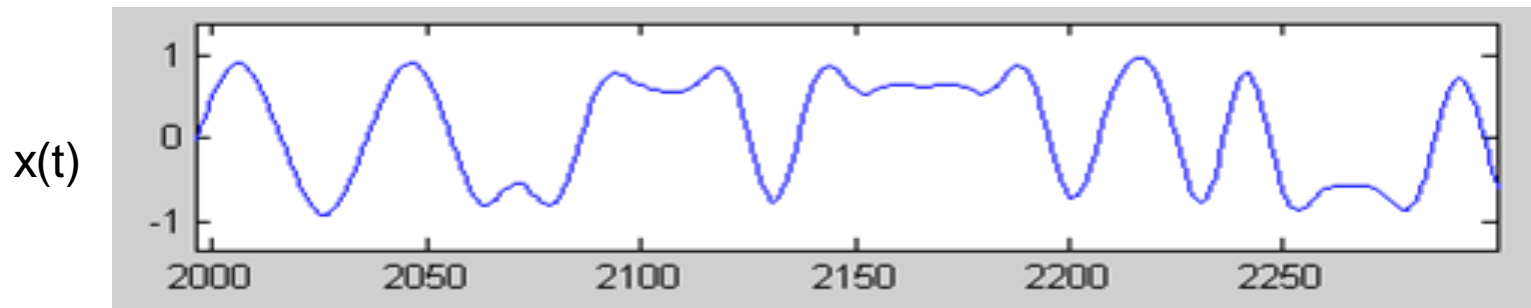
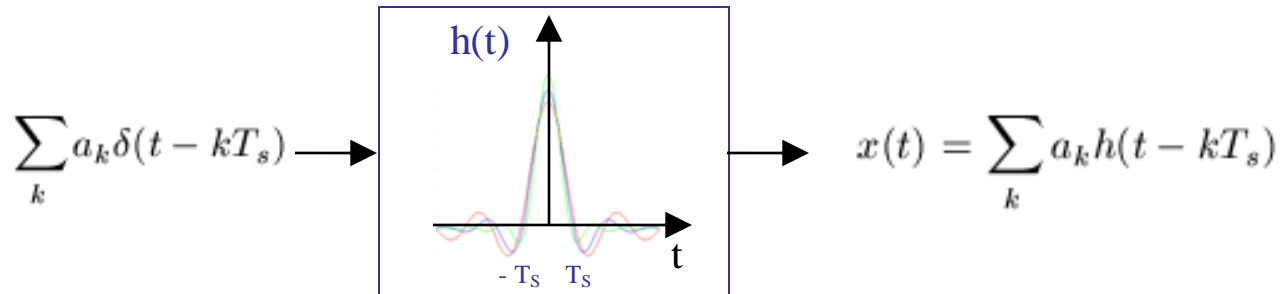
$$S_X(f) = T_S \left\{ \frac{\sin^2\left(\pi f T_S / 2\right)}{\pi f T_S / 2} \right\}^2$$



# Modulation numérique en bande de base

## Quelques exemples de DSPs

→ Mise en forme en racine de cosinus surélevé (forme d'onde du DVB-C et DVB-S)



# Modulation numérique en bande de base

## Bande occupée par le signal transmis

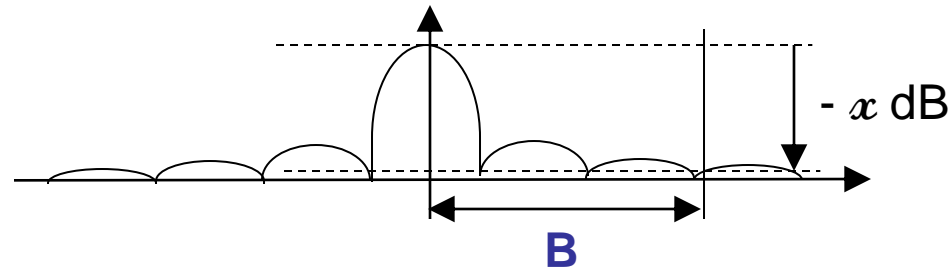
### → Définition 1

Bande de fréquence B concentrant  $x$  % de l'énergie du signal  
(valeurs typiques : 95 à 99 %)

$$\frac{\int_0^B S_x(f) df}{\int_0^\infty S_x(f) df} = \frac{x}{100}$$

### → Définition 2

Bande de fréquence B au delà de laquelle l'atténuation  
minimale est de  $x$  dB (valeurs typiques : 20 à 30 dB)



# Télécommunications

## Transmissions en bande de base

---

### 1) Modulation numérique en bande de Base et notion d'efficacité spectrale

- 1) Définition du modulateur bande de base
- 2) DSP du signal modulé => bande nécessaire à la transmission
- 3) Efficacité spectrale de la transmission

### 2) Interférences entre symboles et critère de Nyquist

- 1) Problème de l'interférence entre symboles,
- 2) Critère de Nyquist dans le domaine temporel,
- 3) Diagramme de l'œil,
- 4) Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel,
- 5) Impact du canal de propagation

### 3) Impact du bruit dans la chaîne de transmission et notion d'efficacité en puissance

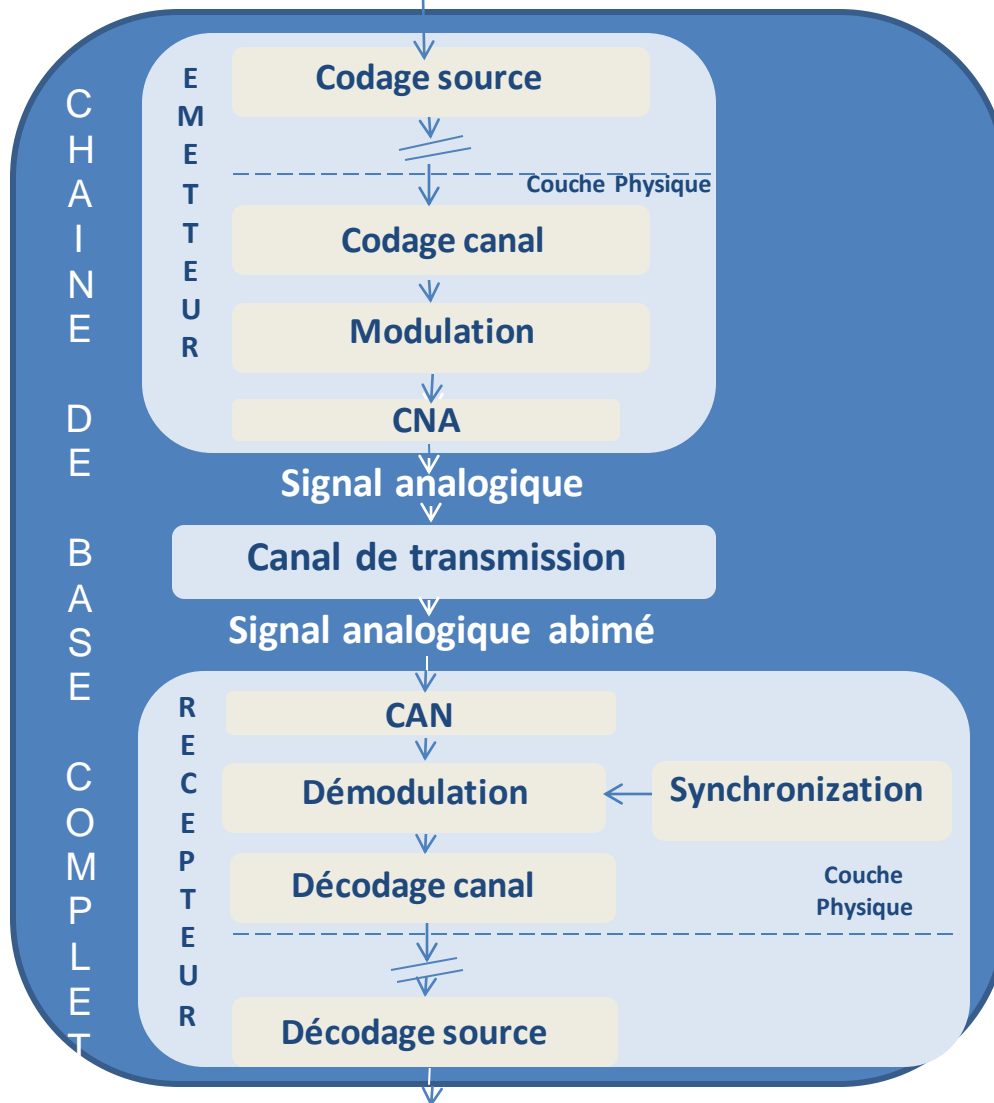
- 1) Filtrage adapté,
  - 2) Règle de décision,
  - 3) Taux d'erreur symbole et taux d'erreur binaire,
  - 4) Efficacité en puissance de la transmission.
-

# Modulation numérique en bande de base

## Efficacité spectrale de la transmission

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ...

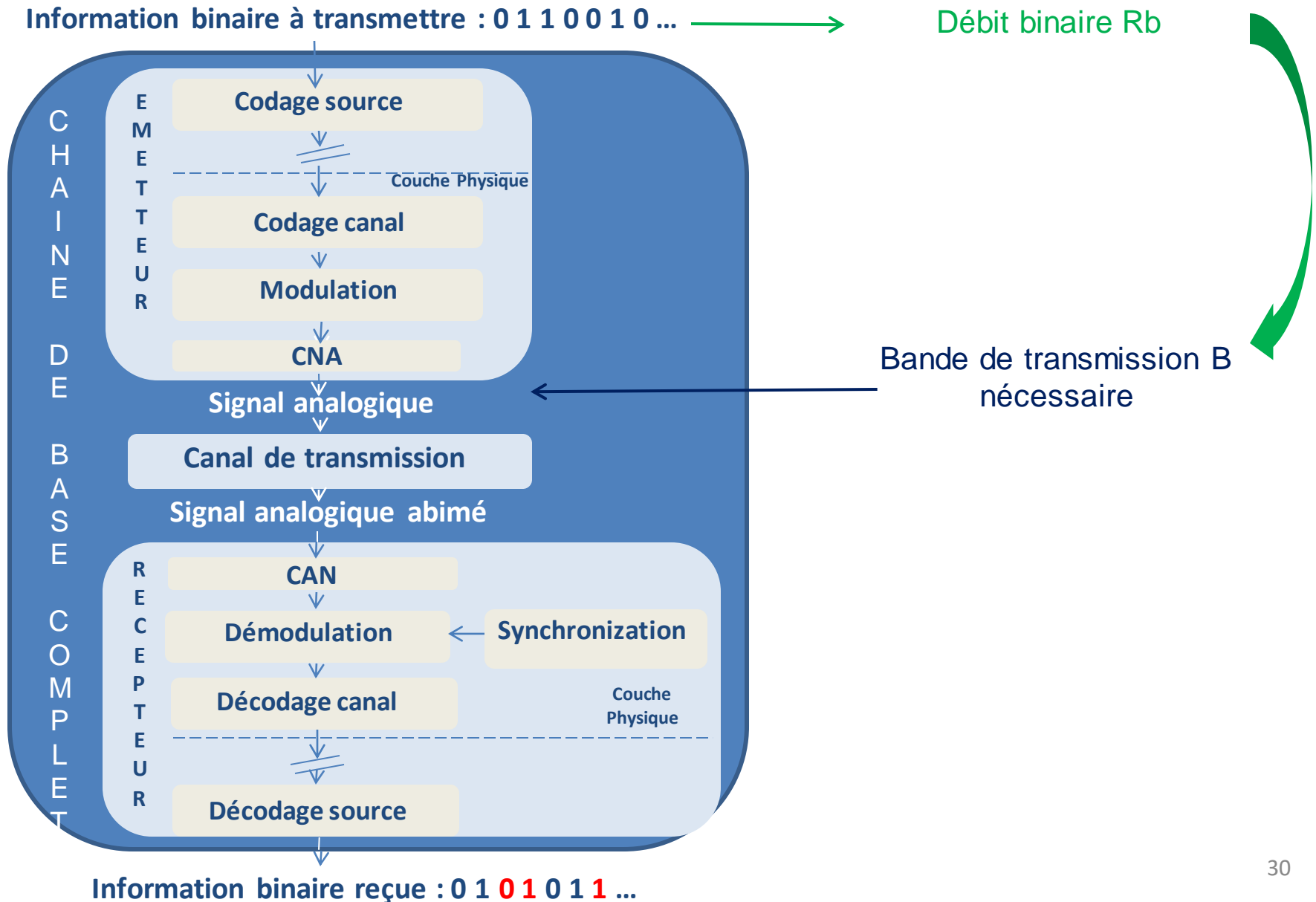
Débit binaire  $R_b$



Information binaire reçue : 0 1 0 1 0 1 1 ...

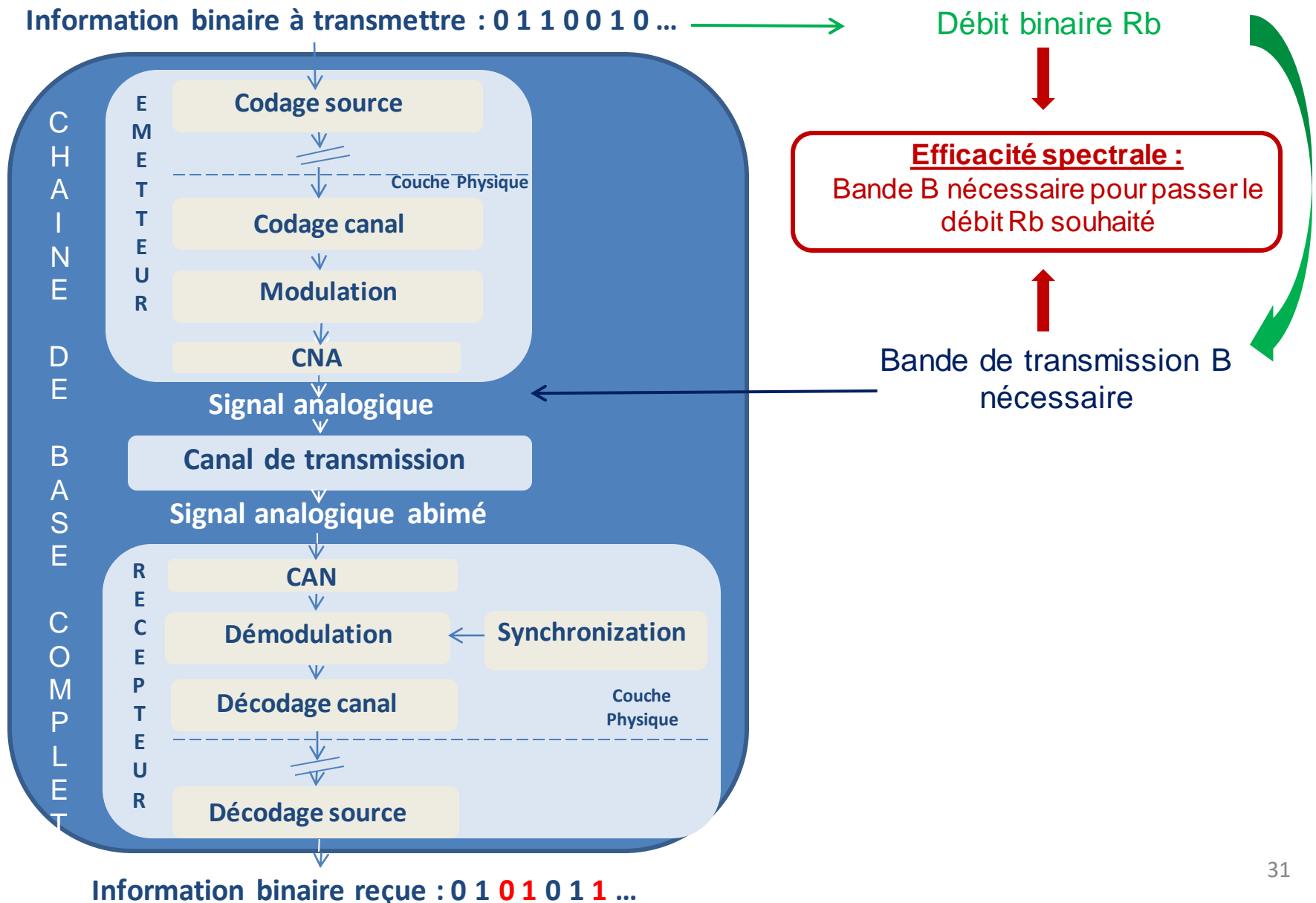
# Modulation numérique en bande de base

## Efficacité spectrale de la transmission



# Modulation numérique en bande de base

## Efficacité spectrale de la transmission



# Modulation numérique en bande de base

## Efficacité spectrale de la transmission

---

→ Efficacité spectrale (en bits/s/Hz) :

$$B = kR_s$$

*(Quel que soit le filter de mise en forme utilisé)*

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2(M)}$$

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

*(Symboles M-aires)*



$$\eta = \frac{R_b}{B} = \frac{\log_2(M)}{k} \quad (\text{bits/s/Hz})$$



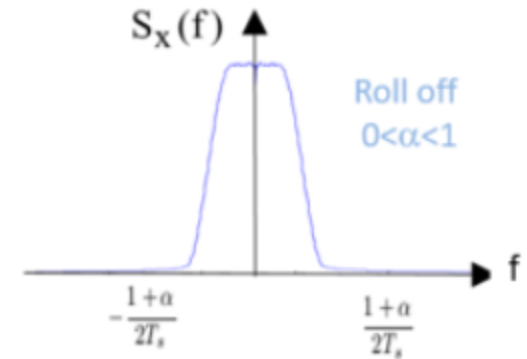
# QUESTION 8

Un signal modulé en « bande de base » est un signal :

- ① Généré par un modulateur basique : symboles binaires et filtre de mise en forme rectangulaire,
- ② Dont la densité spectrale de puissance est centrée autour de la fréquence 0,
- ③ Avec une bande occupée étroite.

## QUESTION 9

Soit une suite de bits 0,1 à transmettre et un mapping qui associe  $-V$  aux 0 et  $+V$  aux 1. La figure donne la densité spectrale de puissance du signal généré en utilisant un filtre de mise en forme en racine de cosinus surélevé. L'efficacité spectrale obtenue sera :

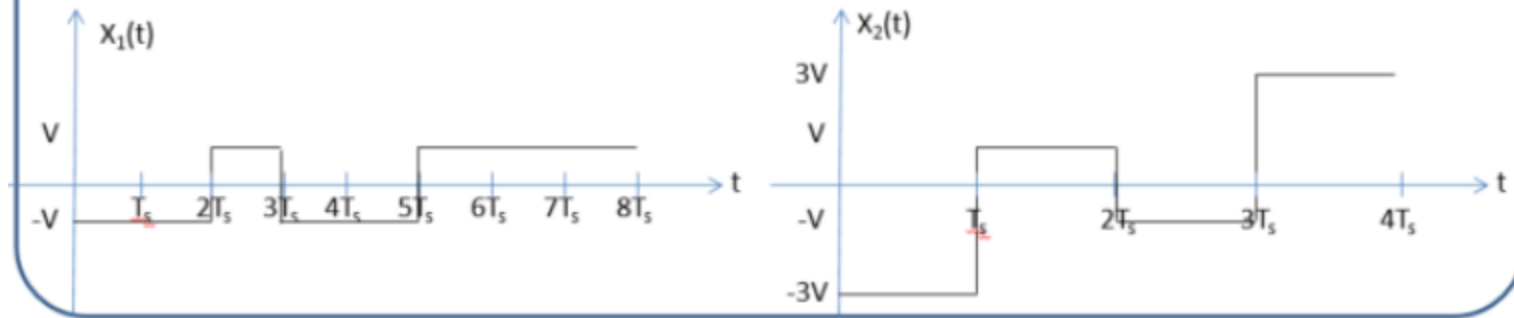


- 1 Plus grande qu'en utilisant un filtre de mise en forme rectangulaire
- 2 Plus petite qu'en utilisant un filtre de mise en forme rectangulaire
- 3 Identique à celle obtenue en utilisant un filtre de mise en forme rectangulaire
- 4 Pas assez d'éléments pour répondre à la question

## QUESTION 10

Suite de bits à transmettre : 00100111

Signaux générés :



L'efficacité spectrale de la transmission sera :

- ① meilleure si je transmets le signal  $x_1(t)$
- ② meilleure si je transmets le signal  $x_2(t)$
- ③ Identique pour la transmission des deux signaux
- ④ Pas assez d'éléments pour répondre à la question