

# **Introduction aux télécommunications**

**Département sciences du numérique  
Première année**

## **Séquence 1**

- 1- Introduction,**
- 2- Construction d'un modulateur numérique en bande de base,**
- 3- Notion d'efficacité spectrale.**

# **Introduction aux télécommunications**

**Département sciences du numérique  
Première année**

## **Séquence 1**

- 1- Introduction,**
- 2- Construction d'un modulateur numérique en bande de base,**
- 3- Notion d'efficacité spectrale.**

# Quelques définitions

---

## Communication

Action de mettre en relation, en liaison, en contact, des choses.» (Dictionnaire Larousse)

## Télécommunication

« Télé »: à distance

« Télécommunications » : Transmission, émission ou réception d'informations par fil, radioélectricité, optique, ou d'autres systèmes électromagnétiques." (Dictionnaire Larousse)

## Communications analogiques/numériques

- Communications analogiques : Information à transmettre définie à tout instant (temps continu) par des valeurs réelles
- Communications numériques : Information à transmettre définie à des instants discrets par un nombre fini de valeurs (quantification)
- Communications analogiques et numériques : le signal transmis est analogique.

## Objectifs de la « couche physique » d'un système de communication numérique

La « couche physique » d'un système de télécommunication a pour rôle de transformer l'information binaire à transmettre en un signal capable de traverser le support physique, ou canal de propagation, reliant l'émetteur et le récepteur. Elle est également chargée de retrouver l'information binaire à partir du signal reçu.

Transmettre « vite » => notion de **débit binaire**  
et « bien » => notion de **taux d'erreur binaire** } **Prix à payer ?**  
sous certaines contraintes <= **canal de propagation.**

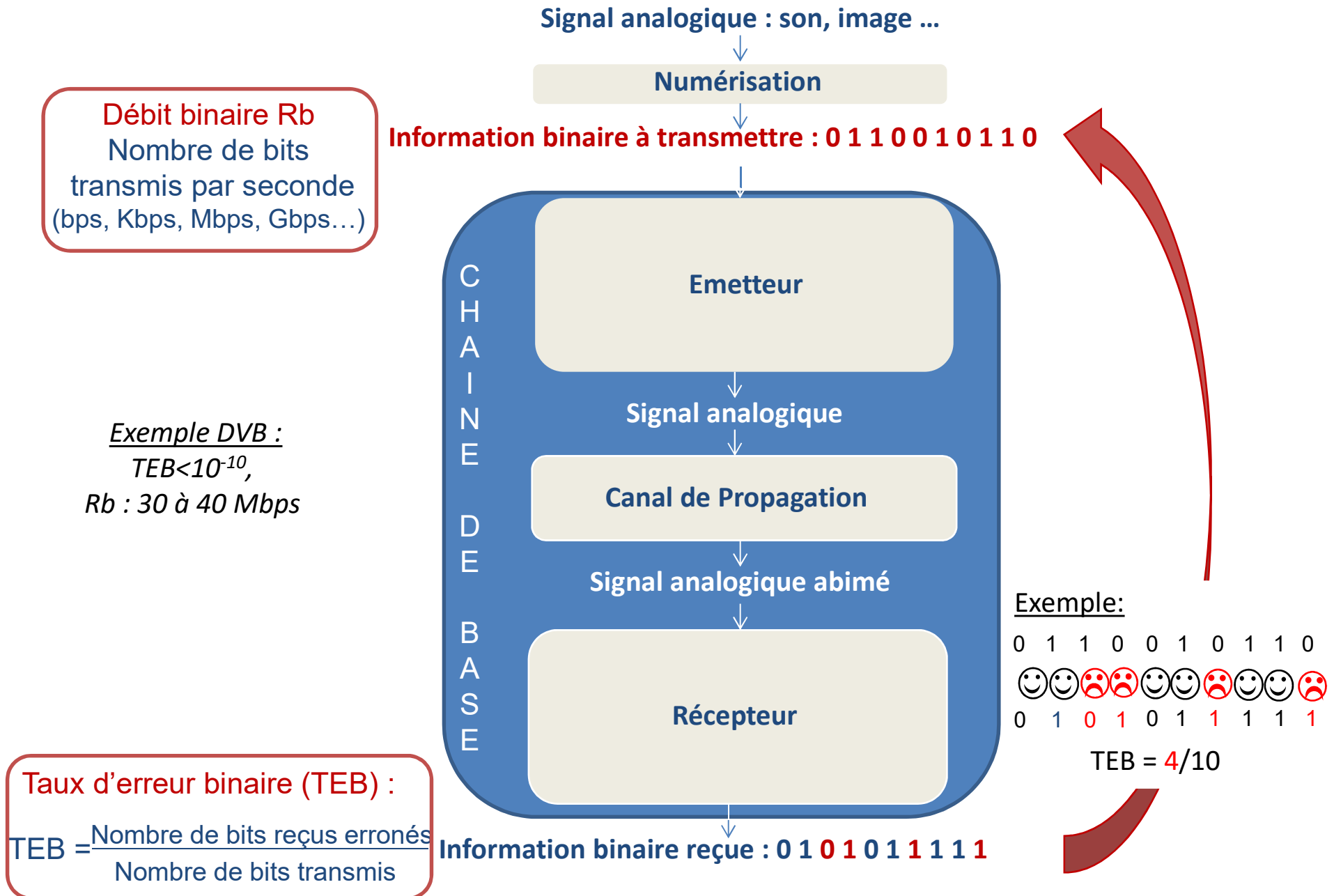
**Débits et taux d'erreur binaires souhaités fonction de l'application considérée.**

---

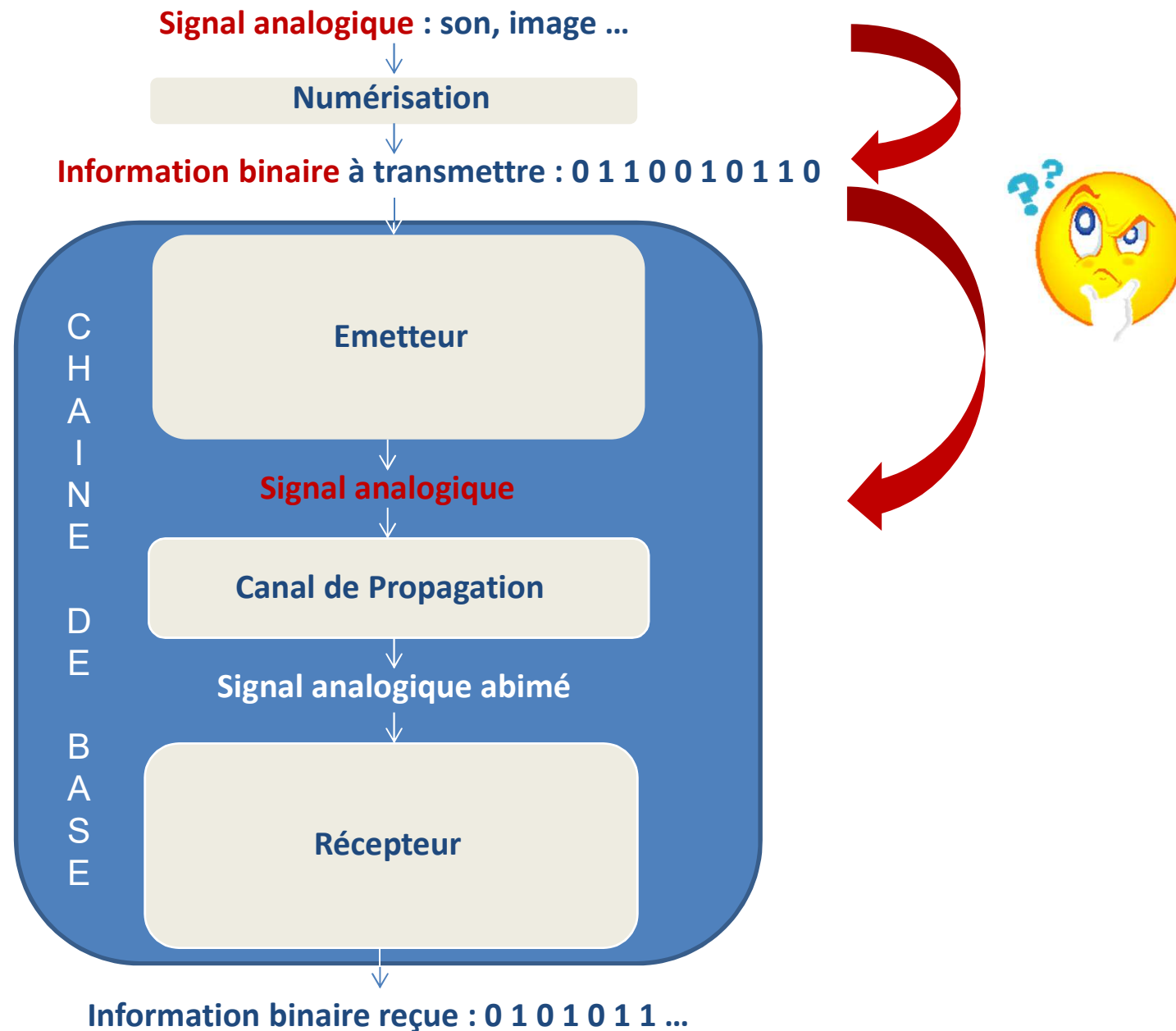
**Qu'entend-on par communication « numérique » ?  
Quels en sont les avantages et inconvénients ?**

---

# Chaîne de communication **numérique**



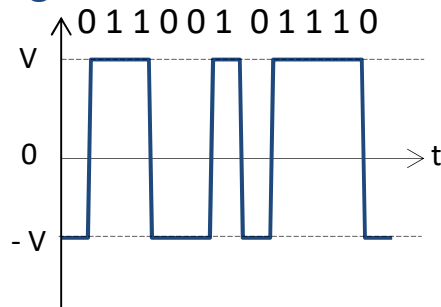
# Digital transmission channel : avantages et inconvénients



# Digital transmission channel : avantages et inconvénients

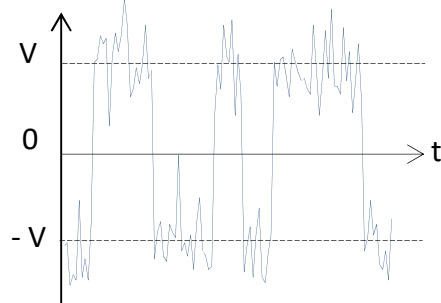
## Exemple :

Signal transmis :

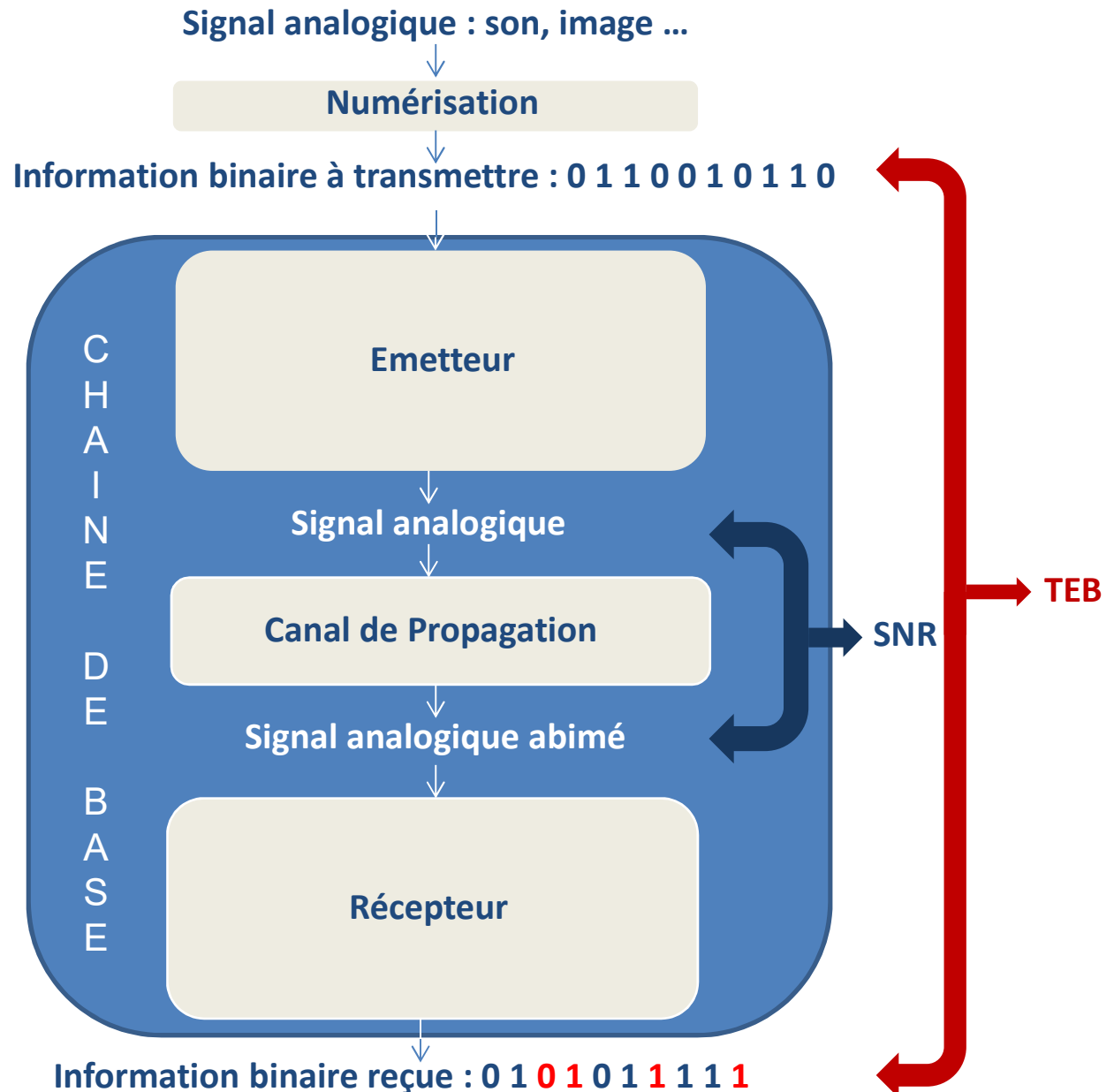
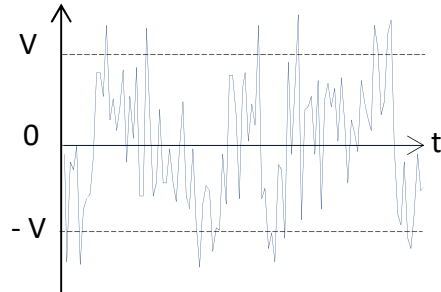


Signal reçu :

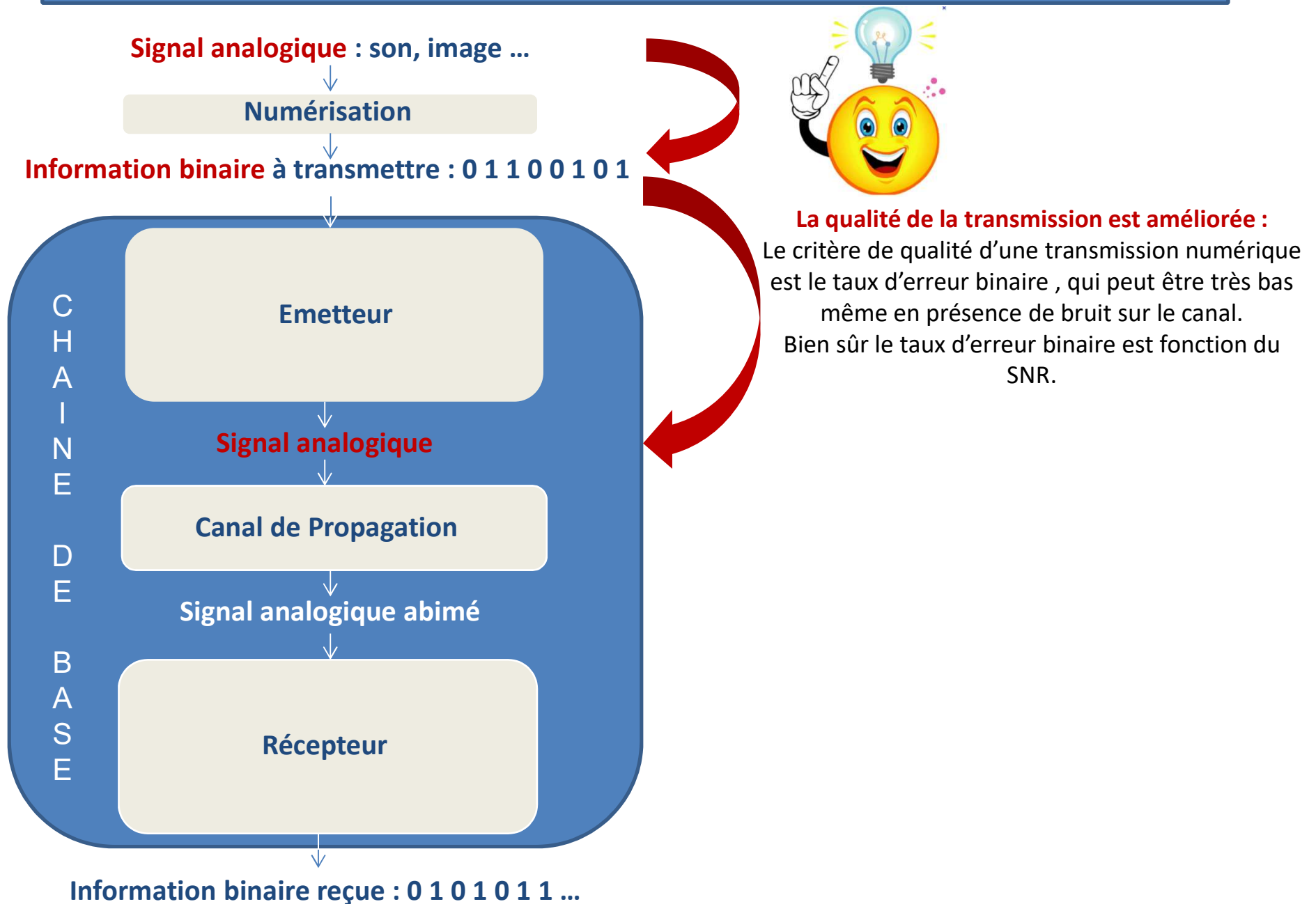
SNR = 10 dB :



SNR = 0 dB :

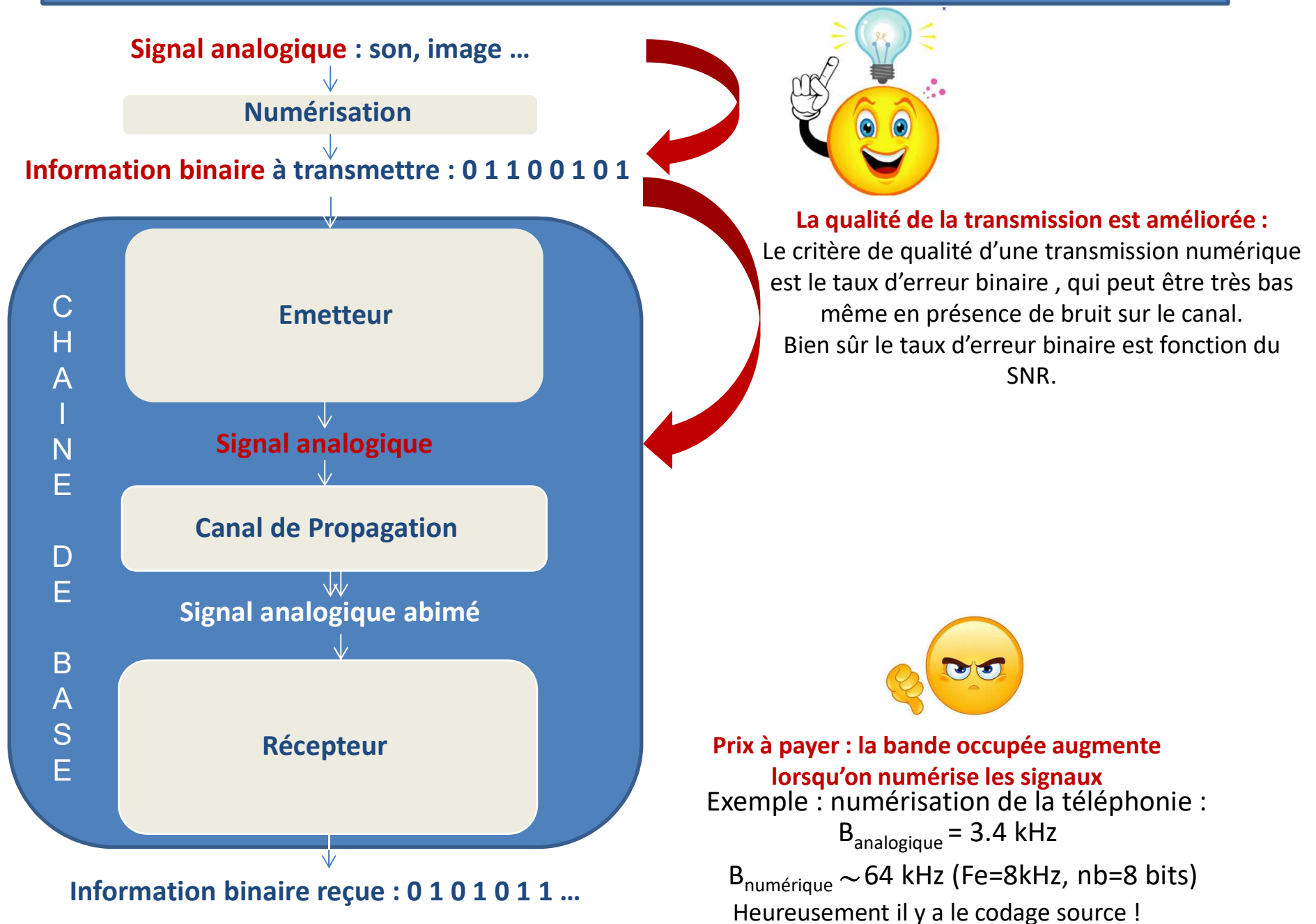


# Digital transmission channel : avantages et inconvénients

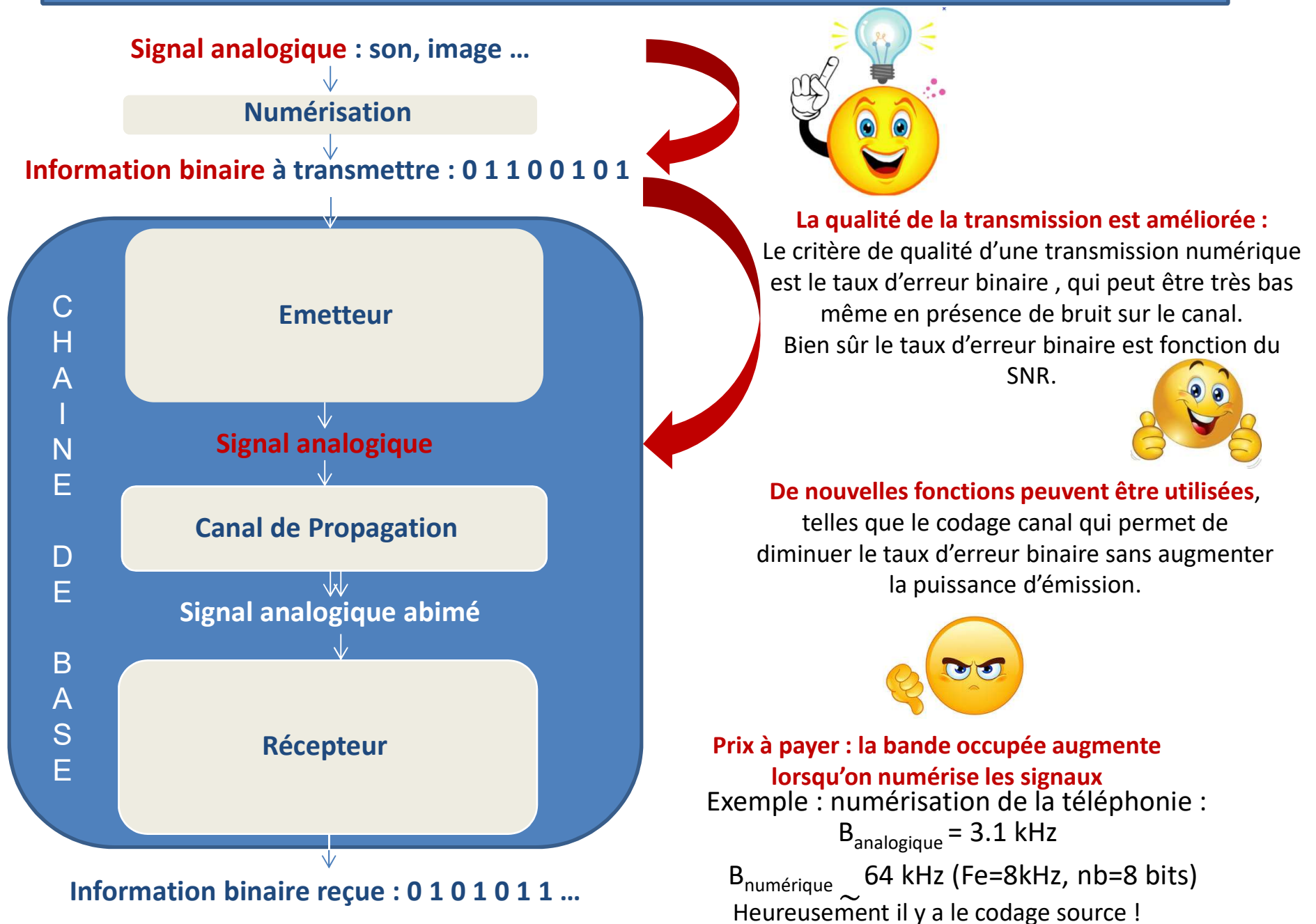




# Digital transmission channel : avantages et inconvénients



# Digital transmission channel : avantages et inconvénients



---

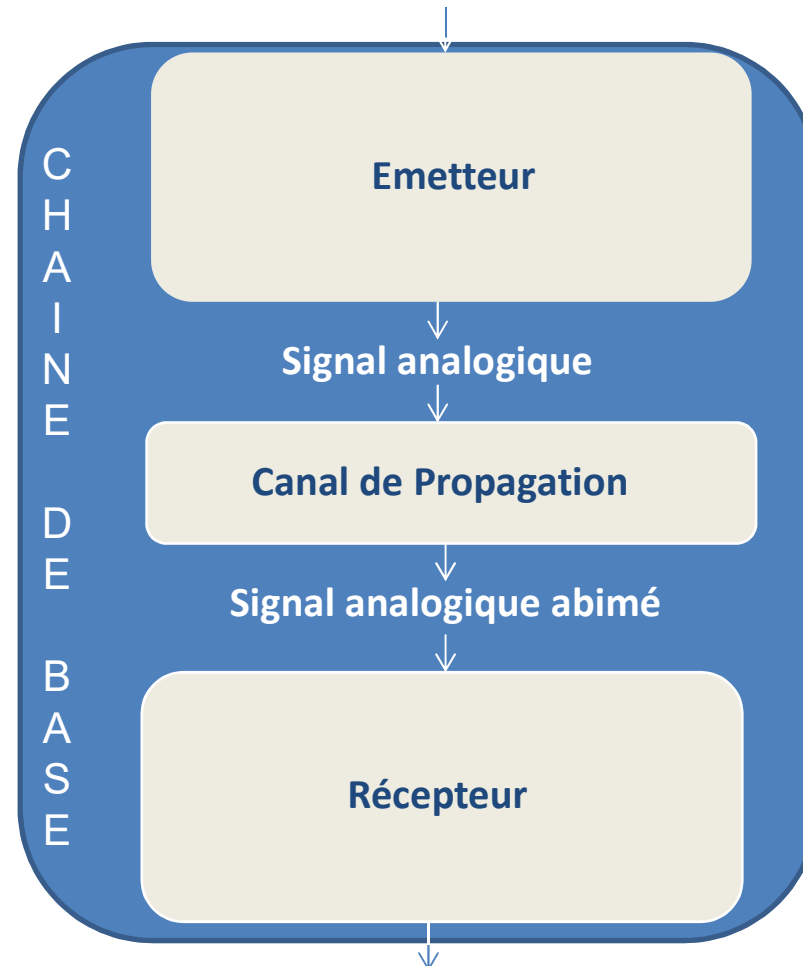
## **Éléments de la chaine de transmission**

---

# Chaîne de communication numérique

---

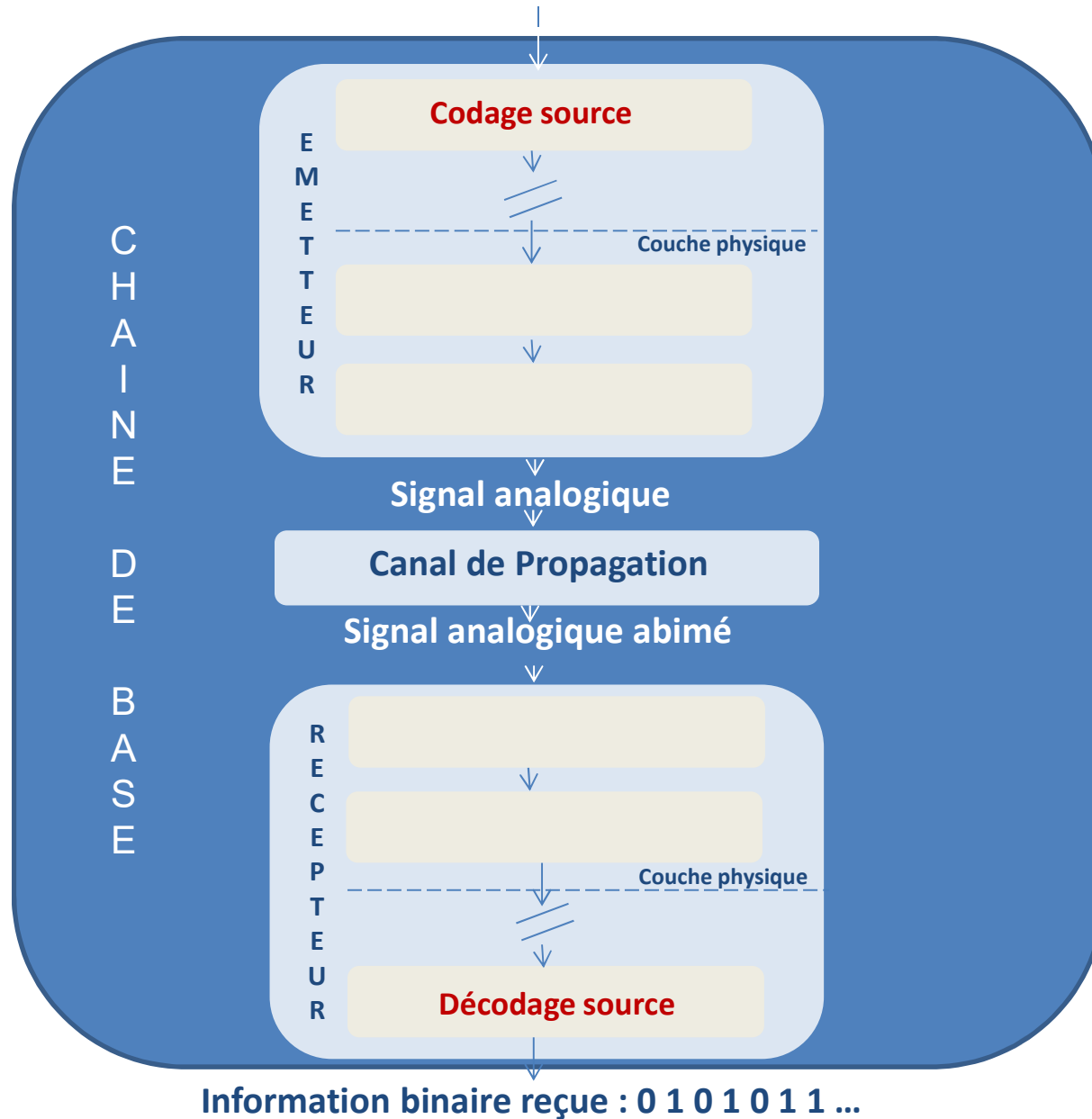
Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0



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

# Chaine de communication numérique : **codage source**

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



## Exemple de codage source

---

Message à transmettre : AABACADBAA

Avec les probabilités d'apparition suivantes :

Lettre :	A	B	C	D
Probabilité:	0.6	0.2	0.1	0.1

Codage binaire naturel :

4 caractères différents = > 2 bits par caractère ( $2^2=4$ )

Lettre :	A	B	C	D
Code :	00	01	11	10

20 bits pour transmettre le message : 00001000110001100000

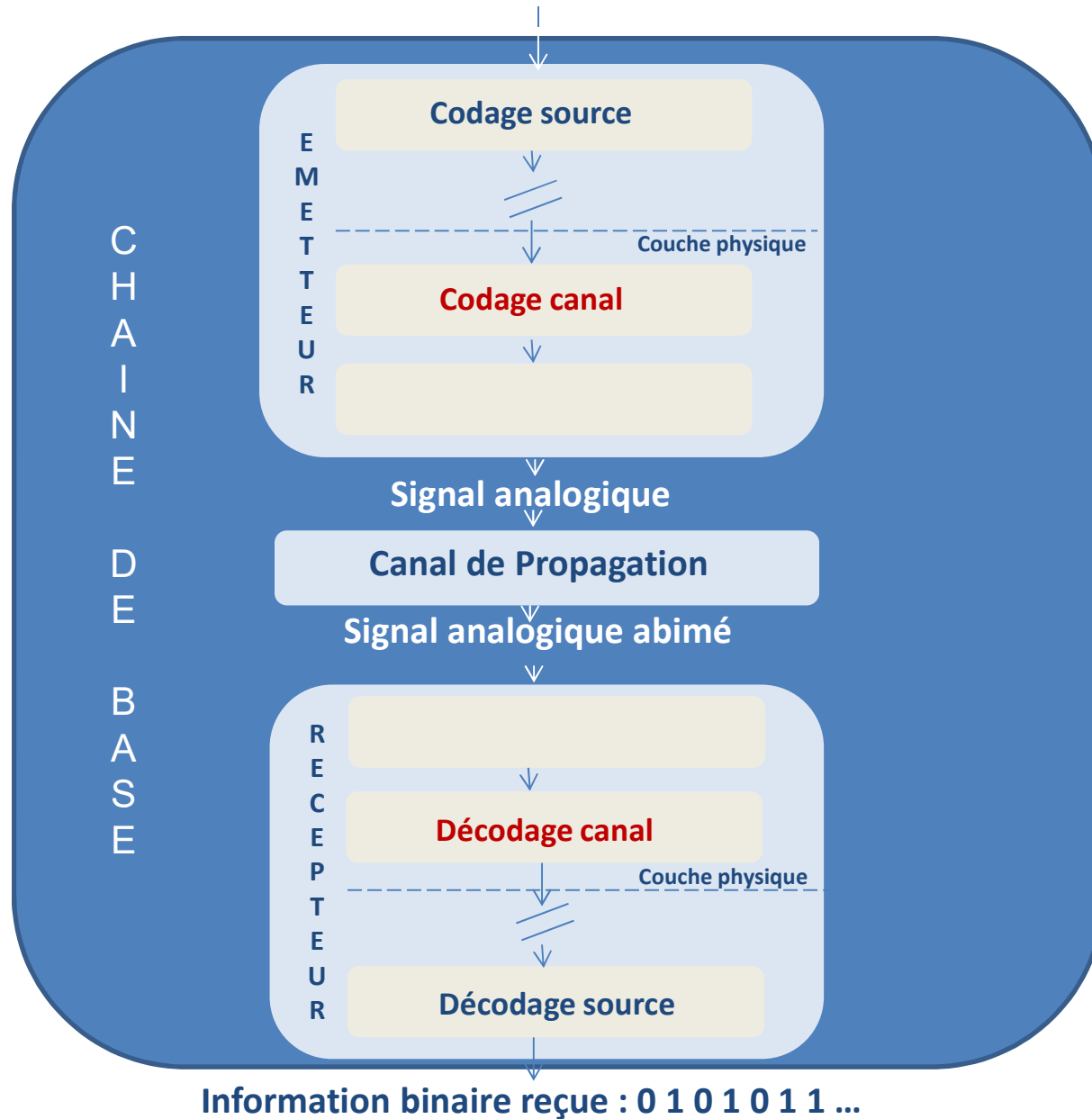
Code plus intelligent (base du code de Huffman présent dans le format jpeg):

Lettre :	A	B	C	D
Code :	0	10	110	111

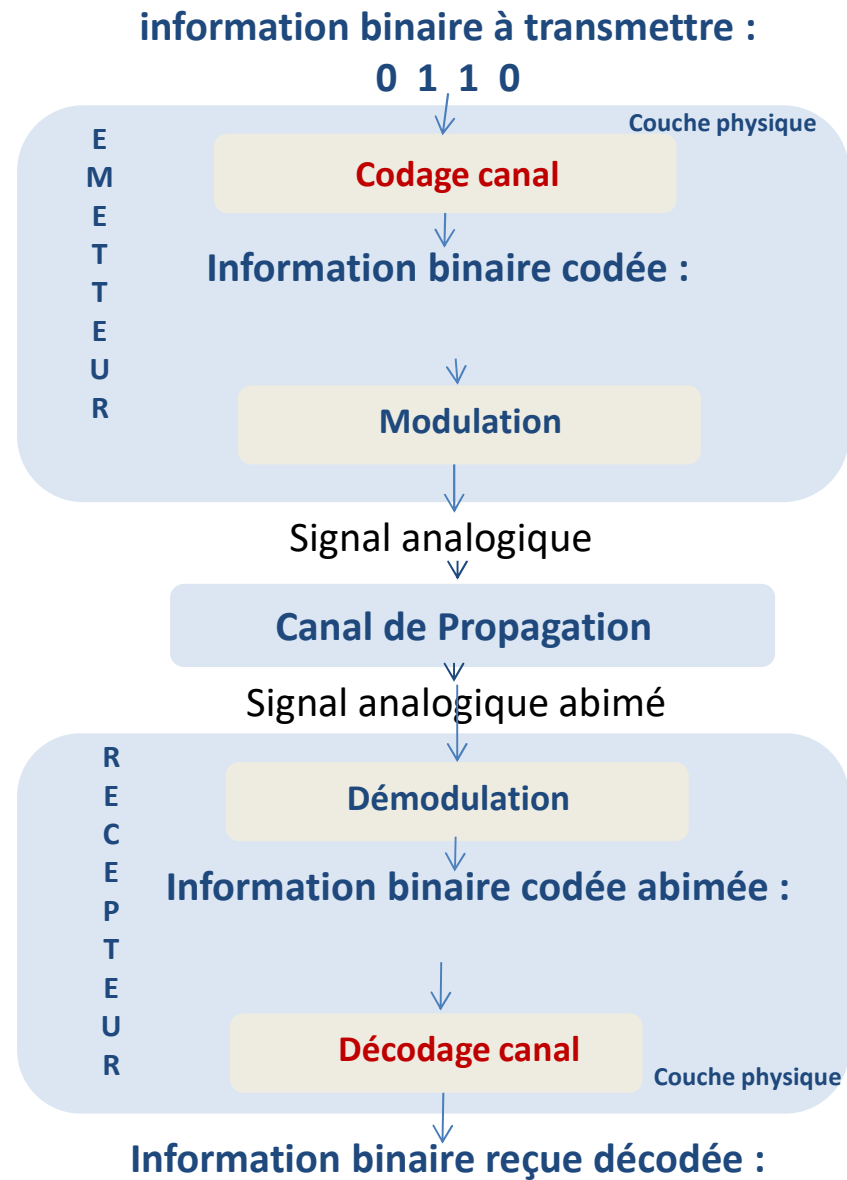
16 bits pour transmettre le message : 0010011001111000

# Chaîne de communication numérique : **codage canal**

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

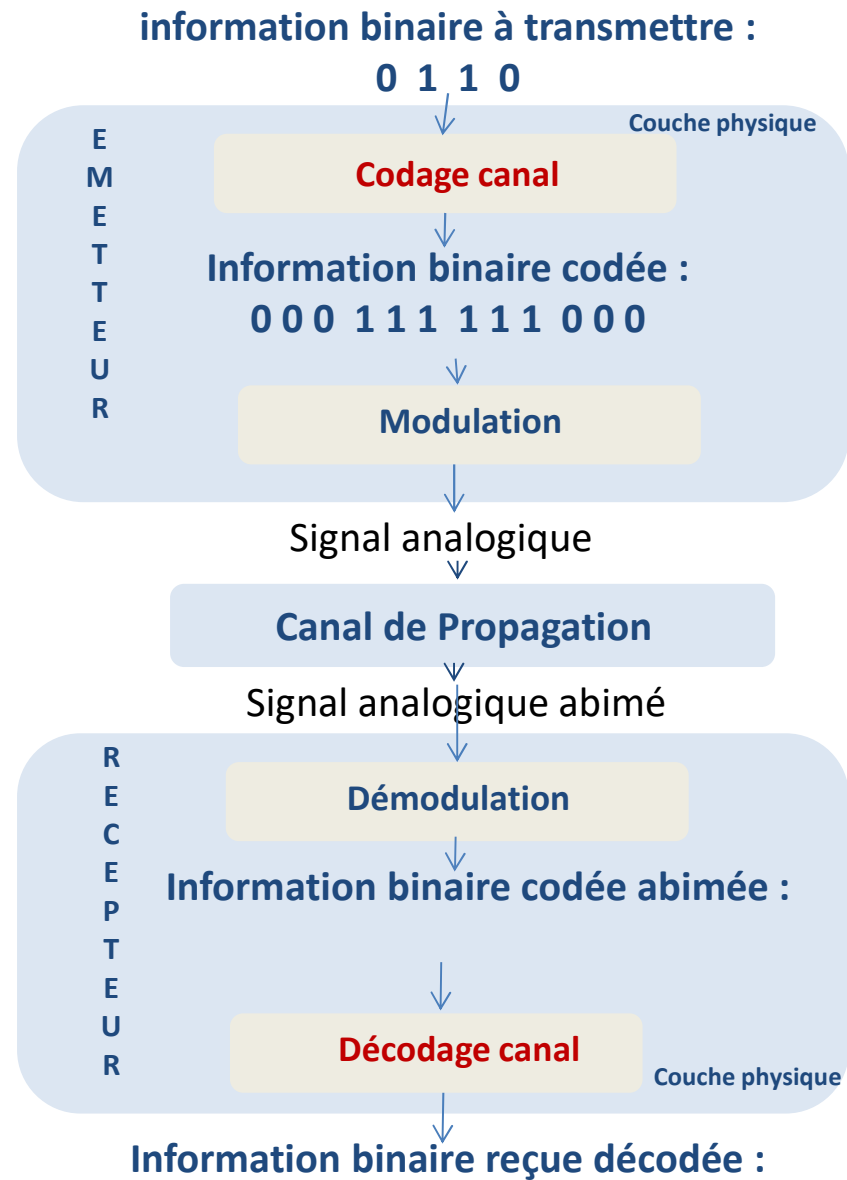


# Exemple de codage canal

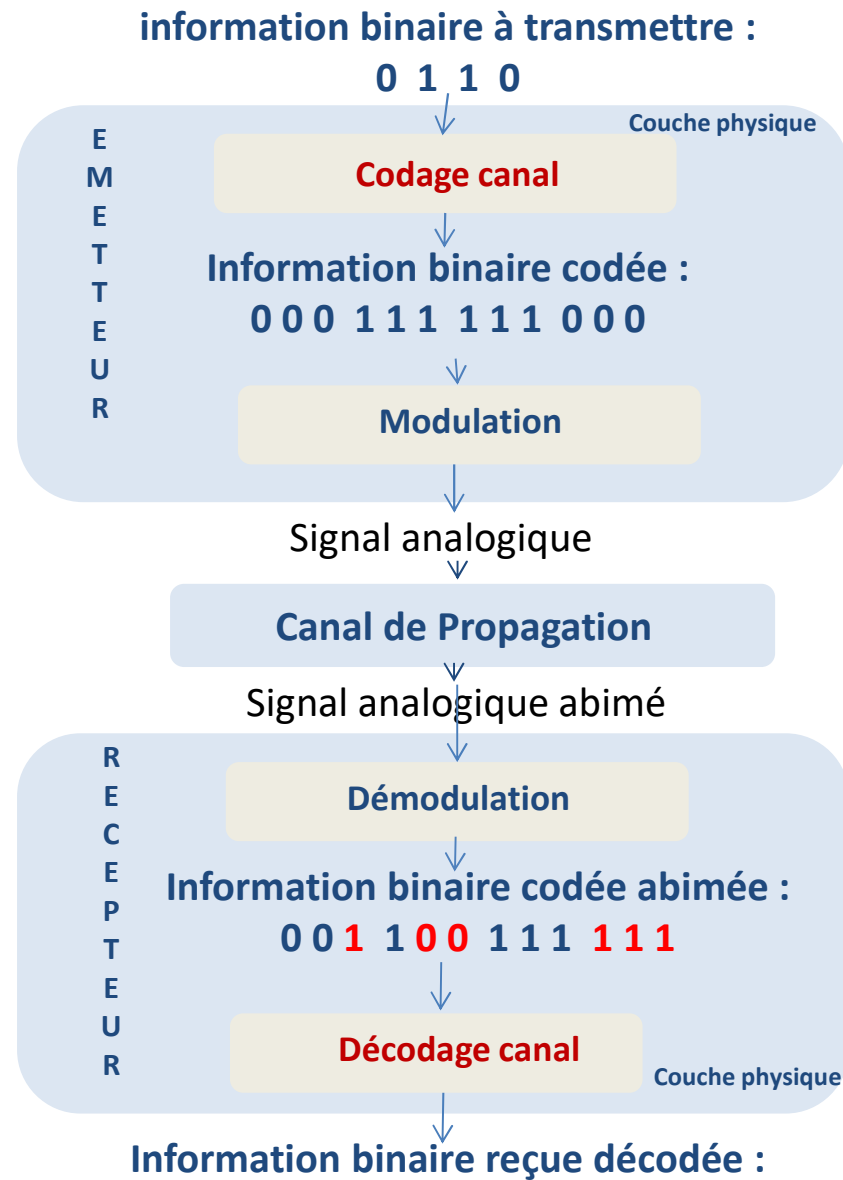




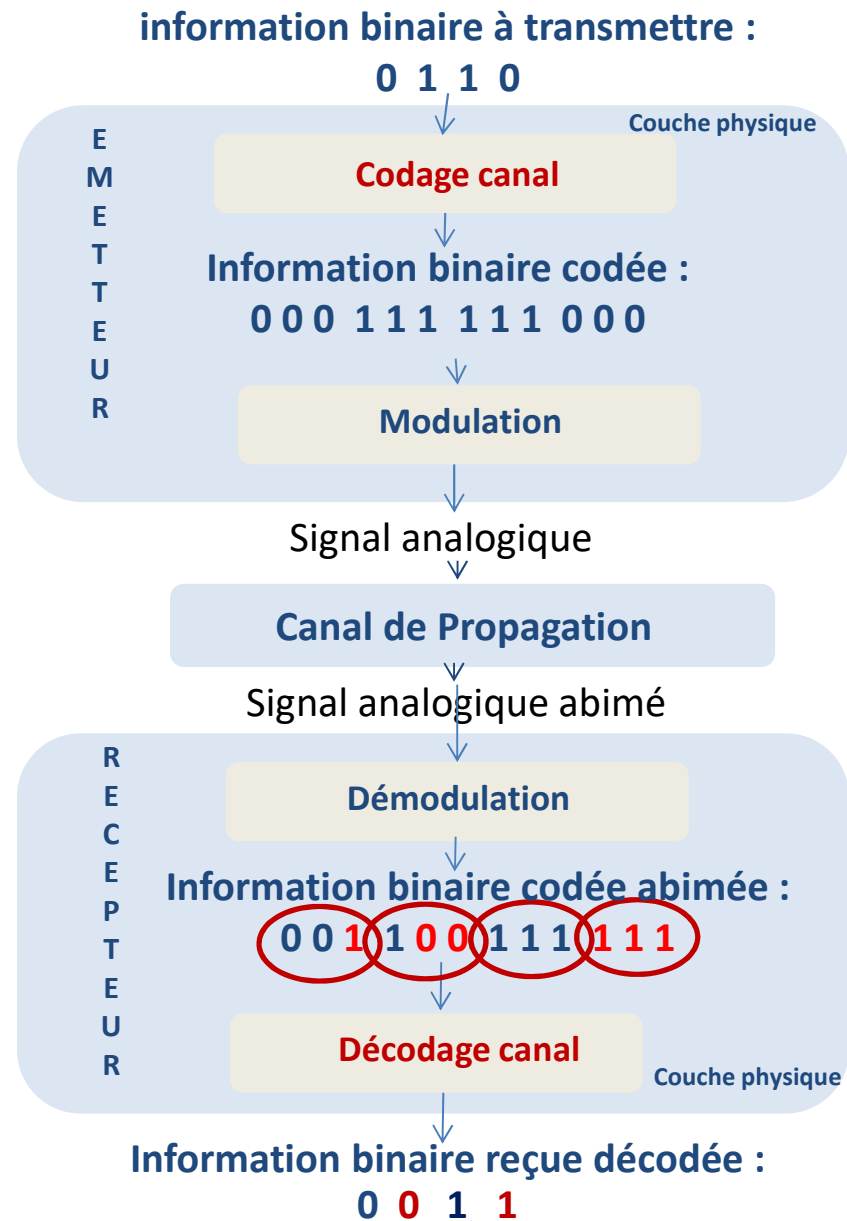
# Exemple de codage canal



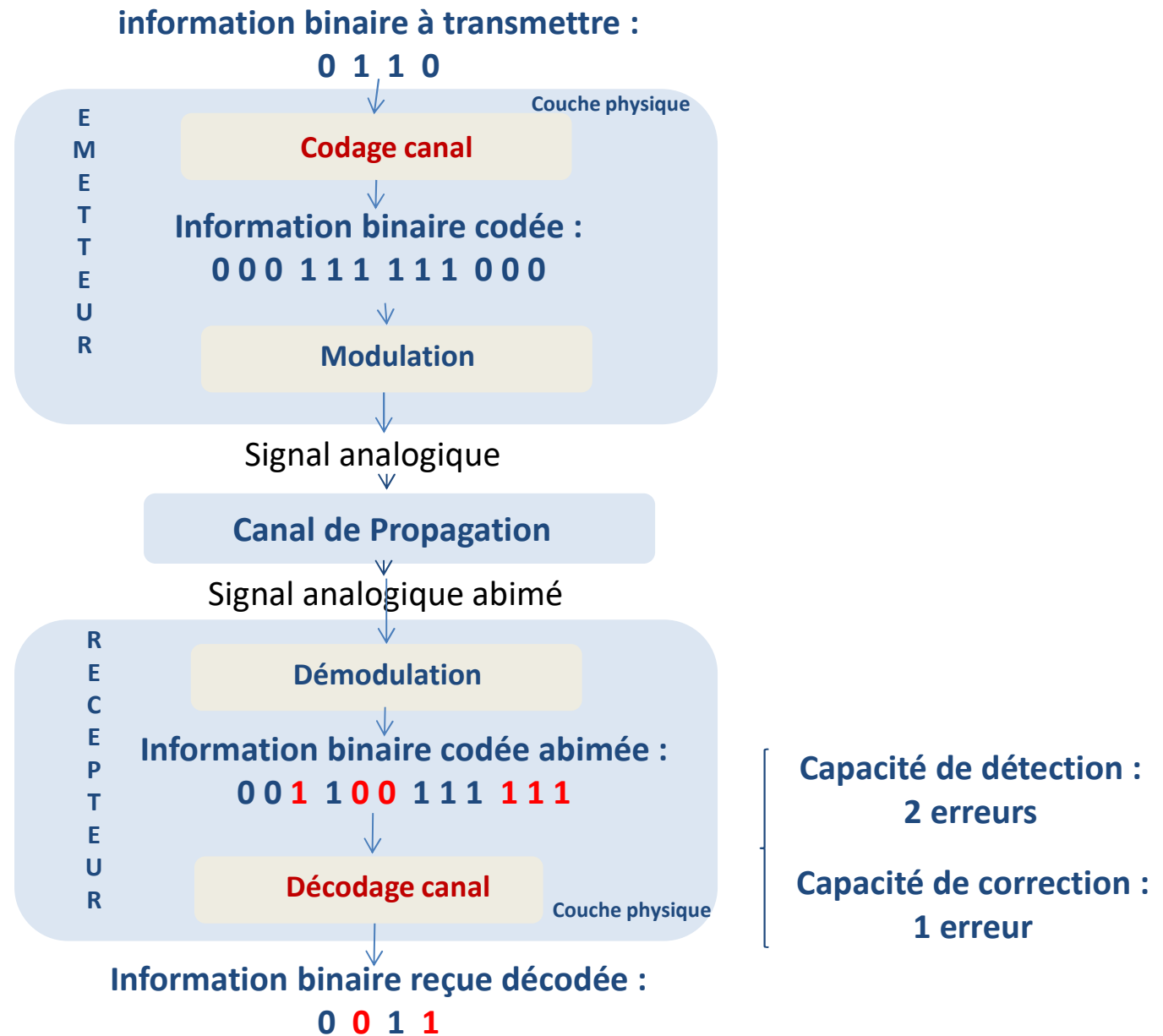
# Exemple de codage canal



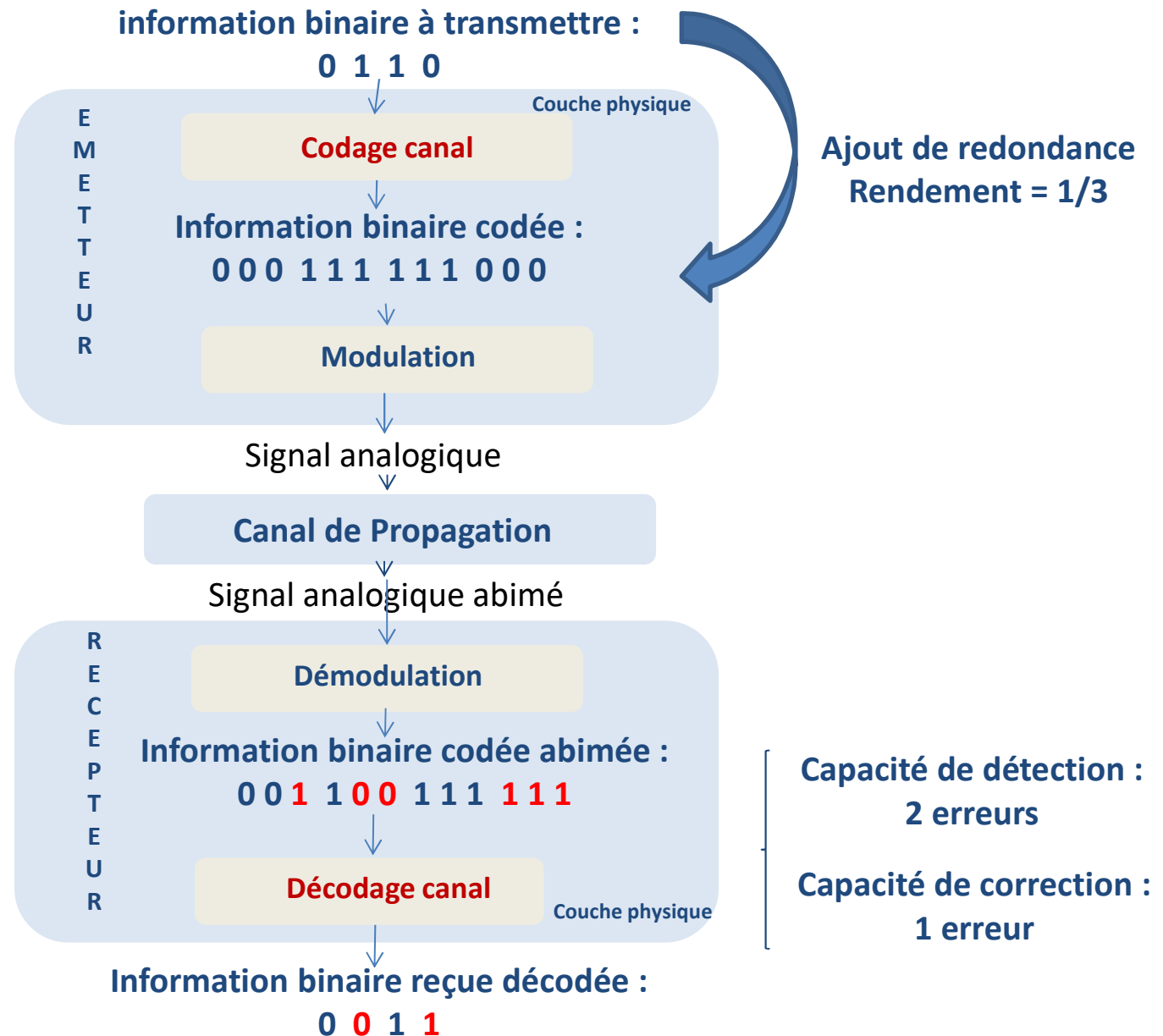
# Exemple de codage canal



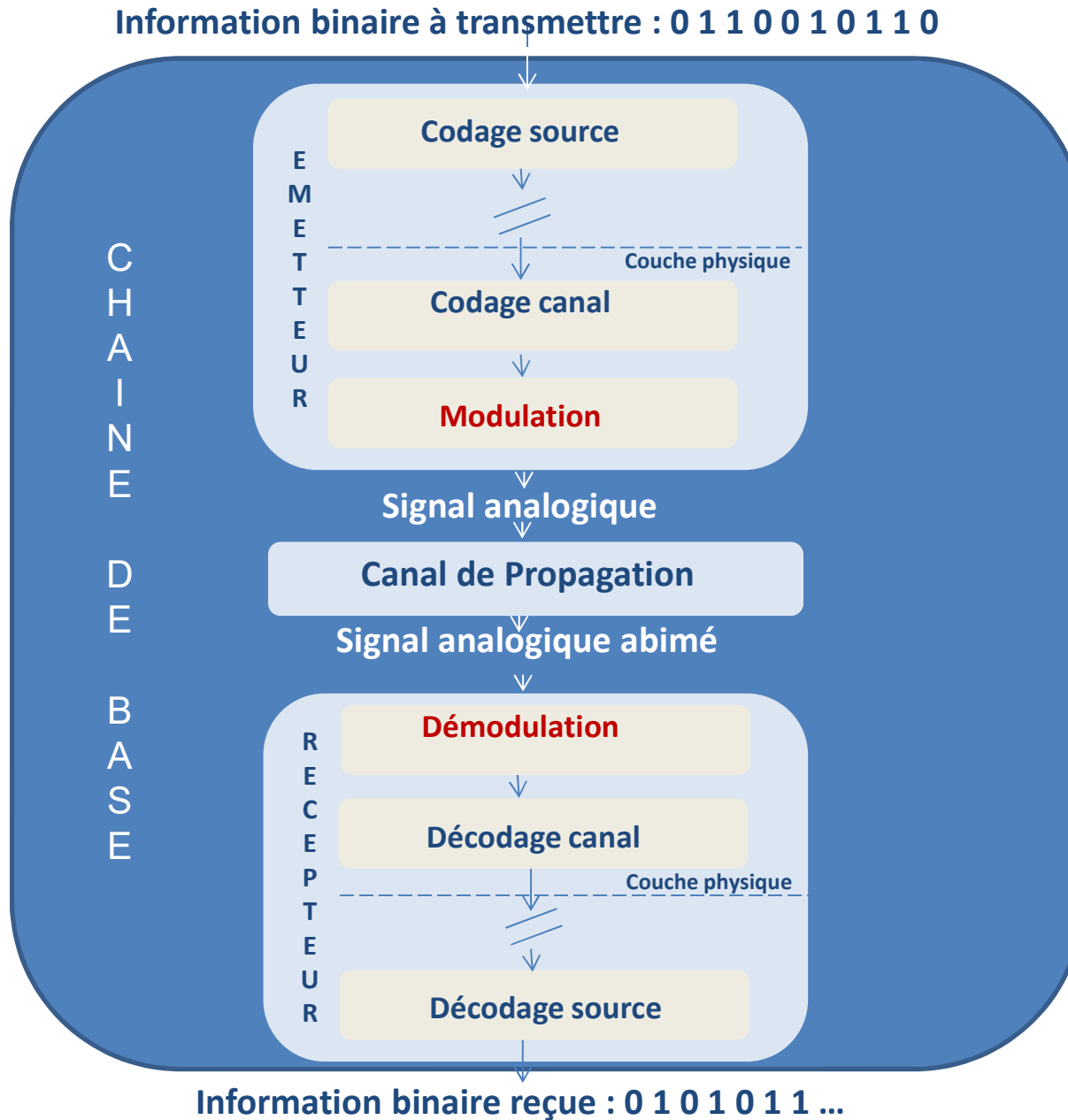
# Exemple de codage canal



# Exemple de codage canal



# Chaine de communication numérique : **modulation**



# Chaine de communication numérique : Modulation bande de base ou sur porteuse



**Signal bande de base :**  
Spectre autour de 0

**Signal sur porteuse :**  
Spectre autour de la fréquence porteuse  $f_p$

**Transposition de fréquence**

## Exemple de Modulation bande de base

Information binaire à transmettre :

0 1 1 0

Codage canal

Information binaire codée :

0 0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0

Modulation

Signal numérique

CNA

Signal analogique

E  
M  
E  
T  
T  
E  
U  
R

Information binaire reçue :

0 0 1 1 TEB=2/4

Décodage canal

Information binaire codée abimée :

0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1

Démodulation

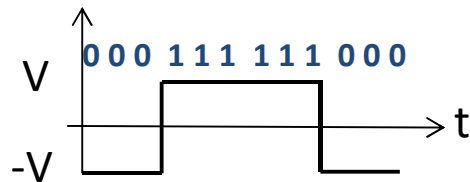
Signal numérique abimé

CAN

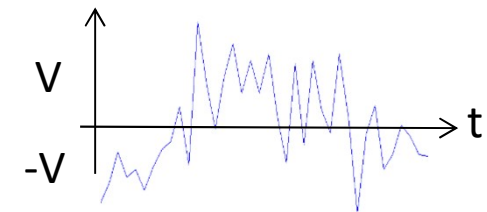
Signal analogique abimé

R  
E  
C  
E  
P  
T  
E  
U  
R

Exemple : signal NRZ



Canal de Propagation

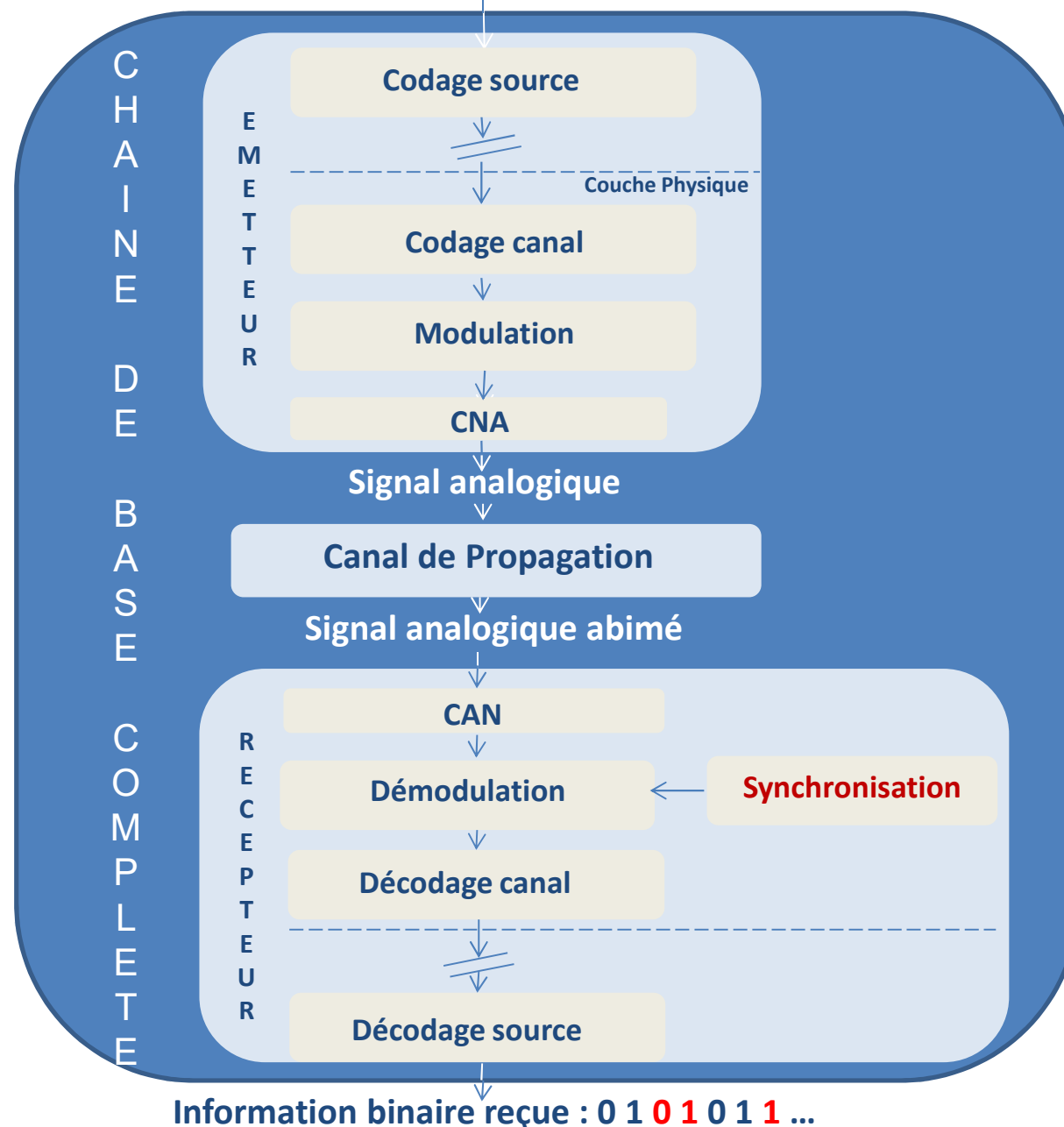


SNR=0 dB



# Chaine de communication numérique : **synchronisation**

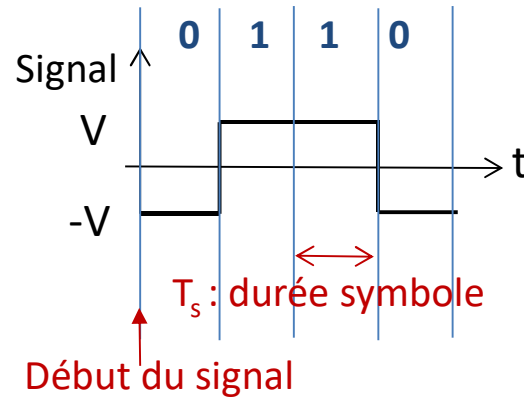
Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ...



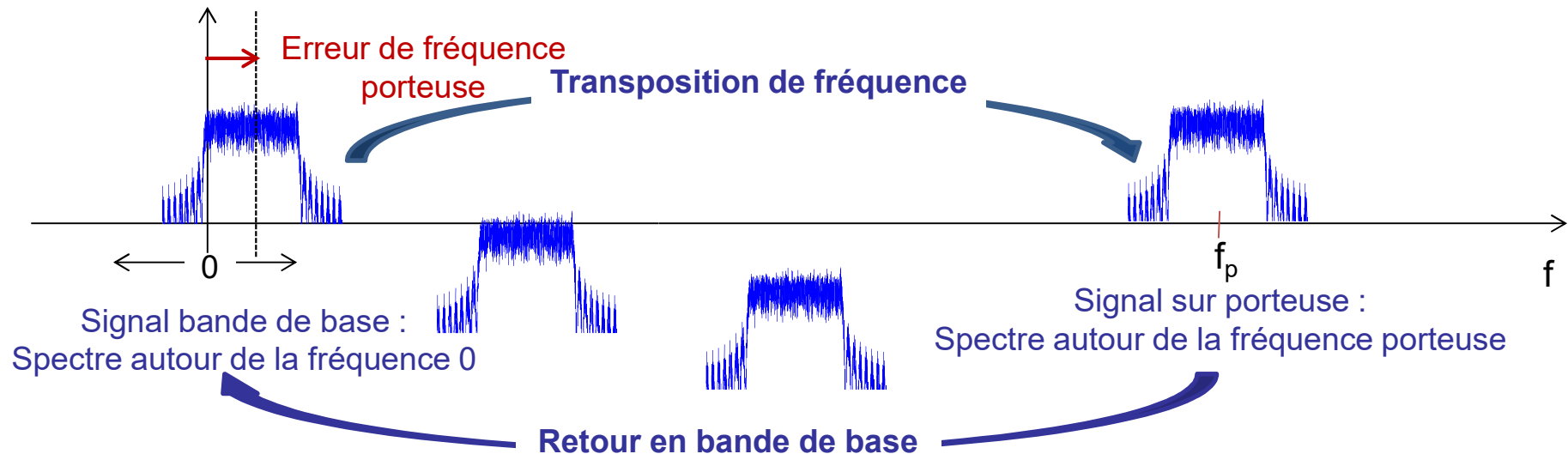
# Synchronisation sur l'horloge (« en temps ») et sur la porteuse (« en fréquence »)

- Sur l'horloge

Information binaire à transmettre :



- Sur la porteuse (pour les transmissions sur fréquence porteuse)



# **Introduction aux télécommunications**

**Département sciences du numérique  
Première année**

## **Séquence 1**

- 1- Introduction,**
- 2- Construction d'un modulateur numérique en bande de base,**
- 3- Notion d'efficacité spectrale.**

---

**Génération d'un signal de télécommunication  
À partir de la suite binaire à transmettre**

---

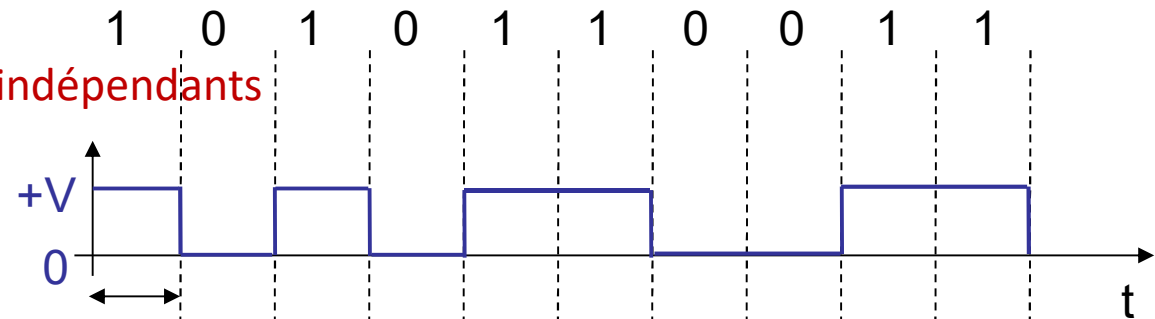
# Modulation numérique en bande de base

## Quelques exemples de signaux

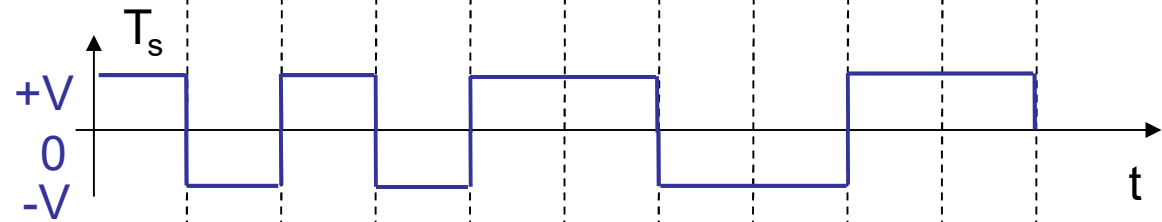
→ Codage **élémentaire** à **symboles indépendants**

→ Codage par niveau :

→ NRZ unipolaire :

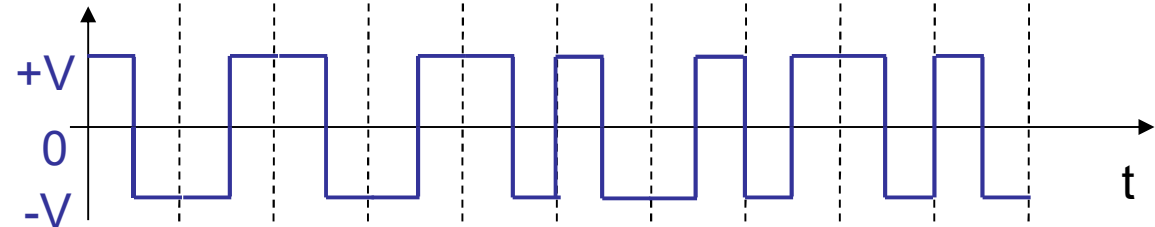


→ NRZ polaire :



→ Codage par transition

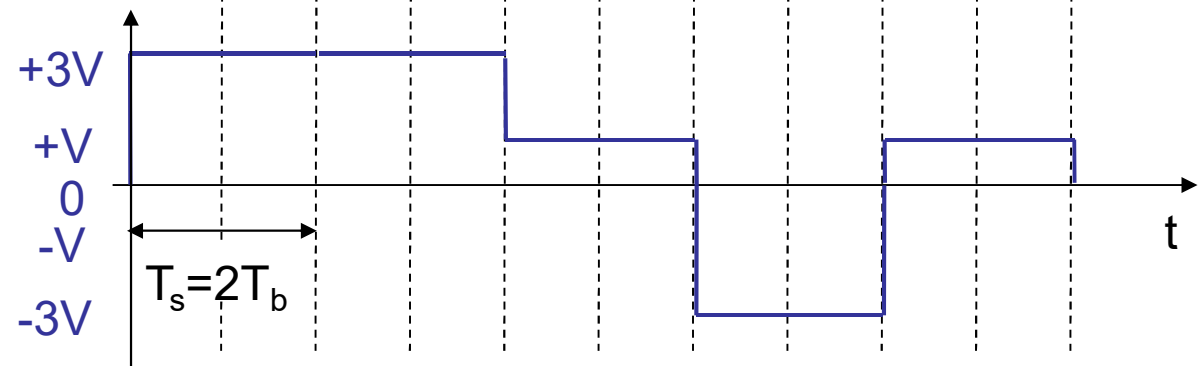
→ Biphase :



→ Codage bloc à **symboles indépendants**

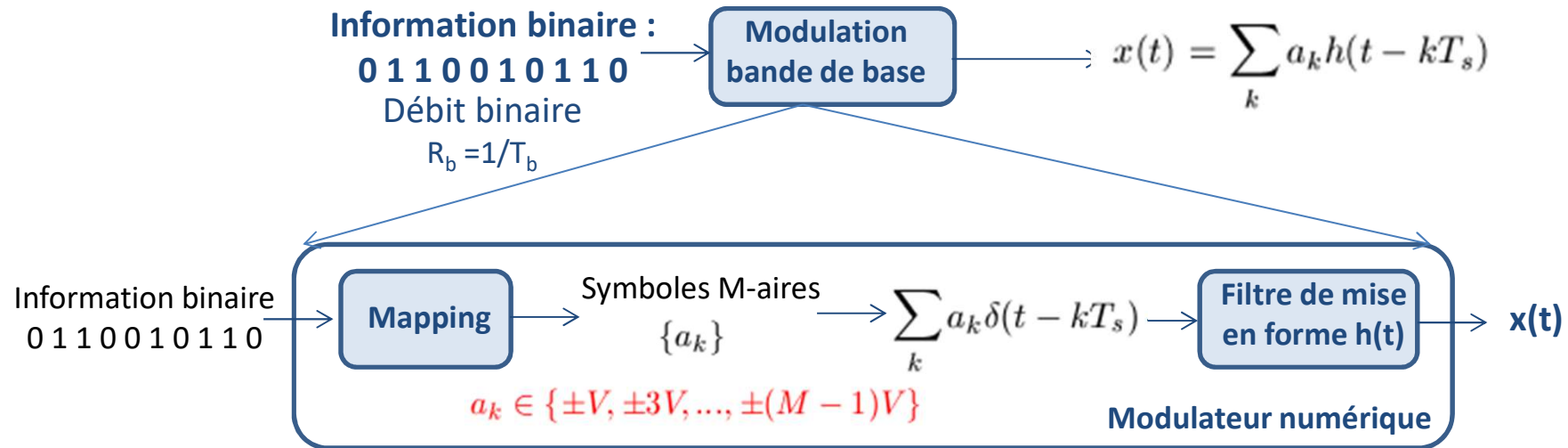
→ Codage par niveau :

→ NRZ à 4 niveaux :



# Modulation numérique en bande de base

## Modélisation générale



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

# Modulation numérique en bande de base

## Exemple de génération sous Matlab

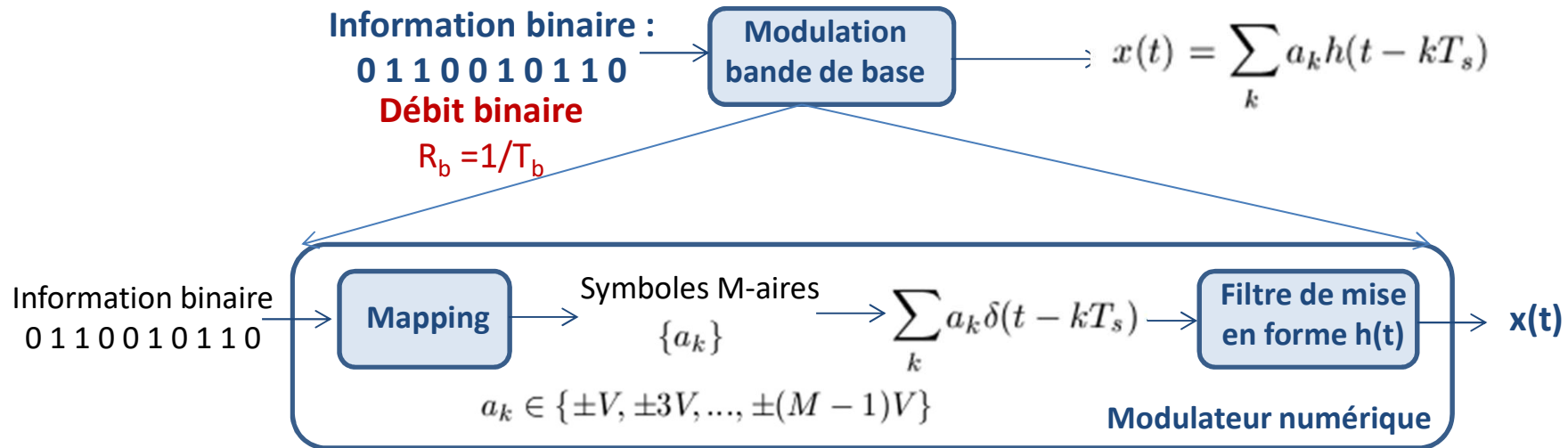
---

### Génération d'un NRZ polaire (M=2)

```
%Durée symbole en nombre d'échantillons (Ts=NsTe)
Ns=4;
%Nombre de bits générés
nb_bits=100;
%Génération de l'information binaire
bits=randi([0,1],1,nb_bits);
%Mapping binaire à moyenne nulle : 0->-1, 1->1
Symboles=2*bits-1;
%Génération de la suite de Diracs pondérés par les symbols (suréchantillonnage)
Suite_diracs=kron(Symboles, [1 zeros(1,Ns-1)]);
%Génération de la réponse impulsionnelle du filtre de mise en forme (NRZ)
h=ones(1,Ns)
%Filtrage de mise en forme
x=filter(h,1,Suite_diracs);
%Affichage du signal généré
figure ; plot(x);
axis([0 nb_bits-1 -1.5 1.5]);
```

# Modulation numérique en bande de base

## Notion de débit symbole / débit binaire



**Débit symbole** = nombre de symboles transmis  
par seconde (**symboles/s ou bauds**) :

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{R_b}{\log_2(M)}$$

Durée (ou période) symbole

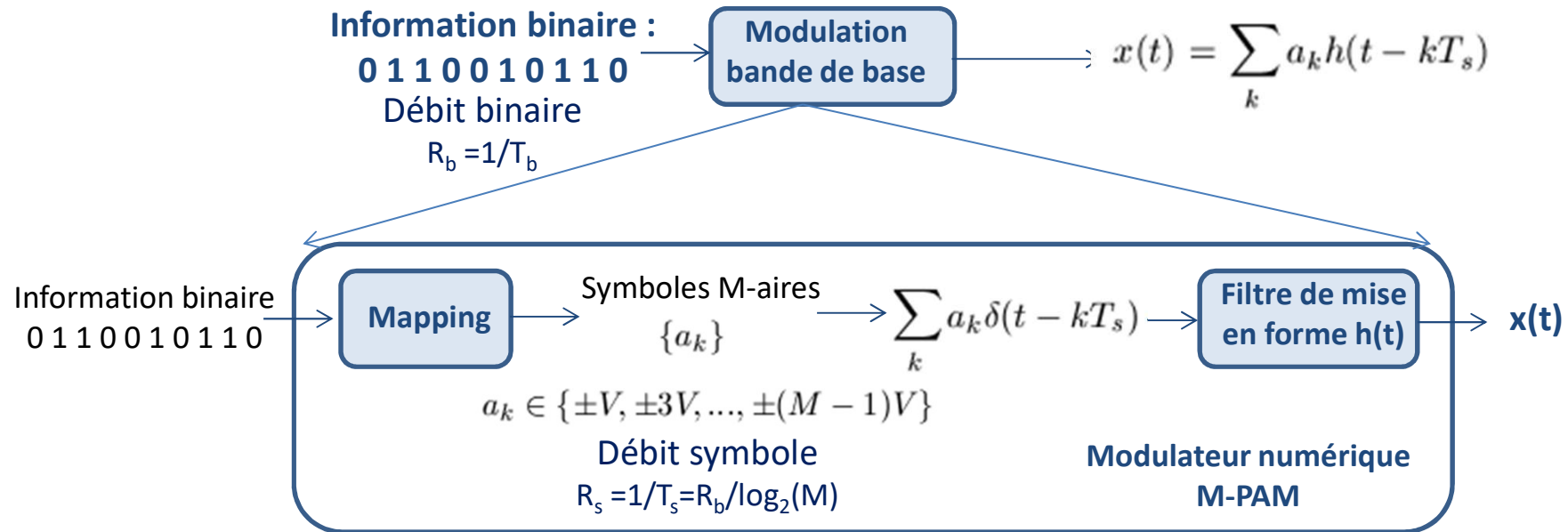
Débit binaire (bits/s)

M=nombre de symboles possibles (ordre de la modulation)



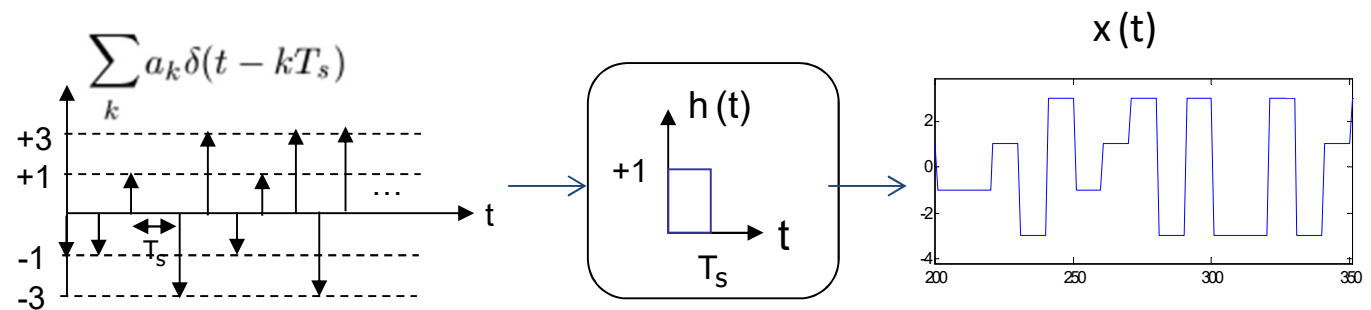
# Modulation numérique en bande de base

## Exemple



## NRZ 4-aire :

Bits	Symboles $a_k$
00	-3
01	-1
11	+1
10	+3



# **Introduction aux télécommunications**

**Département sciences du numérique  
Première année**

## **Séquence 1**

- 1- Introduction,**
- 2- Construction d'un modulateur numérique en bande de base,**
- 3- Notion d'efficacité spectrale.**

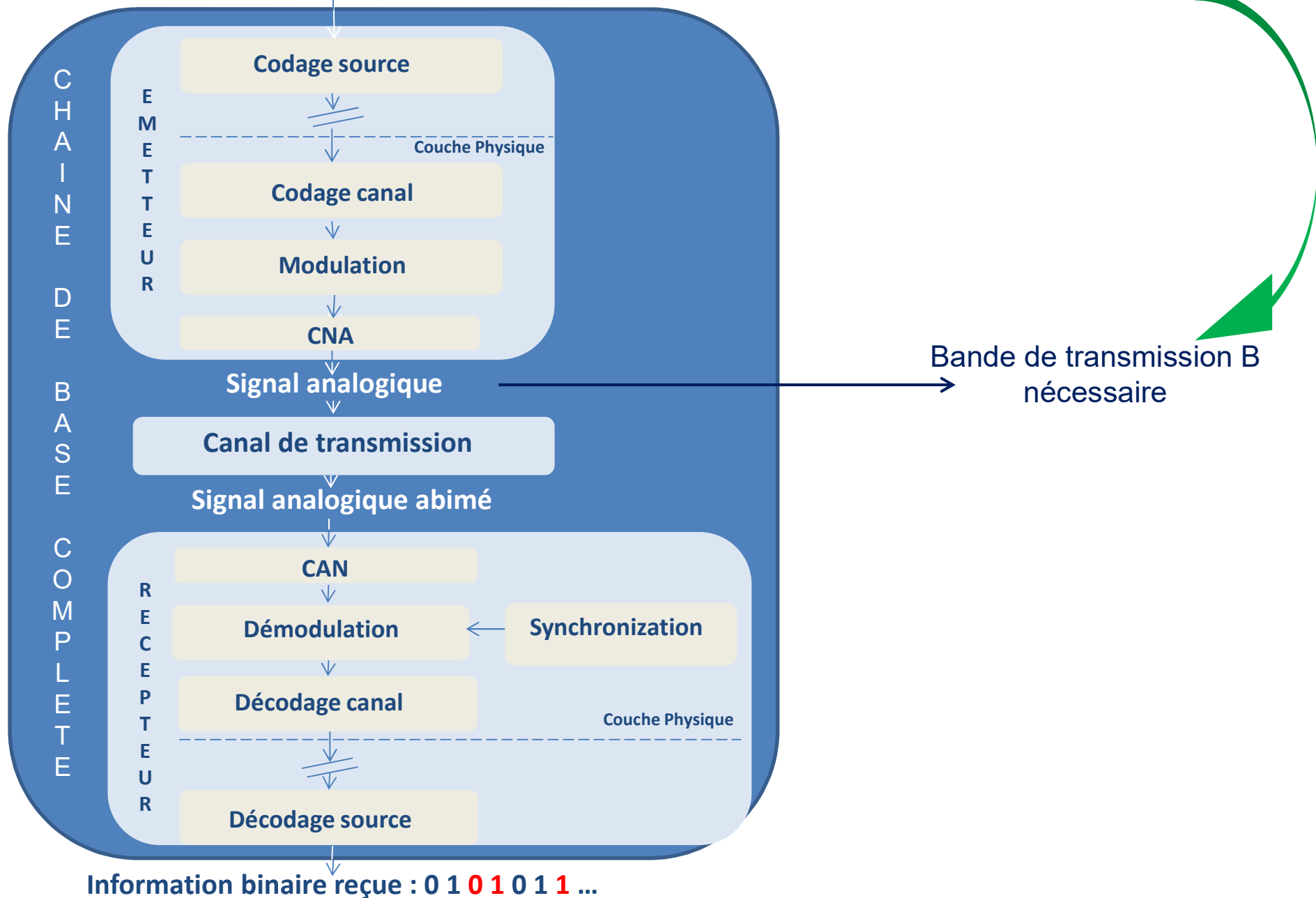
---

## Définition

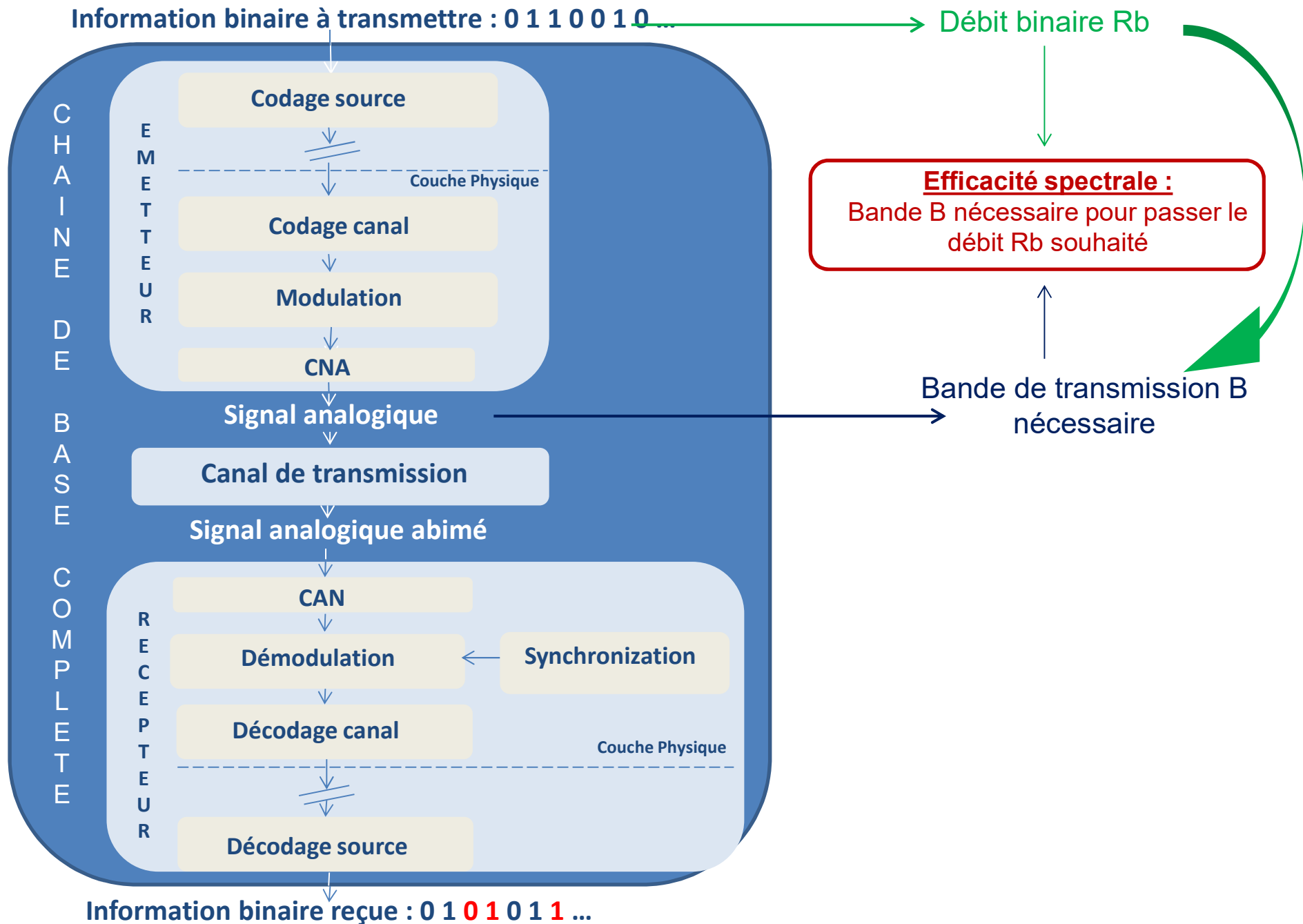
---

# Chaîne de communication numérique : **efficacité spectrale**

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ... → Débit binaire  $R_b$



# Chaine de communication numérique : **efficacité spectrale**



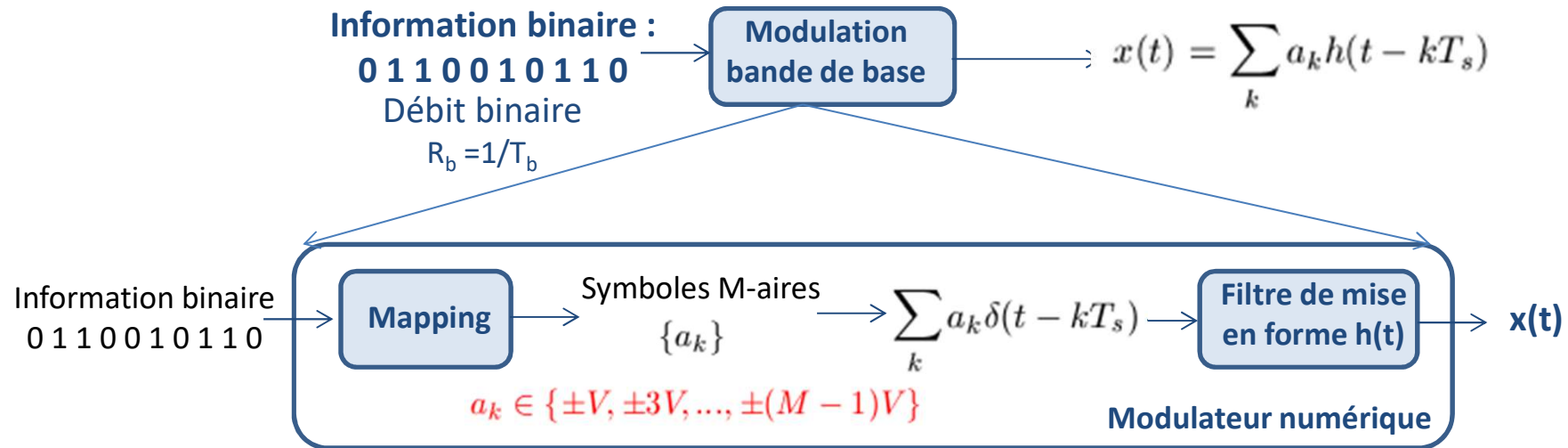
---

**Densité spectrale de puissance du signal de télécommunication généré  
=> Bande occupée**

---

# Modulation numérique en bande de base

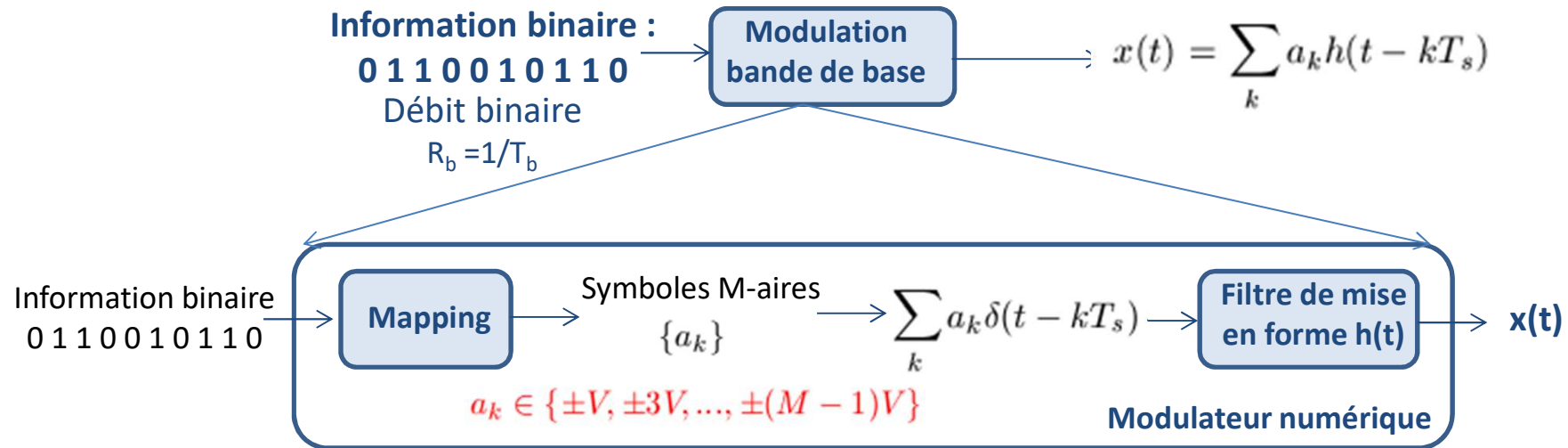
## Modélisation générale



**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)

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

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



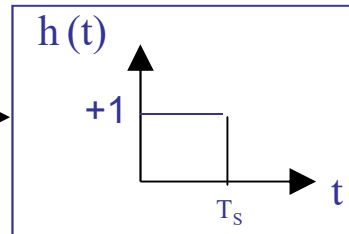
# Modulation numérique en bande de base

## Quelques exemples de DSPs

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

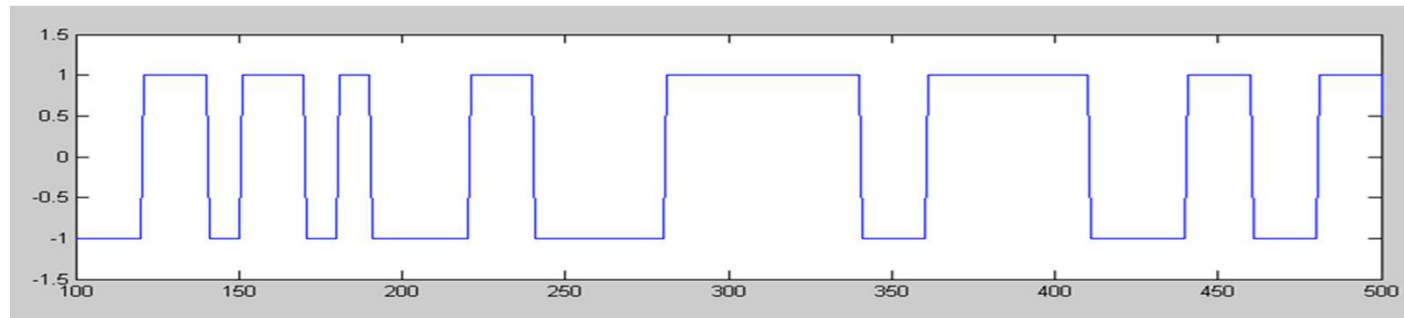
$a_k \in \{\pm 1\}$   
Indépendants et équiprobables

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

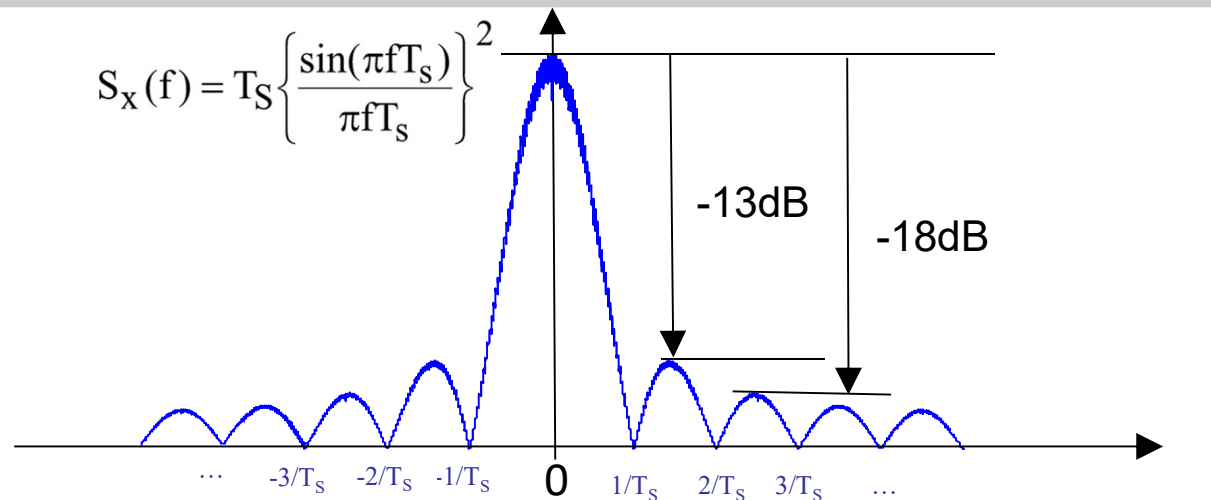


$$x(t) = \sum_k a_k h(t - kT_s)$$

$x(t)$



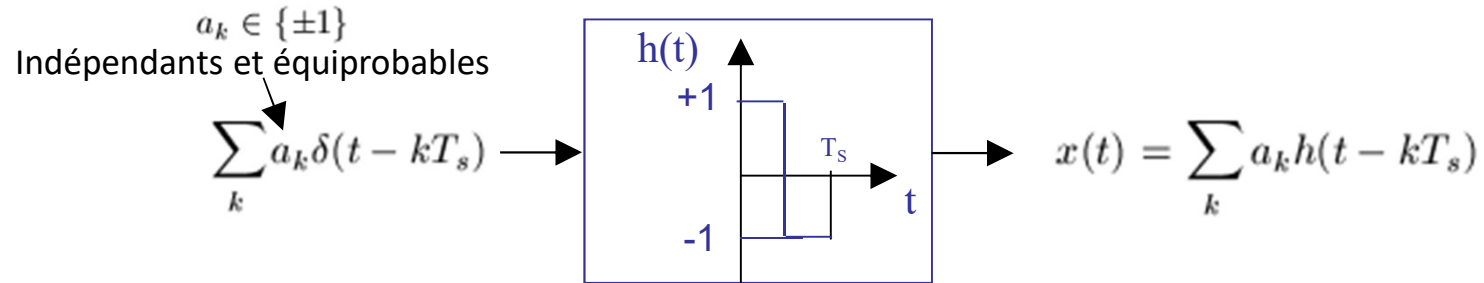
$$S_x(f) = T_s \left\{ \frac{\sin(\pi f T_s)}{\pi f T_s} \right\}^2$$



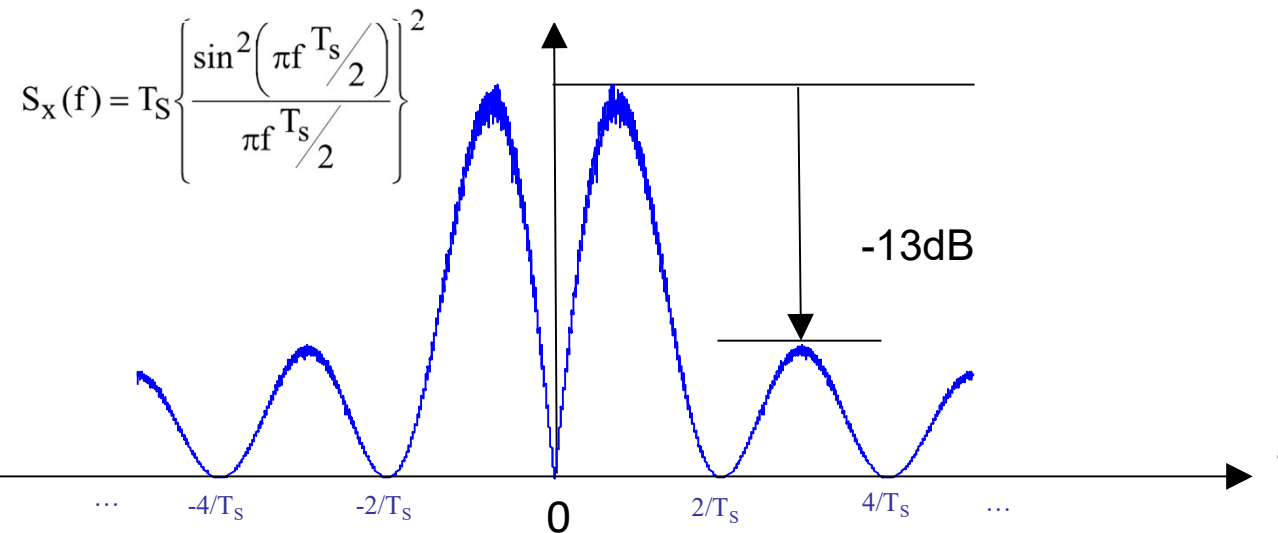
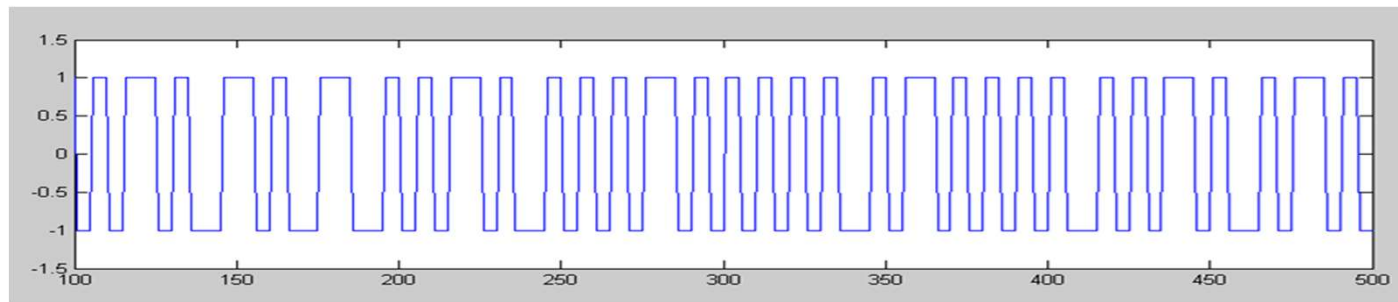
# Modulation numérique en bande de base

## Quelques exemples de DSPs

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



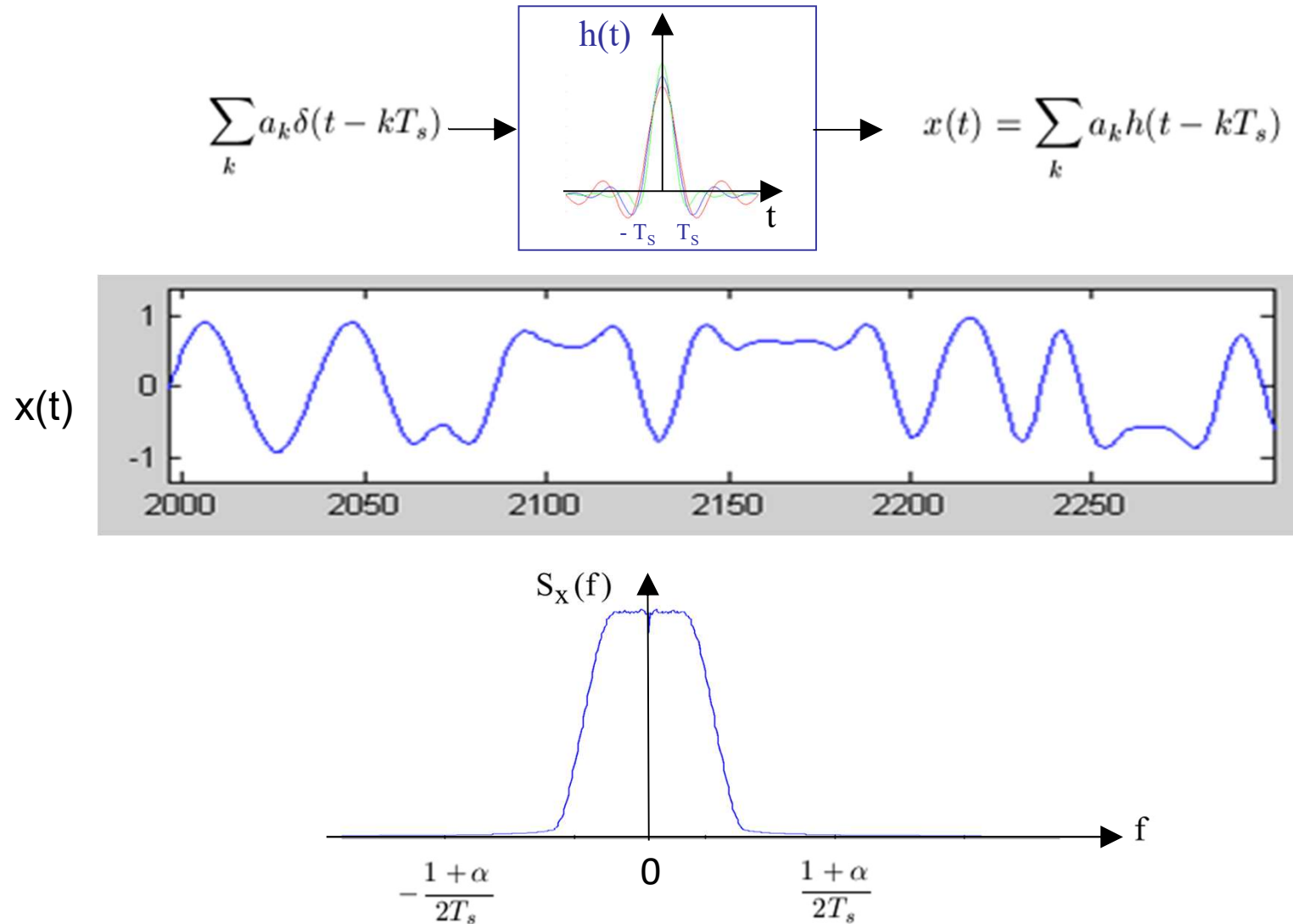
$x(t)$



# 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

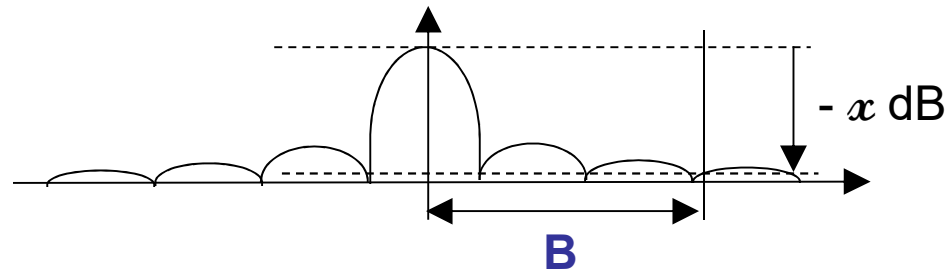
## Notion d'efficacité spectrale

→ Définition de la 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)



# Modulation numérique en bande de base

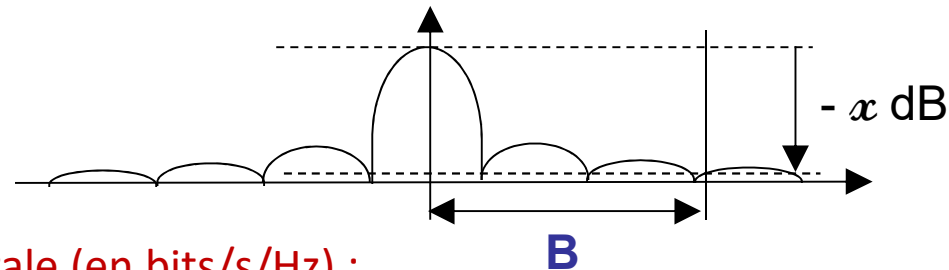
## Notion d'efficacité spectrale

→ Définition de la 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)



→ 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)

$$\eta = \frac{R_b}{B} = \frac{\log_2(M)}{k}$$