

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**

Signal analogique : son, image ...

Numérisation

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

Débit binaire R_b
Nombre de bits
transmis par seconde
(bps, Kbps, Mbps, Gbps...)

Exemple DVB :
 $TEB < 10^{-10}$,
 $R_b : 30 \text{ à } 40 \text{ Mbps}$

C
H
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

Emetteur

Signal analogique

Canal de Propagation

Signal analogique abimé

Récepteur

Exemple:

0	1	1	0	0	1	0	1	1	0
😊	😊	😞	😞	😊	😊	😞	😊	😊	😞
0	1	0	1	0	1	1	1	1	1

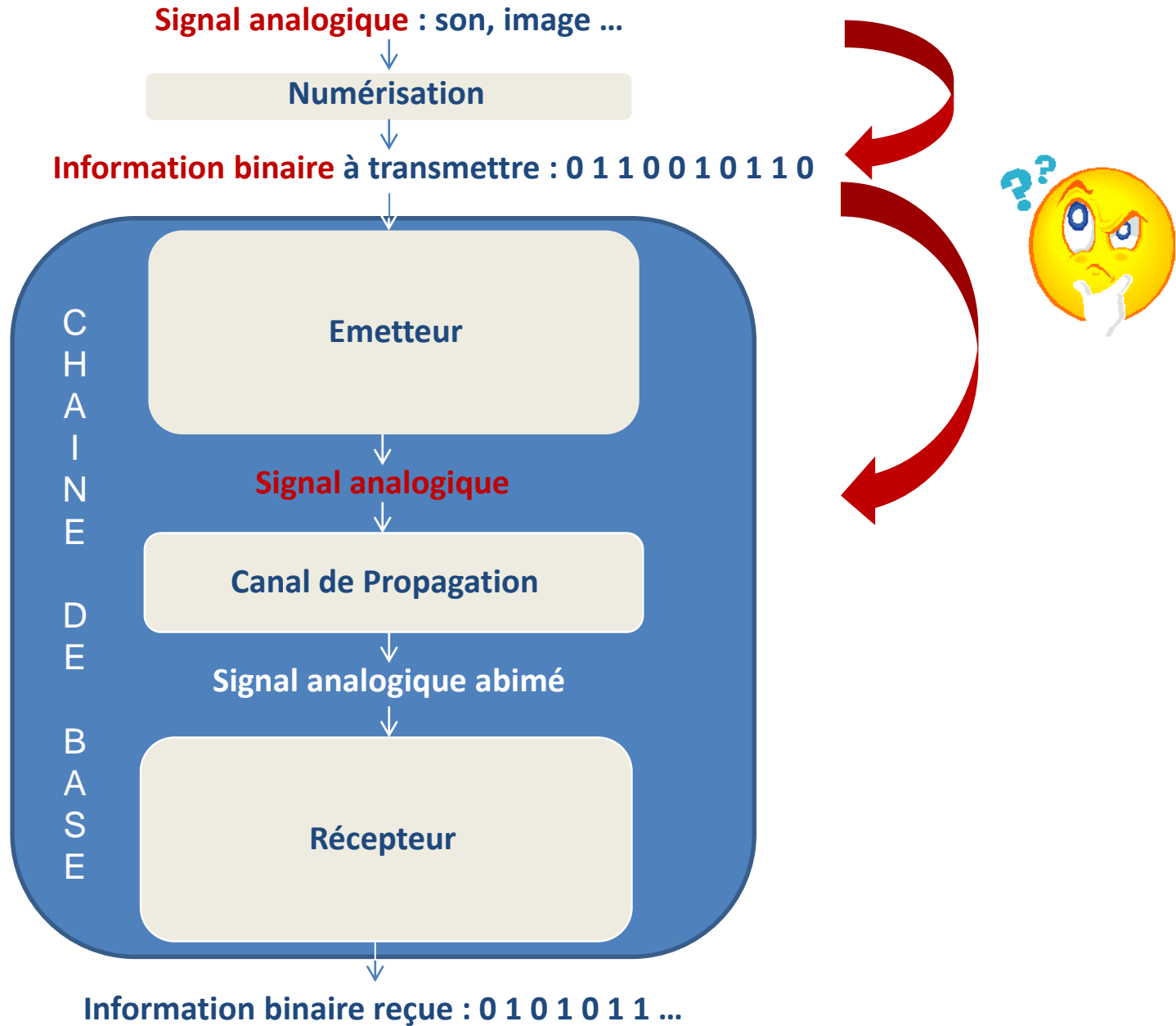
TEB = 4/10

Taux d'erreur binaire (TEB) :

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

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

Digital transmission channel : avantages et inconvénients



Digital transmission channel : avantages et inconvénients

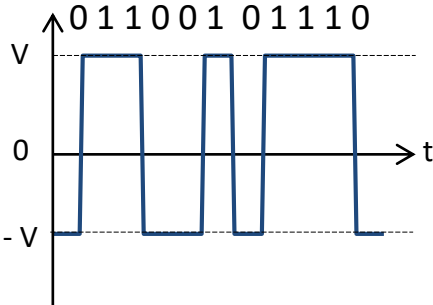
Signal analogique : son, image ...

Numérisation

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

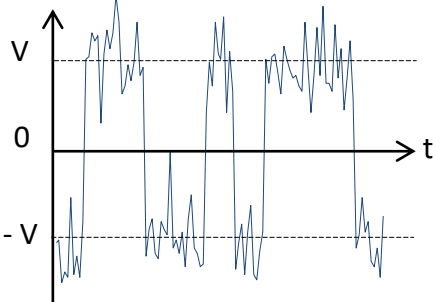
Exemple :

Signal transmis :

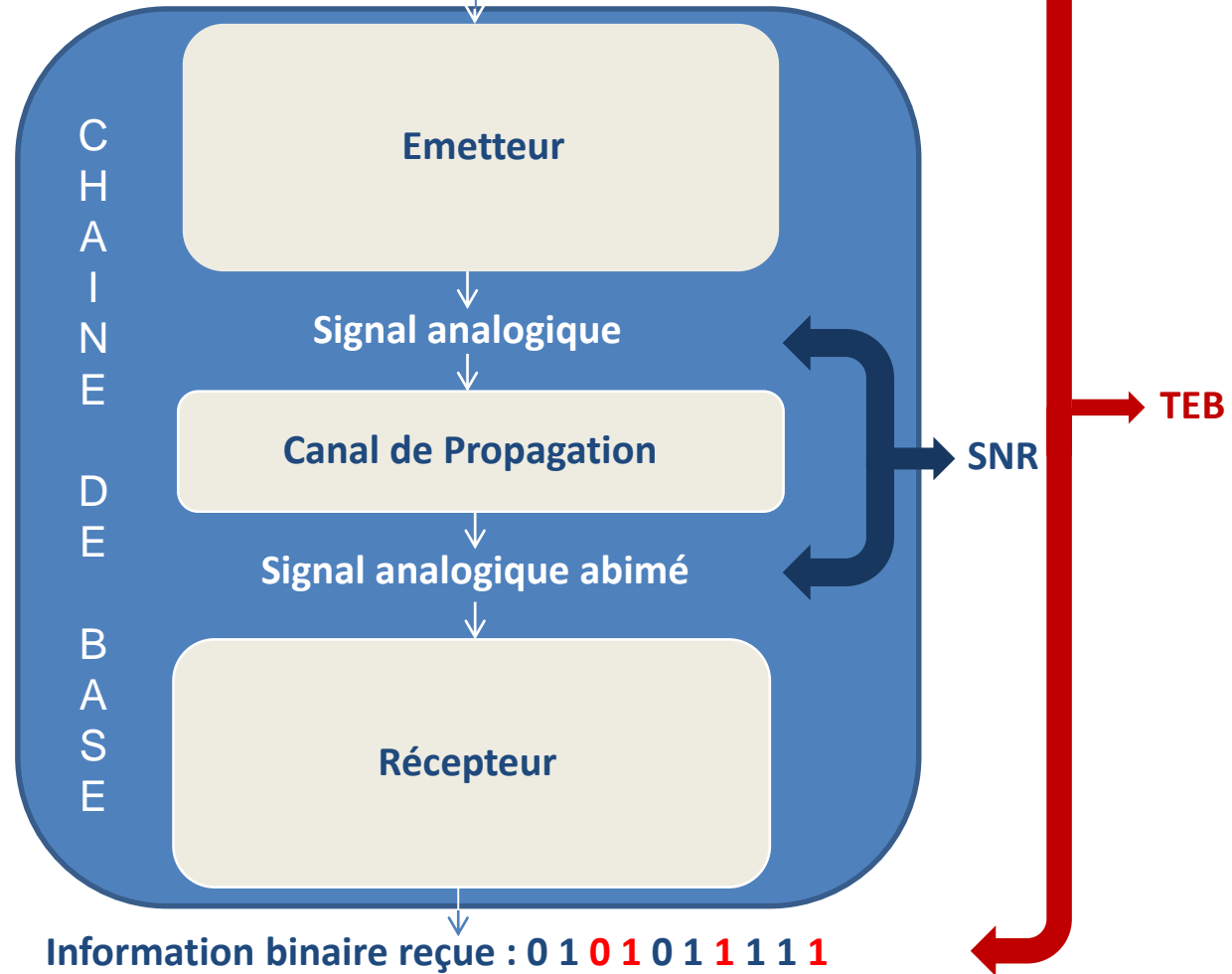
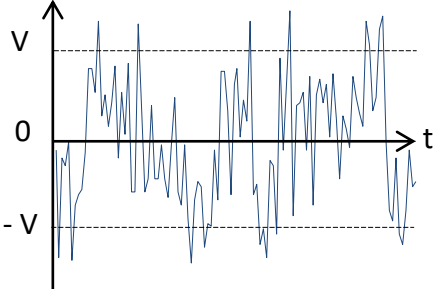


Signal reçu :

SNR = 10 dB :



SNR = 0 dB :



Digital transmission channel : avantages et inconvénients

Signal analogique : son, image ...

Numérisation

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

Emetteur

Signal analogique

Canal de Propagation

Signal analogique abimé

Récepteur

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



La qualité de la transmission est améliorée :

Le critère de qualité d'une transmission numérique est le taux d'erreur binaire, qui peut être très bas même en présence de bruit sur le canal. Bien sûr le taux d'erreur binaire est fonction du SNR.

Digital transmission channel : avantages et inconvénients

Signal analogique : son, image ...

Numérisation

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

Emetteur

Signal analogique

Canal de Propagation

Signal analogique abimé

Récepteur

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



La qualité de la transmission est améliorée :

Le critère de qualité d'une transmission numérique est le taux d'erreur binaire, qui peut être très bas même en présence de bruit sur le canal. Bien sûr le taux d'erreur binaire est fonction du SNR.



Prix à payer : la bande occupée augmente lorsqu'on numérise les signaux

Exemple : numérisation de la téléphonie :

$$B_{\text{analogique}} = 3.4 \text{ kHz}$$

$$B_{\text{numérique}} \sim 64 \text{ kHz (Fe=8kHz, nb=8 bits)}$$

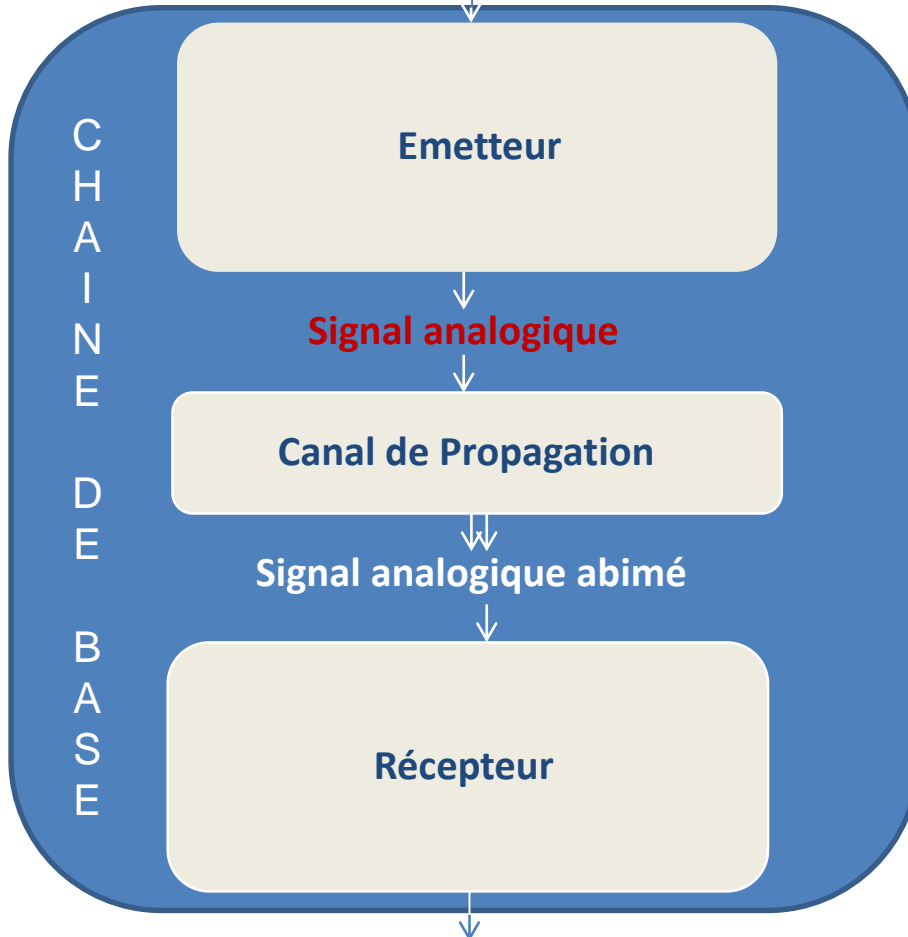
Heureusement il y a le codage source !

Digital transmission channel : avantages et inconvénients

Signal analogique : son, image ...

Numérisation

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



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



La qualité de la transmission est améliorée :

Le critère de qualité d'une transmission numérique est le taux d'erreur binaire, qui peut être très bas même en présence de bruit sur le canal. Bien sûr le taux d'erreur binaire est fonction du SNR.



De nouvelles fonctions peuvent être utilisées, telles que le codage canal qui permet de diminuer le taux d'erreur binaire sans augmenter la puissance d'émission.



Prix à payer : la bande occupée augmente lorsqu'on numérise les signaux
Exemple : numérisation de la téléphonie :

$$B_{\text{analogique}} = 3.1 \text{ kHz}$$

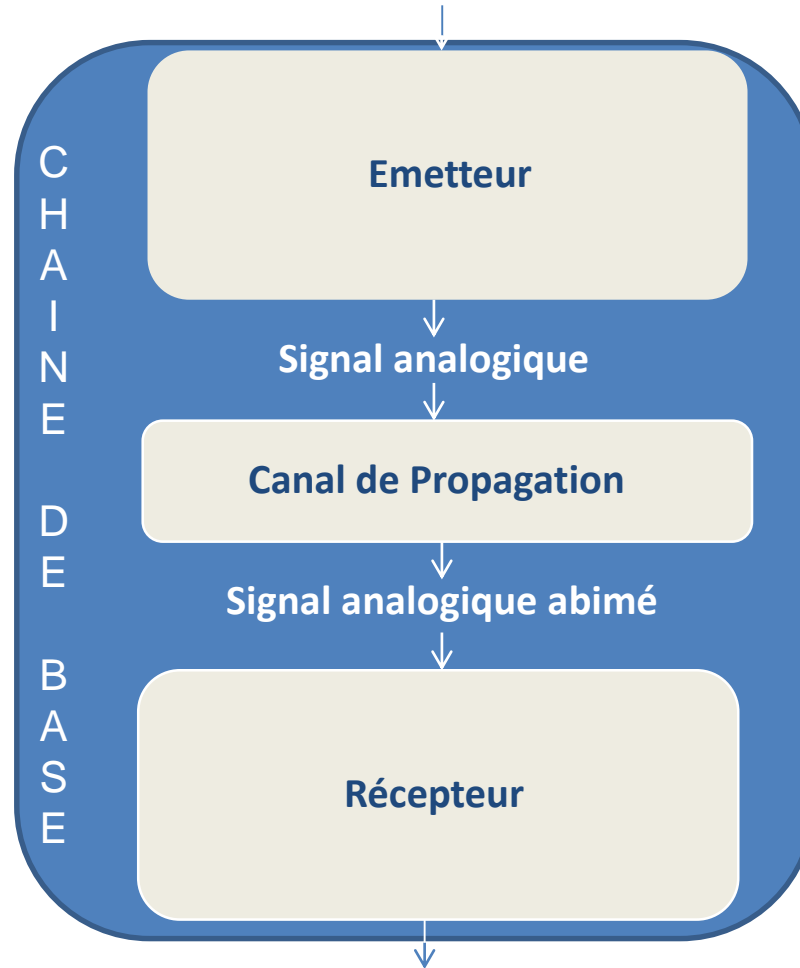
$$B_{\text{numérique}} \sim 64 \text{ kHz (Fe=8kHz, nb=8 bits)}$$

Heureusement il y a le codage source !

Éléments de la chaine de transmission

Chaîne de communication numérique

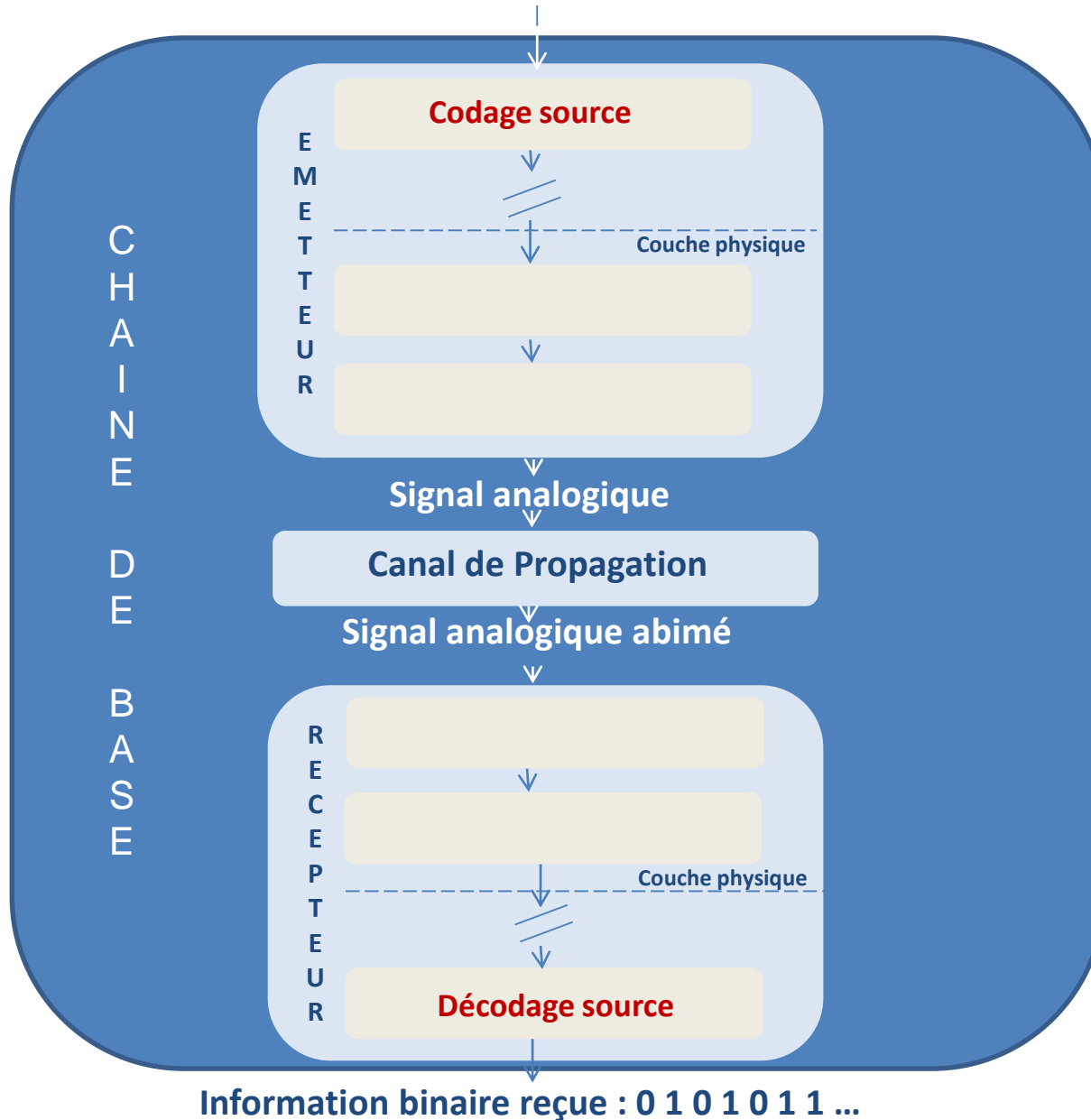
Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0



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

Chaîne 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

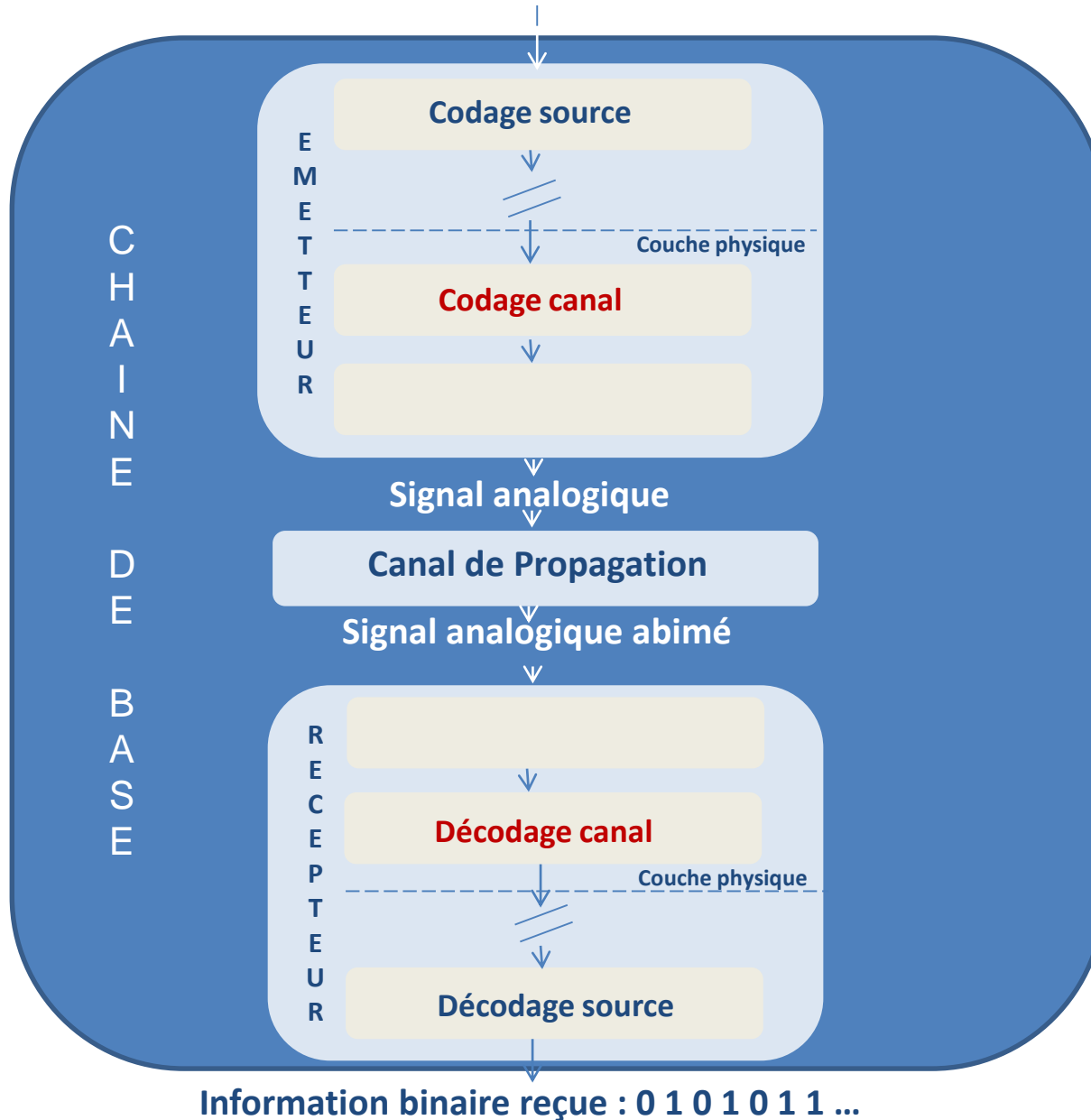
Code plus intelligent (base du code de Huffman présent dans le format jpeg):

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

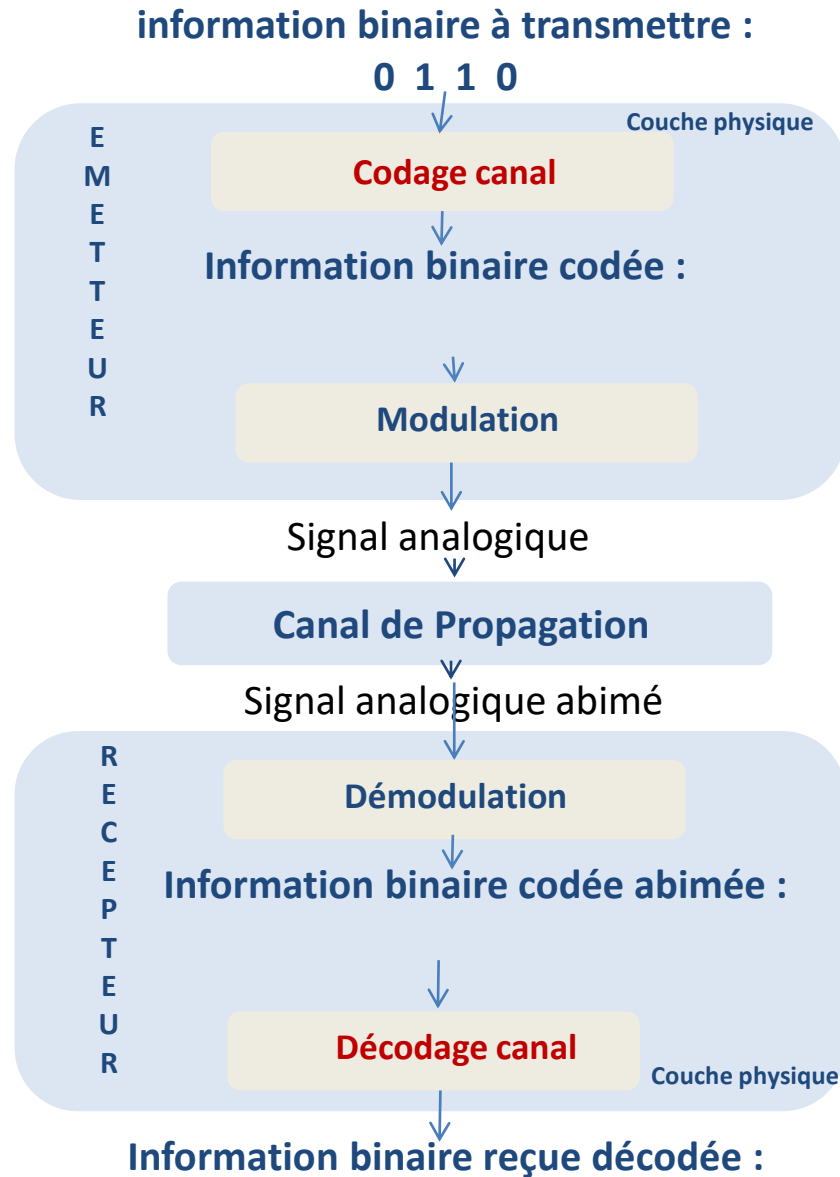
16 bits pour transmettre le message : 0010011001111000

Chaîne de communication numérique : **codage canal**

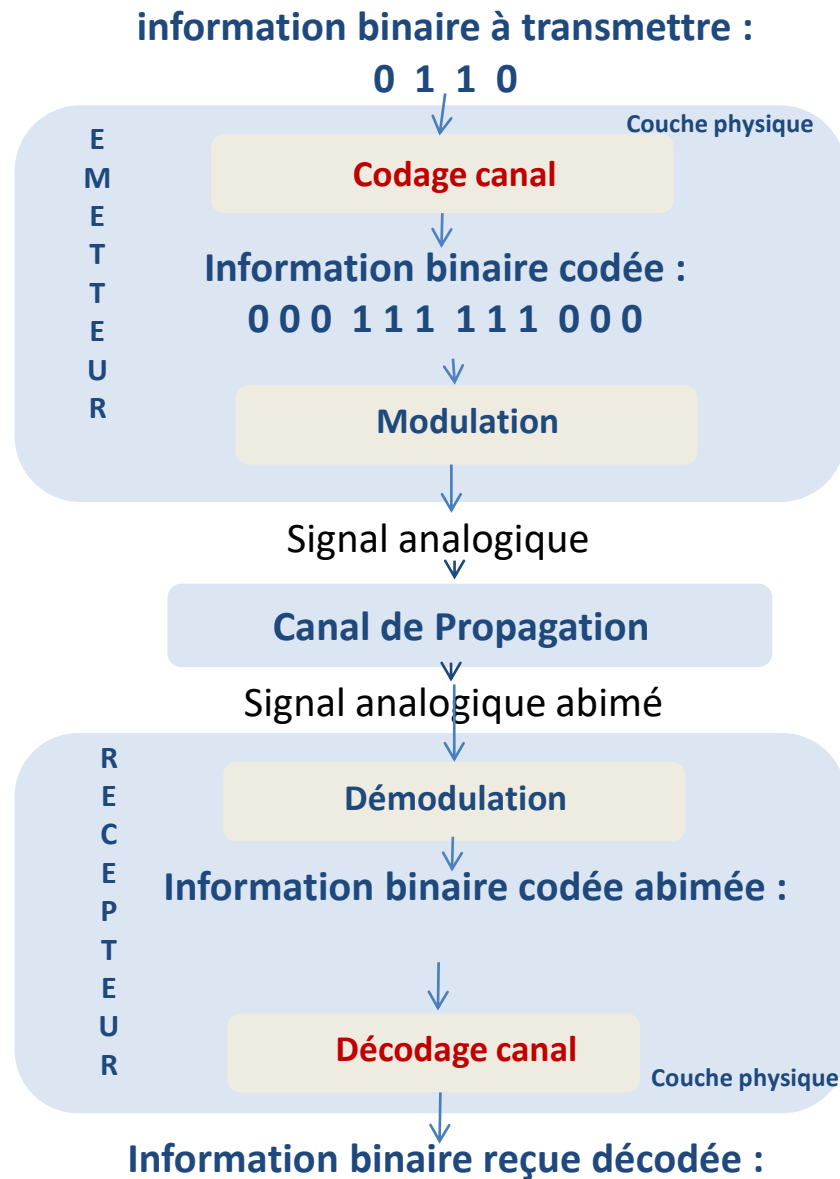
Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0



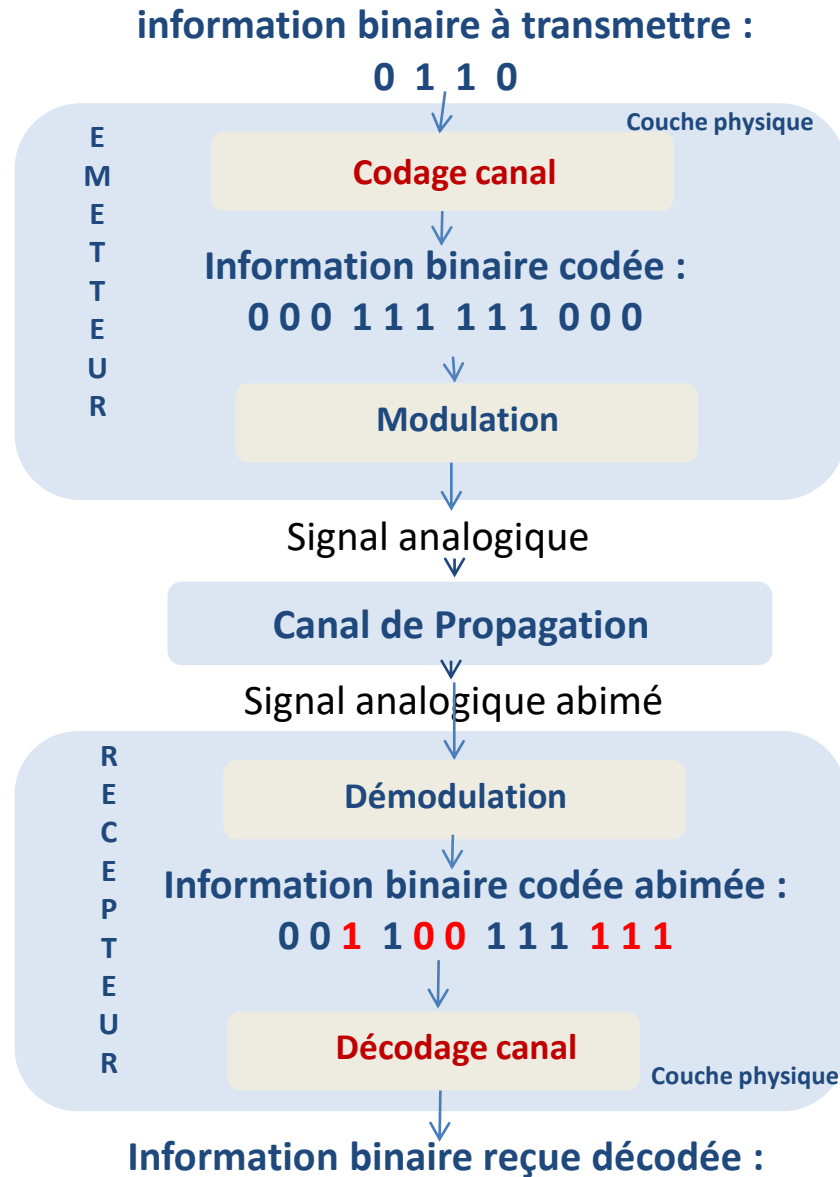
Exemple de codage canal



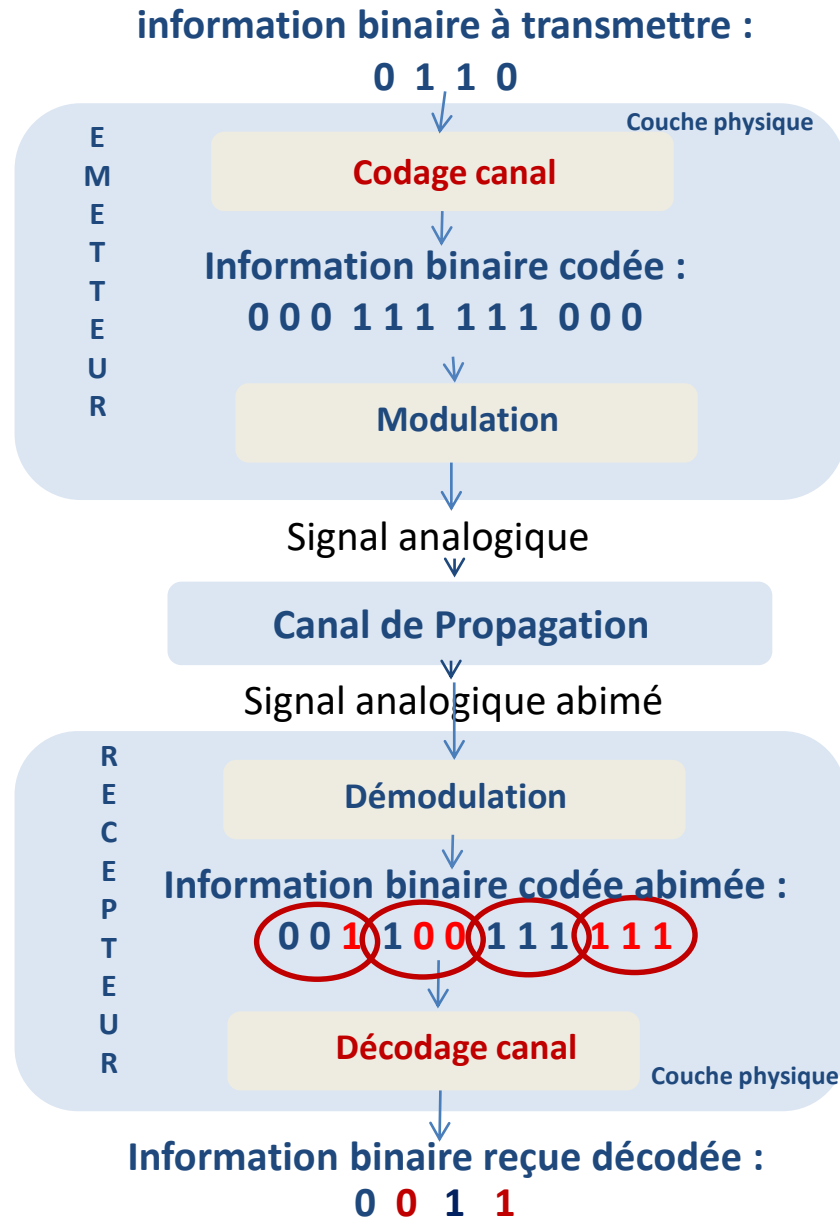
Exemple de codage canal



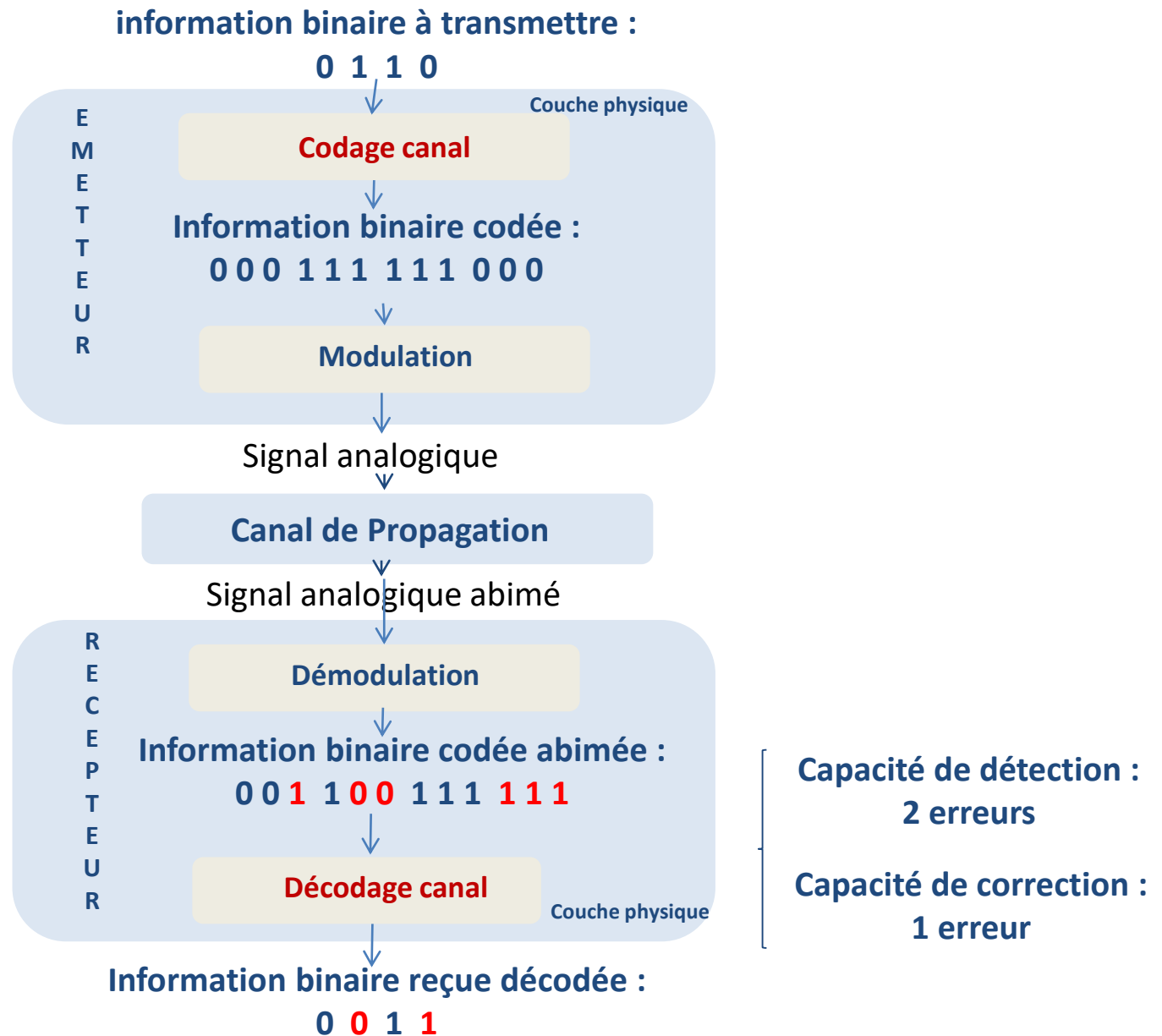
Exemple de codage canal



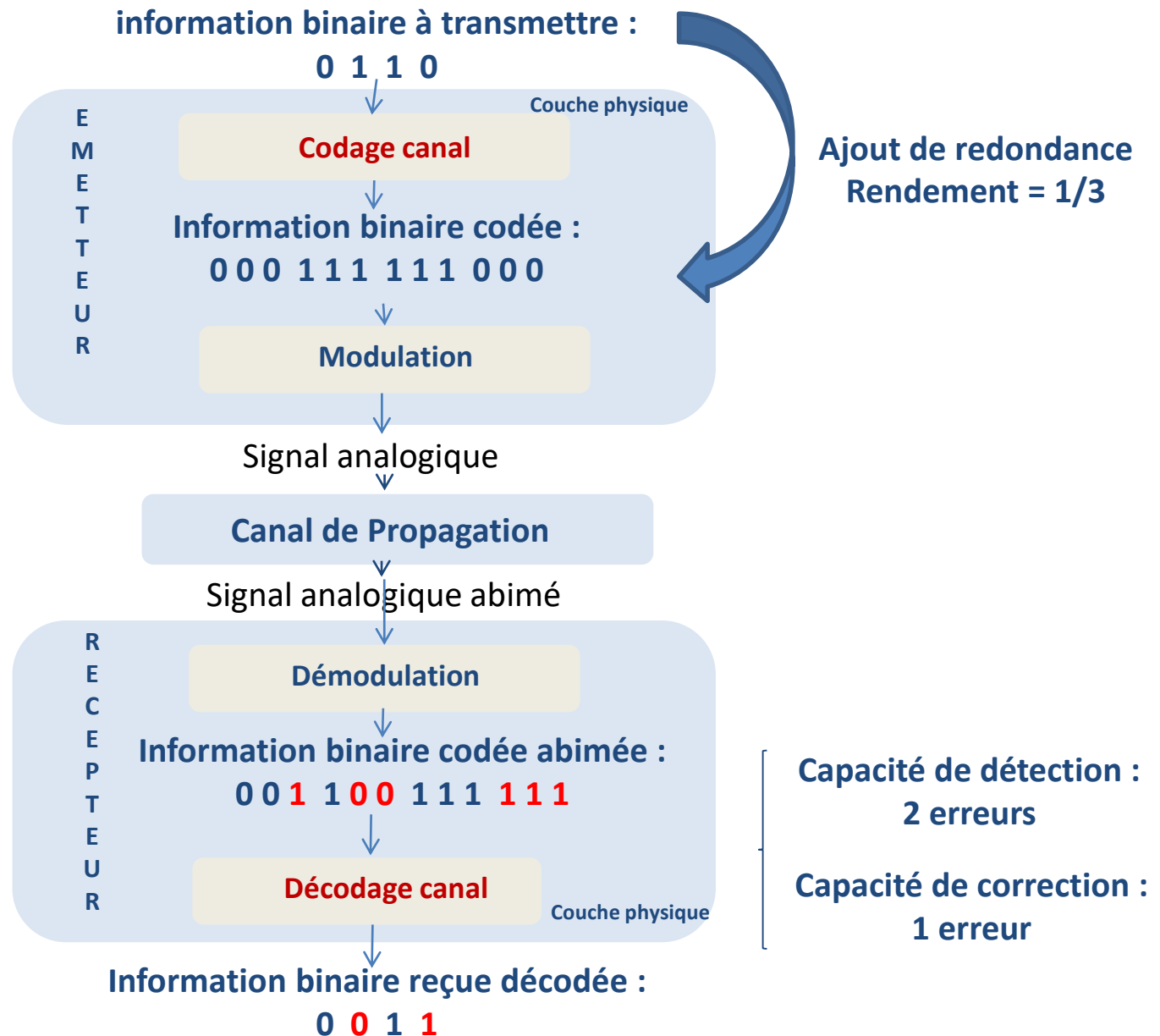
Exemple de codage canal



Exemple de codage canal

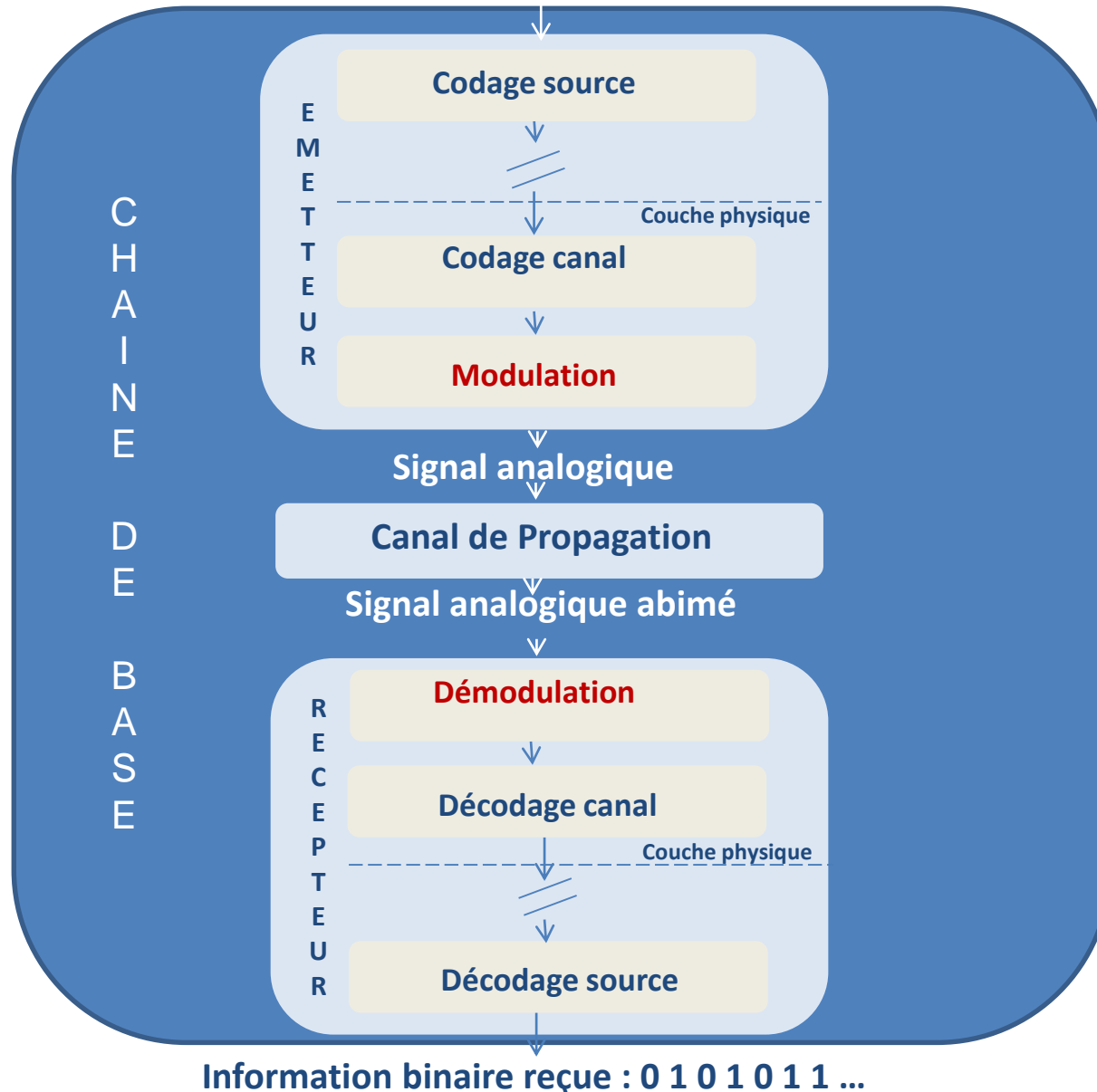


Exemple de codage canal



Chaîne de communication numérique : **modulation**

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



Exemple de Modulation

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

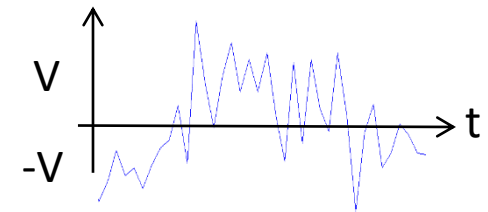
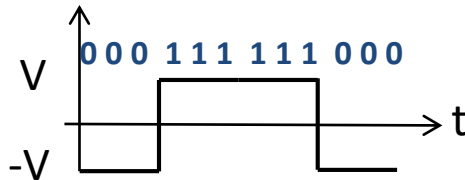
Signal numérique abimé

CAN

Signal analogique abimé

R
E
C
E
P
T
E
U
R

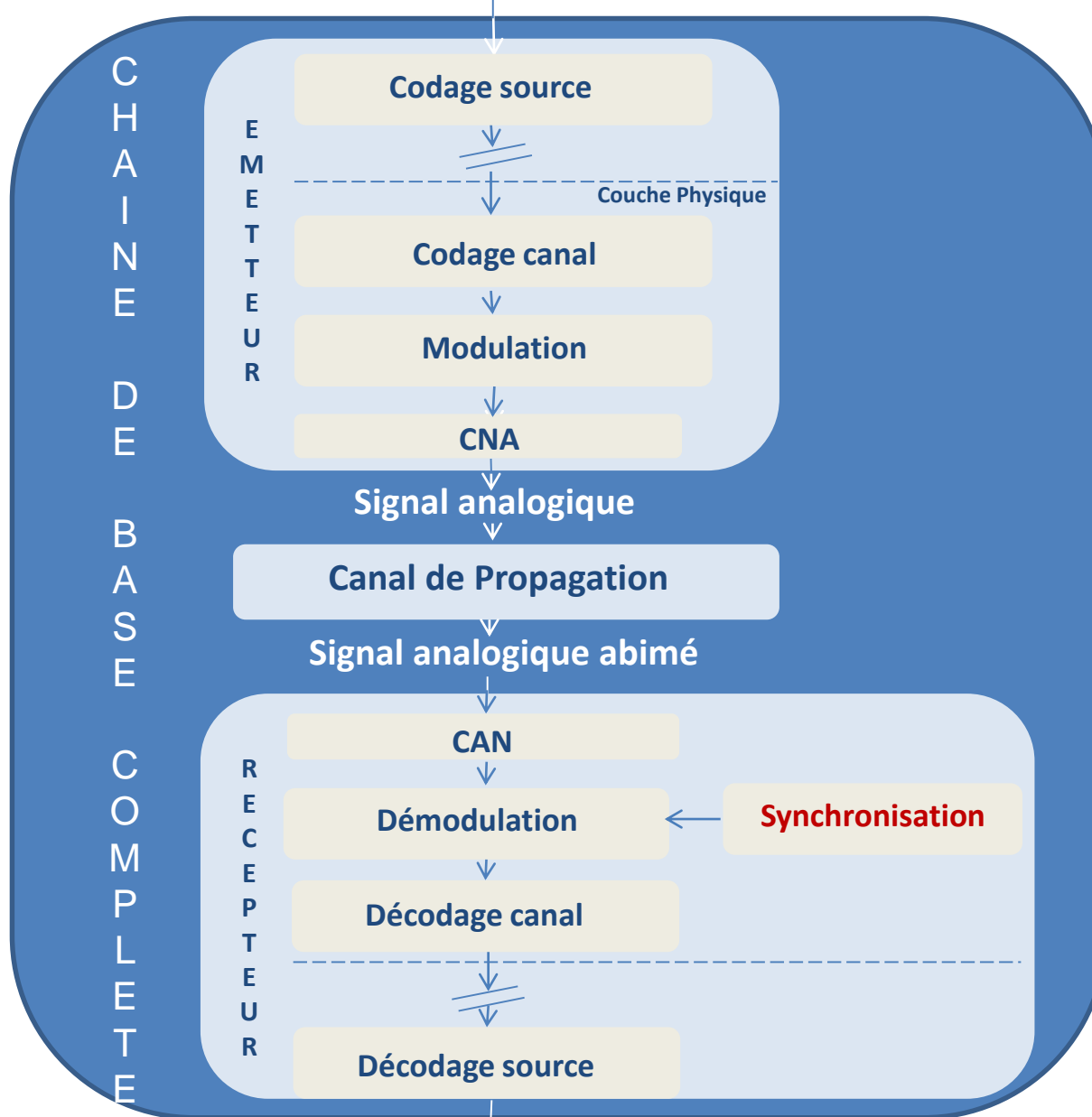
Exemple : signal NRZ



Canal de Propagation

Chaîne de communication numérique : **synchronisation**

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

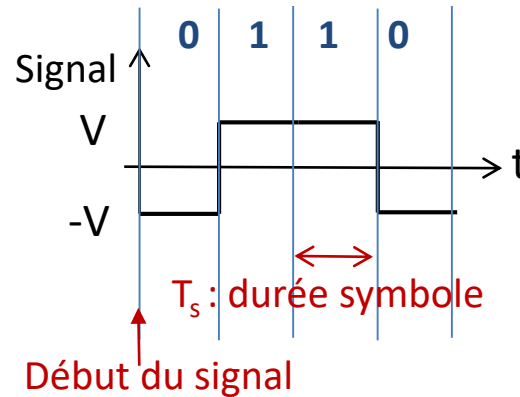


Information binaire reçue : 0 1 **0** 1 0 1 **1** ...

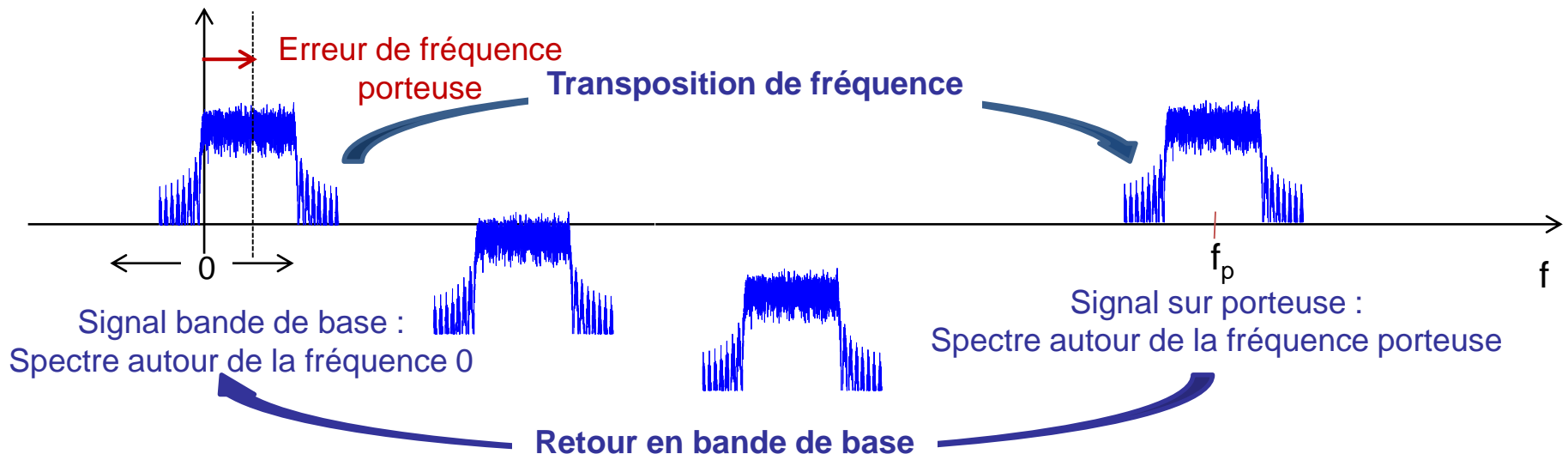
Synchronisation sur l'horloge (« en temps ») et sur la porteuse (« en fréquence »)

- 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**

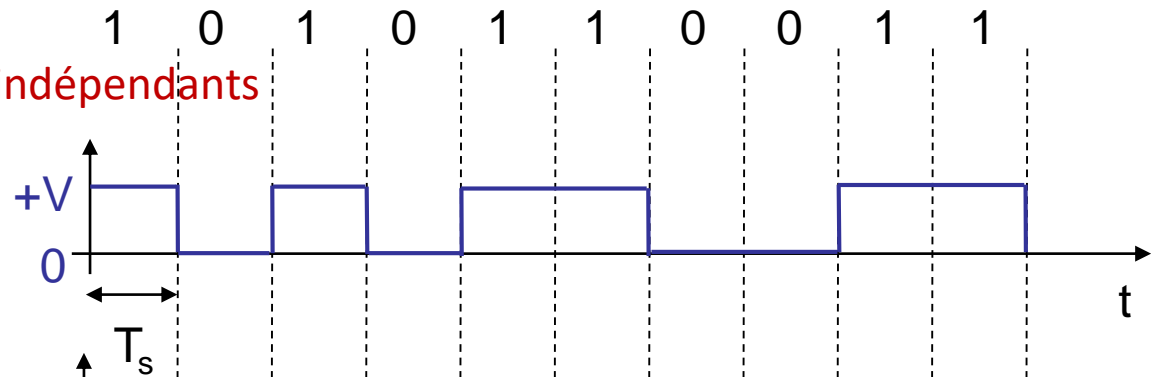
Modulation numérique en bande de base

Quelques exemples de signaux

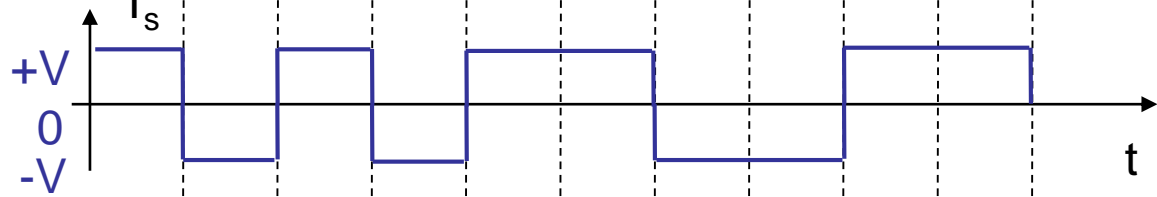
→ Codage **élémentaire** à **symboles indépendants**

→ Codage par niveau :

→ NRZ unipolaire :

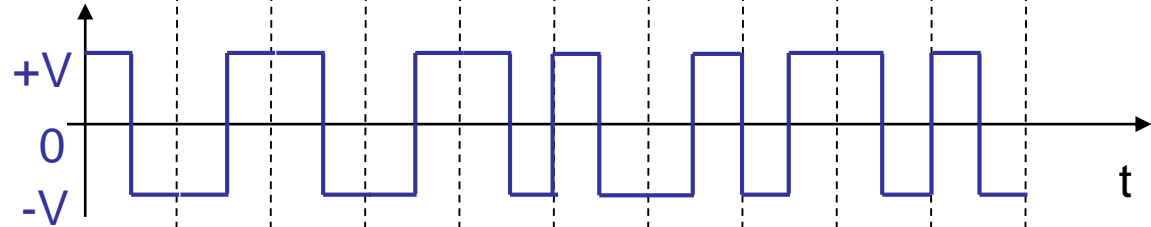


→ NRZ polaire :



→ Codage par transition

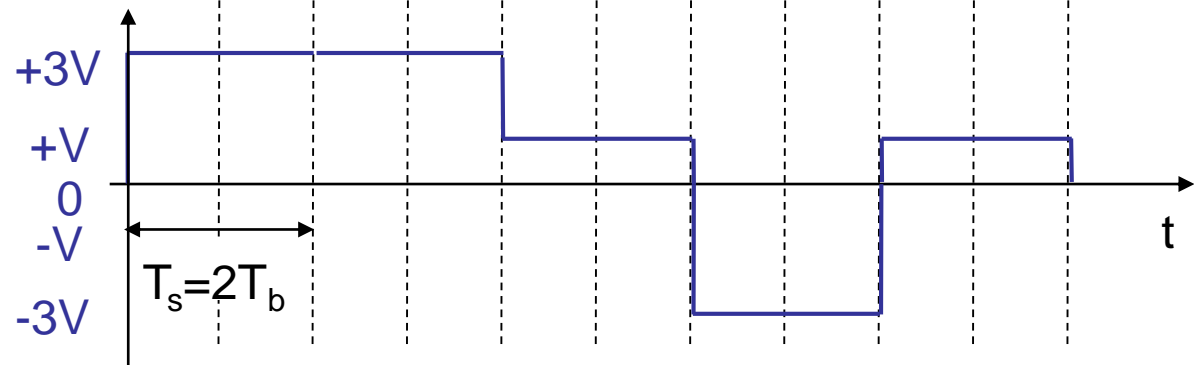
→ Biphase :



→ Codage bloc à **symboles indépendants**

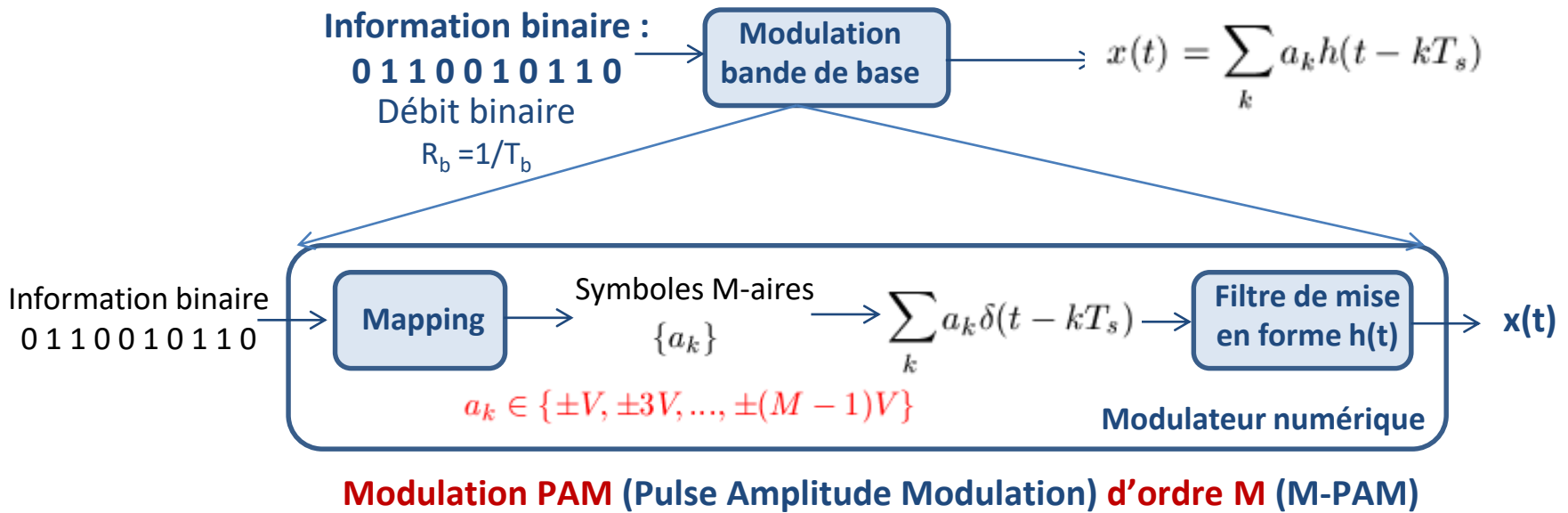
→ Codage par niveau :

→ NRZ à 4 niveaux :



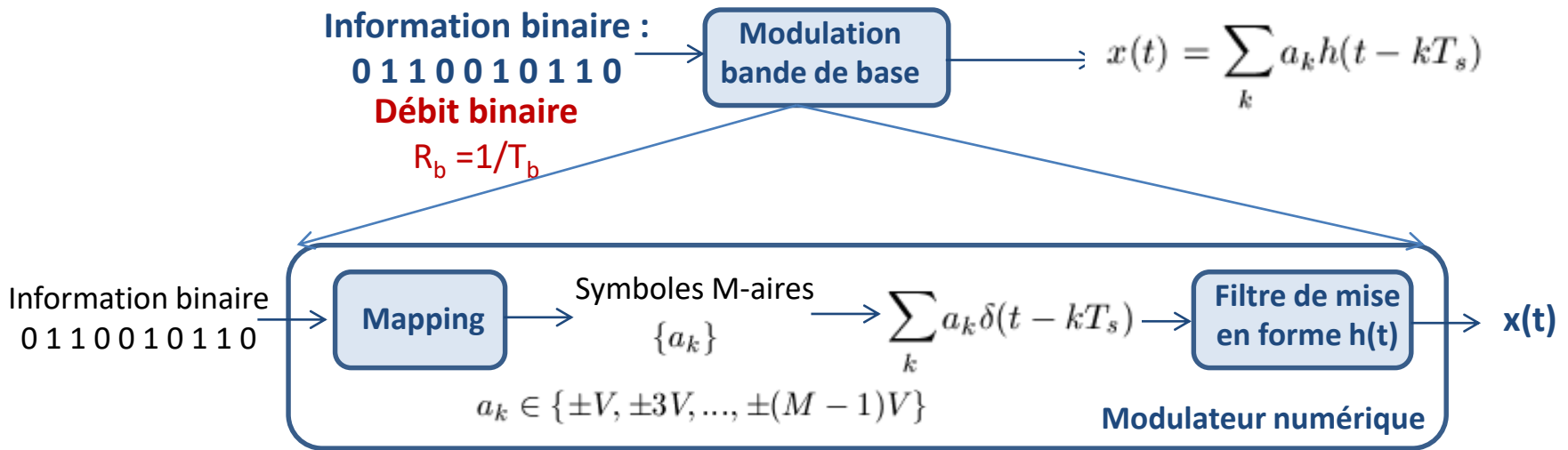
Modulation numérique en bande de base

Modélisation générale



Modulation numérique en bande de base

Modélisation générale



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

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

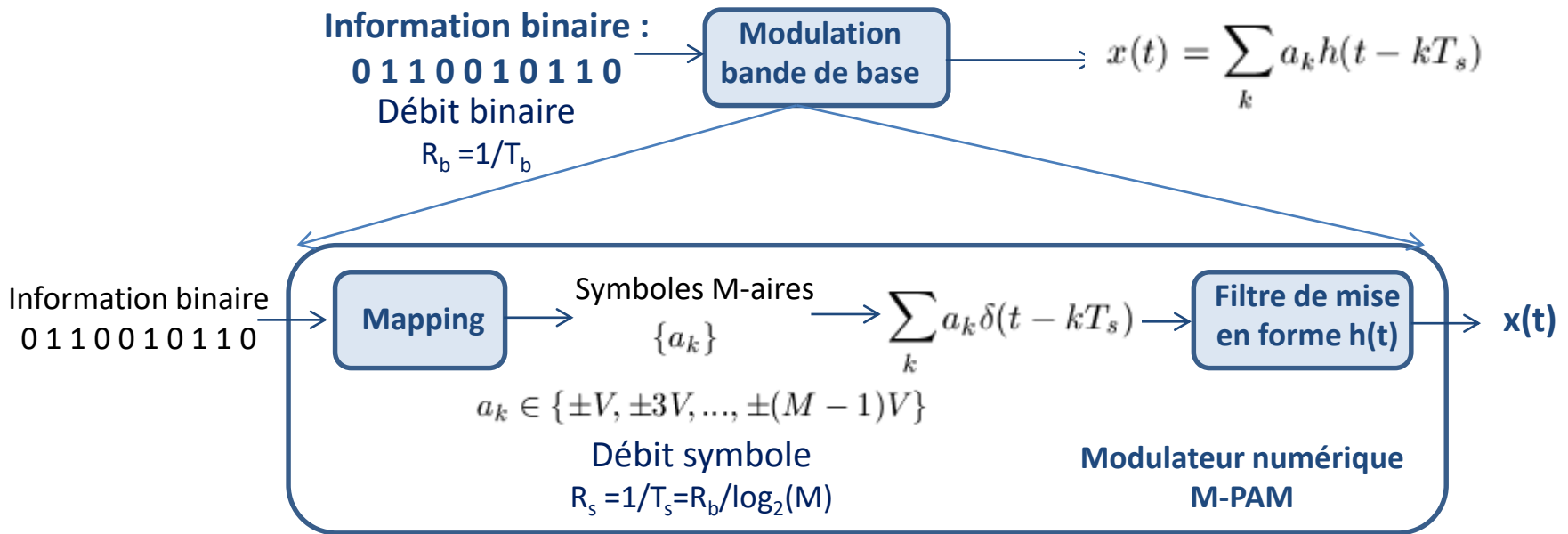
Durée (ou période) symbole

Débit binaire (bits/s)

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

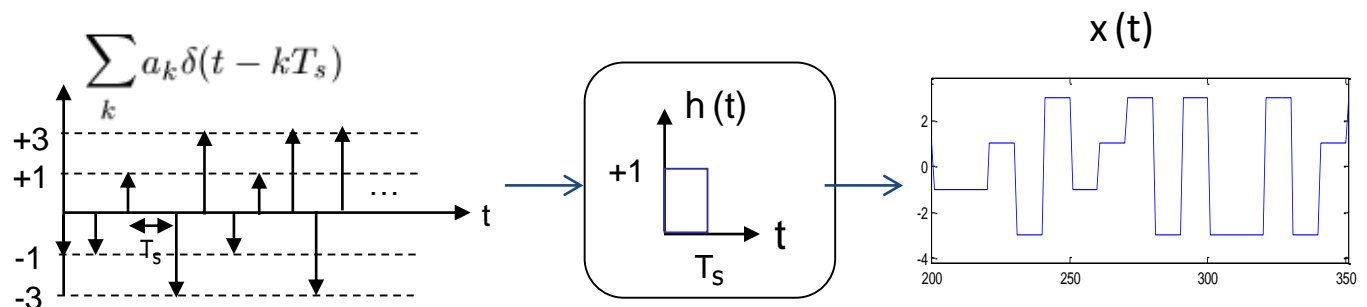
Modulation numérique en bande de base

Modélisation générale



Exemple (NRZ, M=4)

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



Modulation numérique en bande de base

Exemple en Matlab

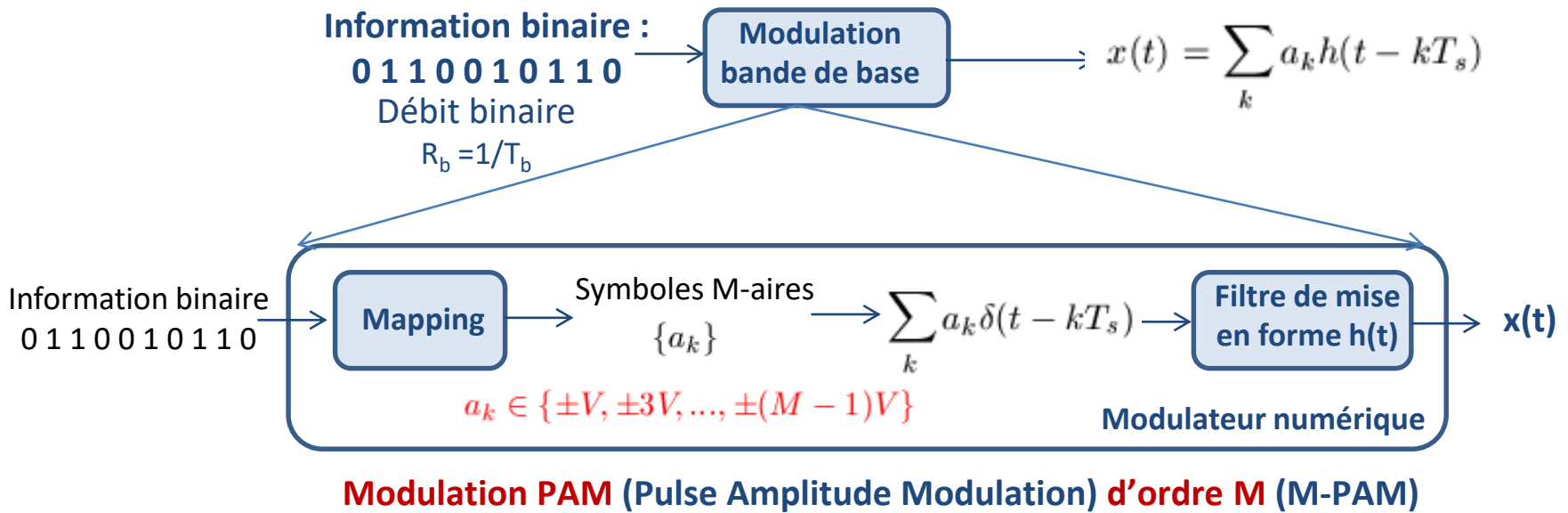
Génération d'un NRZ polaire (M=2)

```
%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]);
%Calcul de la DSP du signal par périodogramme
DSP_x=(1/length(x))*abs(fft(x,2^nextpow2(length(x))))).^2;
%Affichage de la DSP du signal généré
figure; plot(linspace(0,1,length(DSP_x)), DSP_x);
```

**Densité spectrale de puissance du signal de télécommunication généré
=> Signal dit « bande de base »**

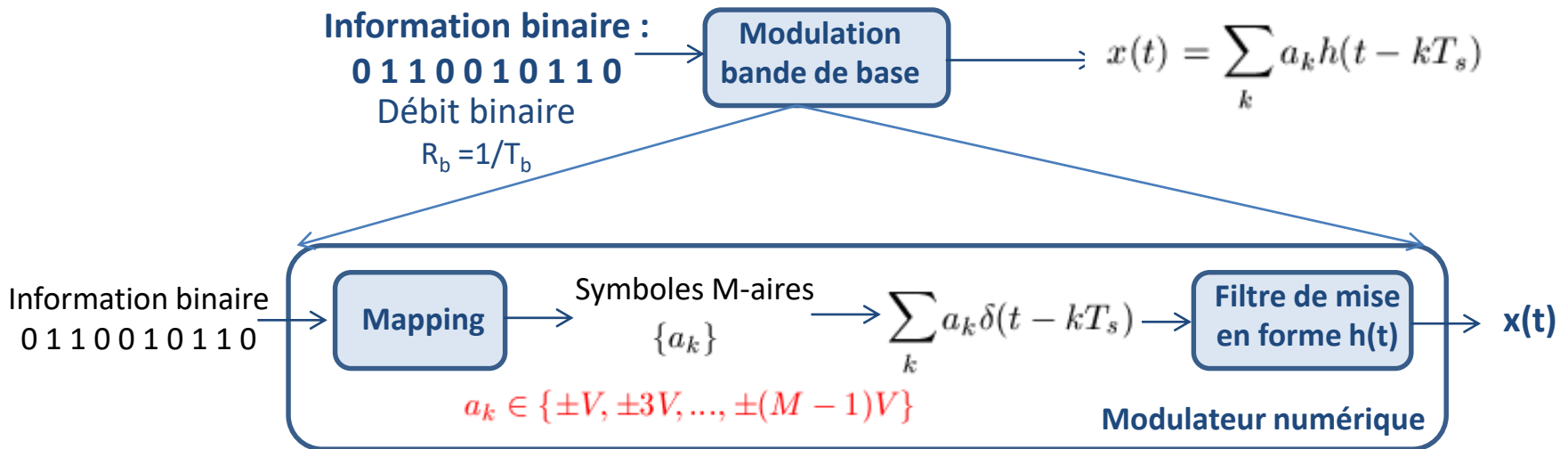
Modulation numérique en bande de base

Modélisation générale



Modulation numérique en bande de base

Modélisation générale



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 :

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

=> Modulation linéaire en “**bande de base**” = **DSP du signal transmis autour de la fréquence 0**

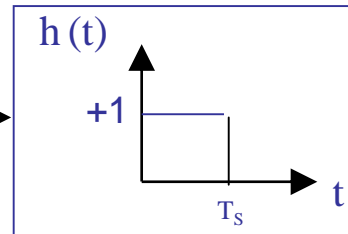
Modulation numérique en bande de base

Quelques exemples de spectres

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

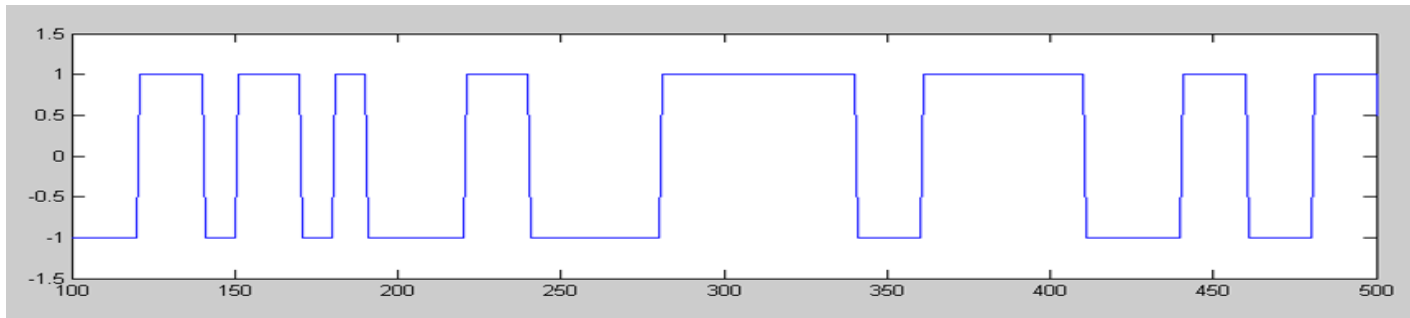
$a_k \in \{\pm 1\}$
Indépendants et équiprobables

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

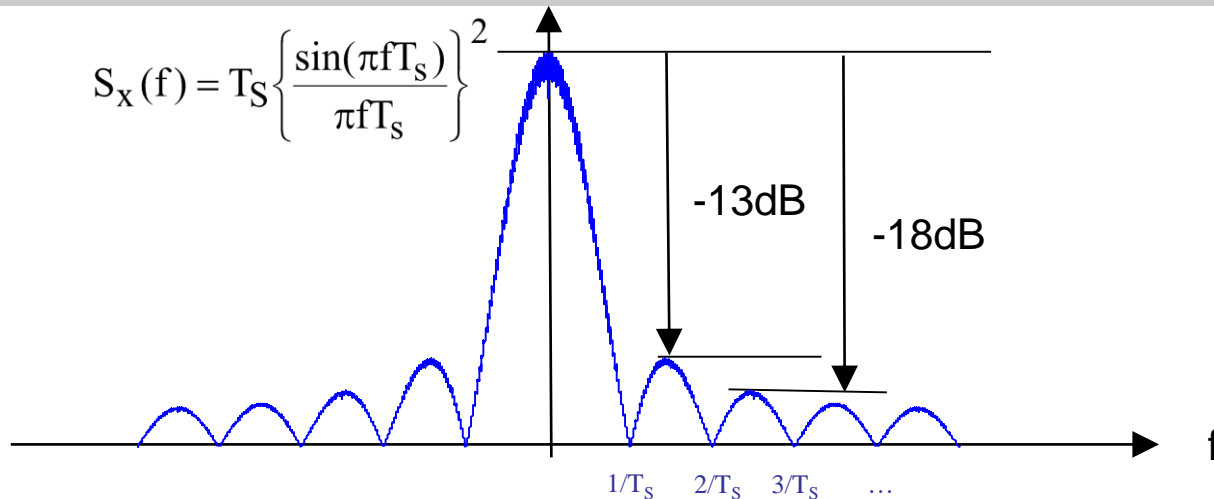


$$x(t) = \sum_k a_k h(t - kT_s)$$

$x(t)$



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



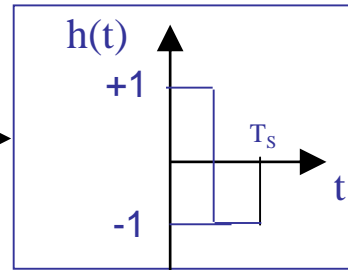
Modulation numérique en bande de base

Quelques exemples de spectres

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

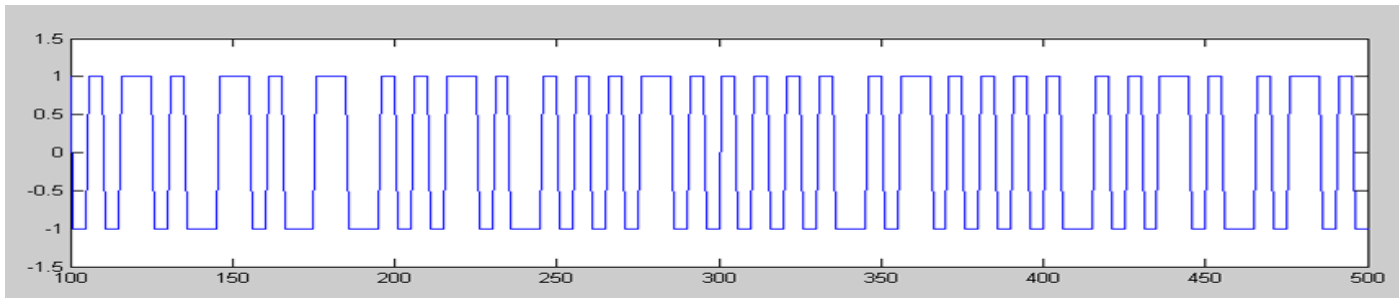
$a_k \in \{\pm 1\}$
Indépendants et équiprobables

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

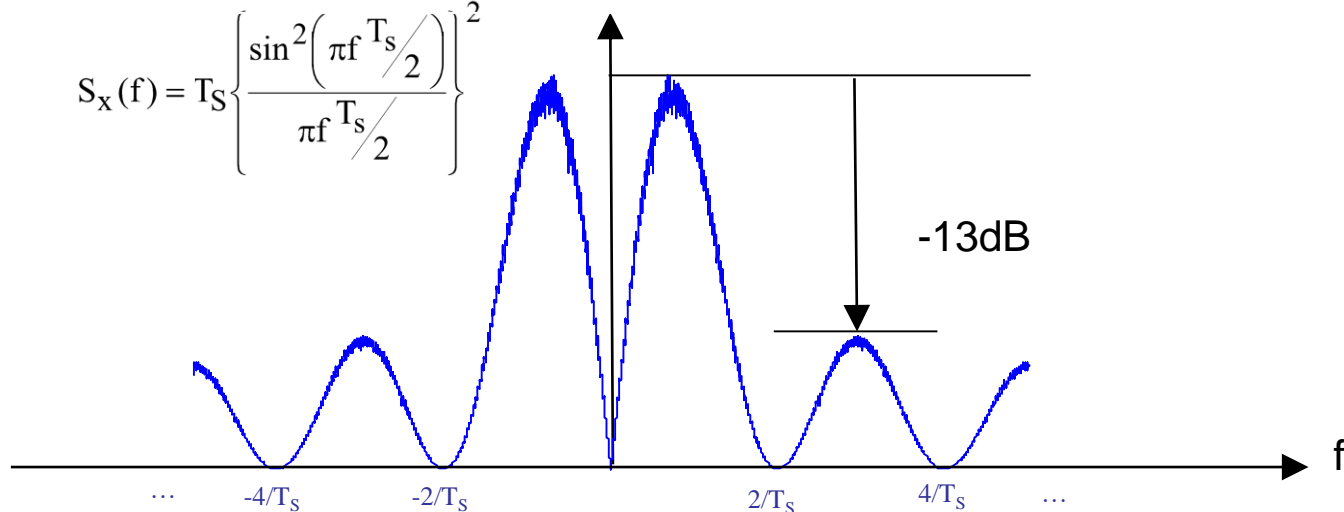


$$x(t) = \sum_k a_k h(t - kT_s)$$

$x(t)$



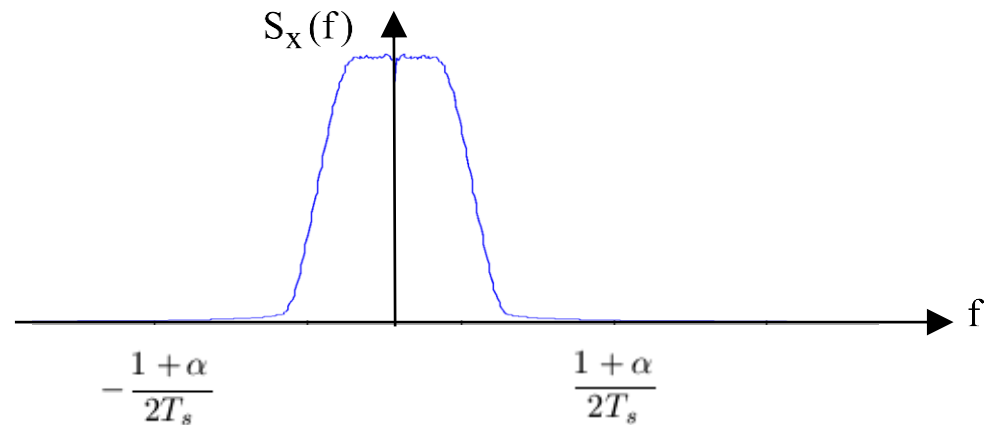
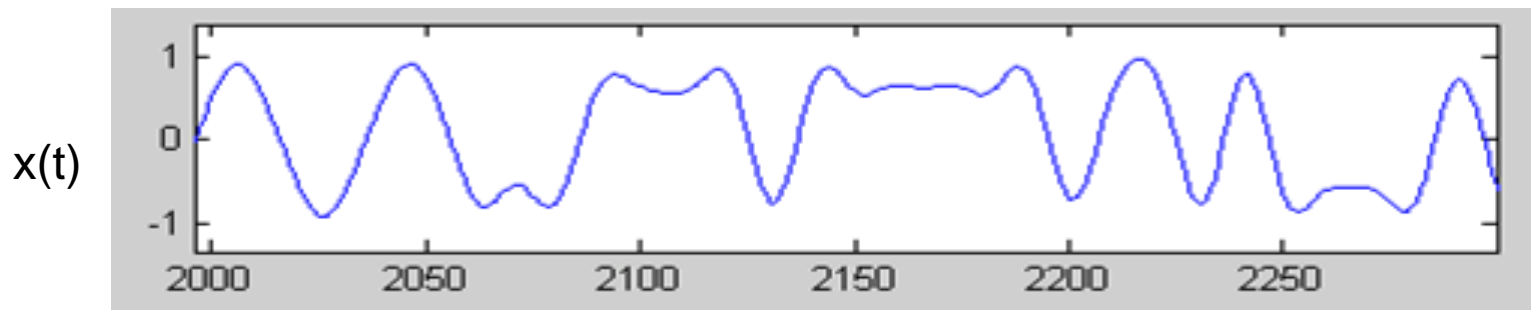
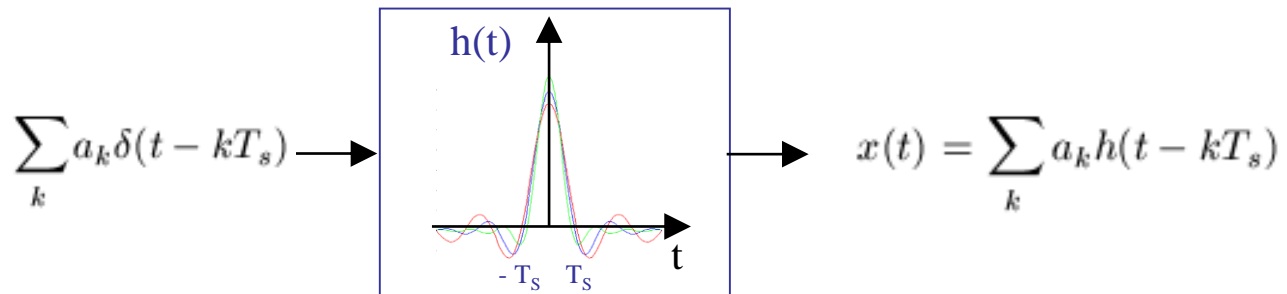
$$S_X(f) = T_S \left\{ \frac{\sin^2\left(\pi f T_S / 2\right)}{\pi f T_S / 2} \right\}^2$$



Modulation numérique en bande de base

Quelques exemples de spectres

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



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.**

Modulation numérique en bande de base

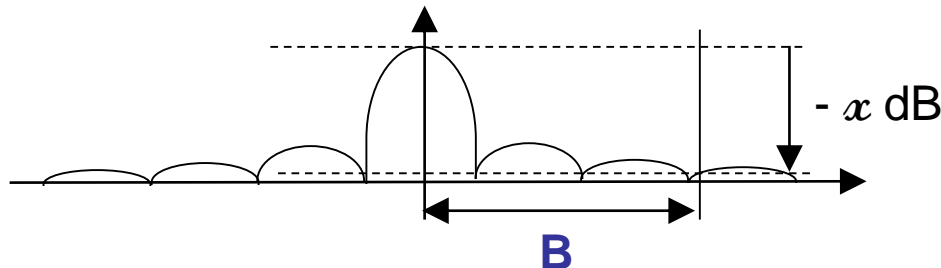
Notion d'efficacité spectrale

→ 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)



Chaîne de communication numérique : efficacité spectrale

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

Débit binaire R_b

CH
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

C
O
M
P
L
E
T
E

Codage source

E
M
E
T
T
E
U
R

Couche Physique

Codage canal

Modulation

CNA

Signal analogique

Canal de transmission

Signal analogique abimé

CAN

Démodulation

Synchronization

Décodage canal

Couche Physique

Décodage source

Bande de transmission B
nécessaire

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

Chaîne de communication numérique : efficacité spectrale

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

Débit binaire R_b

CH
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

C
O
M
P
L
E
T
E

Codage source

E
M
E
T
T
E
U
R

Couche Physique

Codage canal

Modulation

CNA

Signal analogique

Canal de transmission

Signal analogique abimé

CAN

Démodulation

Synchronisation

Décodage canal

Couche Physique

Décodage source

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

Efficacité spectrale :
Bande B nécessaire pour passer le
débit R_b souhaité

Bande de transmission B
nécessaire

Modulation numérique en bande de base

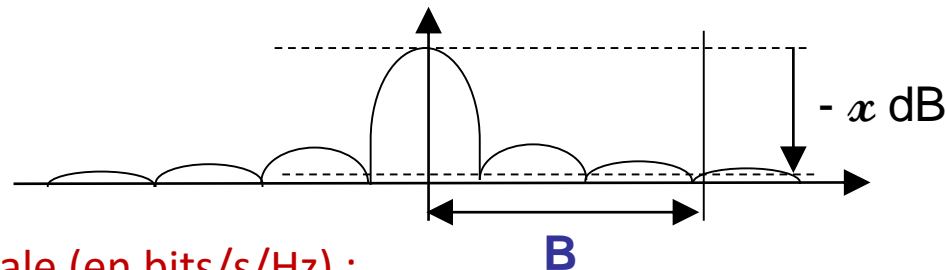
Notion d'efficacité spectrale

→ 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 utilise)

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

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

(Symboles M -aires)

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